



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διδακτορική Διατριβή

Διερεύνηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων οδηγών κατά την προσπέραση οχημάτων από μηχανοκίνητα δίκυκλα

Μπαρμπουνάκης Ν. Εμμανουήλ
Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ | Συγκοινωνιολόγος

Επιβλέπων: Ιωάννης Γκόλιας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017

*Χαρά σ' αὐτὸν πού, πρὶν μὲ χῶματα τοῦ φράξουν τὸ στόμα του,
προφτάσει νὰ φωνάξει, ἅς εἶναι καὶ μιὰ συλλαβή, δικιά του.*

Νίκος Καζαντζάκης

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε υπό τη χορηγία του ΕΛΚΕ ΕΜΠ μέσω τριετούς υποτροφίας.

Η επιτυχής εξέταση της παρούσας διδακτορικής διατριβή έλαβε χώρα στις **13 Ιουλίου 2017** και ώρα 15:00 στο Αμφιθέατρο Σιδηροδρομικής του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Η επταμελής εξεταστική επιτροπή αποτελείται από τους:

- 1) **Ιωάννης Γκόλιας** - Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)
- 2) **Γεώργιος Γιαννής** - Καθηγητής ΕΜΠ
- 3) **Ελένη Βλαχογιάννη** - Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ
- 4) **Ανδρέας Λοΐζος** - Καθηγητής ΕΜΠ
- 5) **Βασίλειος Γκίκας** - Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
- 6) **Κωνσταντίνα Γκριτζά** - Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Purdue University
- 7) **Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου** - Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διδακτορική Διατριβή

Διερεύνηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων οδηγών κατά την προσπέραση οχημάτων από μηχανοκίνητα δίκυκλα

Μπαρμπουνάκης Ν. Εμμανουήλ

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ | Συγκοινωνιολόγος

Συμβουλευτική Επιτροπή

Ιωάννης Γκόλιας, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Γεώργιος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ

Ελένη Βλαχογιάννη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017



National Technical University of Athens
School of Civil Engineering

Department of Transportation Planning & Engineering

PhD Dissertation

Investigating the decision-making process of drivers during overtaking by Powered Two Wheelers

Barmounakis N. Emmanouil

Civil & Transportation Engineer

Dissertation Committee:

John Golias, Professor NTUA (Supervisor)

George Yannis, Professor NTUA

Eleni Vlahogianni, Assistant Professor NTUA

Athens, July 2017

Ευχαριστίες

Αν κάποιος παρομοιάσει την εκπόνηση μιας διδακτορικής διατριβής με το ταξίδι του Οδυσσέα στην Ιθάκη, τότε ο προσωπικός αγώνας και η εφευρετικότητα αποτελούν βασικούς παράγοντες στην ολοκλήρωσή της. Όμως τι θα συνέβαινε στον Οδυσσέα αν δεν είχε μαζί του τους συντρόφους του;

Η περαίωση της διδακτορικής μου διατριβής, αν και αποτέλεσε μία από τις πιο πολύτιμες και ευεργετικές εμπειρίες στην έως τώρα πορεία μου στη ζωή, ήταν κάποιες φορές ιδιαίτερα επίπονη και σκληρή. Νιώθω λοιπόν την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου σε εκείνες τις στιγμές και με στήριξαν.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής μου, κ. Ιωάννη Γκόλια, Καθηγητή και Πρύτανη ΕΜΠ, ο οποίος με δίδαξε τις αρχές που πρέπει να διέπουν ένα σύγχρονο Μηχανικό. Μου έμαθε να έχω κριτική ματιά στο μέλλον, και ταυτόχρονα να μην ξεχνάω τις αξίες και τις ρίζες του Πολιτικού Μηχανικού.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ελένη Βλαχογιάννη, επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ, στην οποία χρωστώ σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική αρτιότητα της παρούσας διατριβής. Η αμέριστη συνεισφορά της, οι αξίες που μεταδίδει για την επιστήμη που υπηρετεί και οι καθημερινές της συμβουλές αποτελούν ευλογία για κάθε υποψήφιο διδάκτορα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιώργο Γιαννή, Καθηγητή ΕΜΠ, αφού ο παραλληλισμός της διατριβής με τη διαδρομή του μαραθωνίου δρόμου και οι συζητήσεις στις προπονήσεις μας, είχαν καθοριστικό ρόλο στο να αποκτήσω την αυτοπεποίθηση που πρέπει να αισθάνεται ένας υποψήφιος διδάκτορας, όπως ο δρομέας με κάθε επιπλέον του βήμα.

Το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, στην οποία και αφιερώνω αυτή τη διατριβή. Στον πατέρα μου Νίκο, που πιστεύει σε εμένα όσο κανένας άλλος απ' όταν ήμουν παιδί. Στην μητέρα μου Μαίρη, που εφοδιασμένη με τόνους υπομονής, με στηρίζει σαν βράχος. Στον αδερφό μου Σωκράτη, φίλο και πρότυπό μου, συναγωνιστή για ένα κόσμο με όμορφες μουσικές. Στην αδερφή μου Ρένια, την προσωποποίηση της χαράς και της ευτυχίας, που μόνο αισιόδοξο με κάνει να αισθάνομαι για το μέλλον.

Φυσικά, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω την Βασιλική, τους Δημήτρη², την Δώρα, την Έλλη, τον Μανόλη και τον Παντελή. Η παρούσα διατριβή δεν είναι σίγουρο ότι θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς αυτούς. Ένα όμως είναι σίγουρο. Χωρίς αυτούς, τα χρόνια που διήρκεσε η εκπόνησή της (και όχι μόνο!) θα ήταν πολύ, μα πολύ βαρετά.

Περίληψη

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, τα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems – ITS) που αφορούν στη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών και της οδικής ασφάλειας έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον ερευνητών και ακαδημαϊκών. Παρόλ' αυτά, ελάχιστες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στα ξεχωριστά χαρακτηριστικά της κίνησης των Μηχανοκίνητων Δικύκλων (ΜΔ) και στο πως αυτά μπορούν να επηρεάσουν την αρχιτεκτονική και τη λειτουργικότητα των ITS ιδιαίτερα όταν οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της επικοινωνίας Οχήματος-με-όχημα (Vehicle-to-Vehicle – V2V) τρέχουν με ραγδαία ταχύτητα. Σκοπός της διατριβής είναι η διερεύνηση της διαδικασίας λήψης των αποφάσεων των οδηγών κατά την προσπέραση οχημάτων από μηχανοκίνητα δίκυκλα και της αλληλεπίδρασής τους με τα υπόλοιπα οχήματα σε αστική αρτηρία σε συνθήκες στρατηγικής αλληλεξάρτησης.

Αρχικά, η βιβλιογραφική ανασκόπηση που διενεργήθηκε ανέδειξε σημαντικά ευρήματα. Μία από τις πιο βασικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές όσον αφορά στην μελέτη φαινομένων κίνησης ΜΔ είναι η έλλειψη πραγματικών δεδομένων από τους πολύπλοκους ελιγμούς τους και των μη συμβατικών τροχιών τους που είναι δύσκολο να αναπαρασταθούν ή να προτυποποιηθούν με τη χρήση μεθόδων προσομοίωσης. Ως εκ τούτου, η χρήση νέων τεχνολογιών ως ένα μέσο καταγραφής της κυκλοφορίας συζητείται και προτείνεται. Επιπλέον, αναδεικνύεται η ανάγκη για μία διαφορετική προσέγγιση στο φαινόμενο της προσπέρασης των μοτοσυκλετιστών σε σχέση με τον τρόπο που το έχουν προσεγγίσει έως τώρα έρευνες για τα υπόλοιπα οχήματα. Τέλος, προκύπτει ότι η έρευνα και η εφαρμογή των ITS θα πρέπει να επεκταθούν για την υποστήριξη σε τομείς πέραν της οδικής ασφάλειας, με έμφαση στη συνεργασία ΜΔ-οχημάτων και στη βελτίωση κυκλοφοριακών συνθηκών.

Για τη δημιουργία μίας λεπτομερούς βάσης δεδομένων με τροχιές ΜΔ γίνεται η χρήση των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων (ΜΕΣ – Unmanned Aerial System – UAS). Αν και οι περισσότεροι ερευνητές στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιήσει σταθερές κάμερες για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας, προκύπτουν αρκετά θέματα στην παρακολούθηση του ίχνους των οχημάτων σε ένα εκτεταμένου μήκους τμήμα μιας αρτηρίας. Ενώ τα UAS (ευρέως γνωστά ως «drones») είναι στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος για στρατιωτικούς ή ψυχαγωγικούς σκοπούς, αναδεικνύεται ότι δύνανται να αποτελέσουν σημαντικό κομμάτι της υποδομής των ITS. Κάνοντας χρήση UAS και ανεπτυγμένων τεχνικών όρασης υπολογιστών, συλλέχθηκαν δεδομένα από πάνω από 400 περιπτώσεις προσπεράσεων.

Η λεπτομερής βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε άνοιξε το δρόμο για τη χρήση ανεπτυγμένων μεθοδολογικών εργαλείων. Αναπτύχθηκαν Δέντρα Αποφάσεων και άλλοι μετα-αλγόριθμοι, μία ειδική περίπτωση προτύπων Μηχανικής Μάθησης, με σκοπό την προτυποποίηση των μη συμβατικών σεναρίων προσπέρασης των ΜΔ. Τα ανεπτυγμένα πρότυπα δέντρων αποφάσεων δίνουν τη δυνατότητα να περιγραφεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων του μοτοσυκλετιστή και να αναδειχθούν οι σημαντικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την προσπέραση, όπως διαφορές ταχυτήτων, χωρικοί παράγοντες και η τοποθέτηση των οχημάτων. Επιπλέον, τα δύο πρότυπα έχουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά ορθής πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς του μοτοσυκλετιστή και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση στο σχεδιασμό σύγχρονων έξυπνων συστημάτων.

Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση στην αλληλεπίδραση των ΜΔ και των υπόλοιπων οχημάτων σε τμήμα μιας αρτηρίας. Κάνοντας χρήση της Θεωρίας Παιγνίων (Game Theory), ο μοτοσυκλετιστής και ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος θεωρούνται δύο ορθολογικοί «παίκτες» που αναπτύσσουν στρατηγικές με σκοπό να μεγιστοποιήσουν τις απολαβές τους. Αυτές οι στρατηγικές είναι είτε συνεργατικές είτε όχι, αναλόγως τις αποστάσεις και τα κενά ασφαλείας που διατηρούν οι οδηγοί, ενώ και άλλοι παράγοντες οδηγικής συμπεριφοράς λαμβάνονται υπόψη. Κάνοντας χρήση ανεπτυγμένων στατιστικών μεθόδων και προτύπων δομικών εξισώσεων ορίζεται ένα νέο καινοτόμο ως «Άνεση κατά την Προσπέραση» με σκοπό να περιγράψει τους συμπληρωματικούς παράγοντες που συνδέονται με την υψηλή ταχύτητα κατά την προσπέραση, όπως η ασφάλεια και η ευχαρίστηση των οδηγών.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συνεργασία μεταξύ των οδηγών μπορεί να επέλθει σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον όπως είναι αυτό των αστικών οδών. Τα πλεονεκτήματα της συνεργασίας αποτυπώνονται στην αύξηση της μέσης ταχύτητας των οχημάτων, στην αυξημένη «Άνεση κατά την Προσπέραση» και στην αύξηση του ποσοστού επιτυχημένων προσπεράσεων. Σε συνδυασμό με την υψηλή προβλεψιμότητα των προτύπων, η συνεργασία σε κυκλοφοριακές συνθήκες με διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων μπορεί να ενισχυθεί και να αντιμετωπιστούν προβλήματα στην αντιληψιμότητα των δικύκλων από τους άλλους οδηγούς.

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο τα συγκεκριμένα ευρήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών. Περιγράφεται ένα σύστημα όπου με τη χρήση ασύρματων τεχνολογιών και μετάδοσης πληροφοριών μεταξύ των οδηγών σε μία οδό, θα προτείνεται στο μοτοσυκλετιστή να ολοκληρώσει με ασφάλεια και άνεση την προσπέραση ενώ ο διαχειριστής ενός δικτύου θα μπορεί να μεταβάλλει τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά μιας οδού μεταβάλλοντας τις συνθήκες συνεργασίας.

Οι καινοτομίες της διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στην πρωτότυπη χρήση των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων ως μέρος της υποδομής των ITS, στην ειδική προσέγγιση στα φαινόμενα αλληλεπίδρασης διαφορετικών τύπων οχημάτων σε τμήμα μίας αρτηρίας, στη χρήση προχωρημένων τεχνικών Μηχανικής Μάθησης και στην εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων σε φαινόμενα κυκλοφορίας. Η συνεισφορά των αποτελεσμάτων και των ευρημάτων που προέκυψαν από την προτυποποίηση της διαδικασίας λήψης των αποφάσεων των οδηγών και της αλληλεπίδρασης διαφορετικών τύπων οχημάτων είναι ιδιαίτερης σημασίας για το σχεδιασμό σύγχρονων έξυπνων συνεργατικών συστημάτων μεταφορών, ιδιαίτερα σε ένα περιβάλλον όπου οι τεχνολογίες V2V, τα αυτόνομα οχήματα (Autonomous Vehicles) και τα συνδεδεμένα οχήματα (Connected Vehicles) είναι στα φλέγοντα ζητήματα που απασχολούν τη διεθνή ερευνητική κοινότητα.

Abstract

During the last decades, Intelligent Transportation Systems (ITS) mainly focusing on improving traffic conditions and traffic safety have attracted the interest of researchers and academia. However, very few approaches have been focused on the discriminating characteristics of Powered Two-Wheelers (PTW) traffic and how these may affect the ITS architecture and operability, especially when technological advances in Vehicle-To-Vehicle communications are advancing fast. The aim of the specific PhD dissertation is to examine the decision process of drivers during overtaking by PTW and their strategic interactions with the rest of the traffic.

A literature review on the subject is conducted revealing significant findings. Firstly, one of main difficulties researchers face when it comes to studying PTW phenomena is the lack of real data of their complex manoeuvres and unconventional trajectories that cannot be easily be tracked or modelled using simulation approaches. As a result, the use of modern technologies as a mean of recording traffic streams is discussed, reviewed and proposed. Moreover, overtaking phenomena have been previously documented mostly for cars, without taking into account the distinct way PTW move in traffic. In addition, although ITS are in the active parts of research, they have not yet been extended to support PTW traffic applications based on cooperation and how they could improve traffic conditions, except for limited safety oriented systems.

In order to create a detailed naturalistic PTW trajectory database, the innovative use of Unmanned Aerial Systems (UAS) was preferred. While most researchers have been using stationary cameras to monitor traffic, numerous issues can emerge when it comes to monitoring an extended arterial and the presence of hidden points while tracking vehicles. While UAS (commonly known as drones) have been in the centre of attention for military or entertainment purposes, it is found that they have the potential to become a crucial part of ITS infrastructure as an eye-in-the-sky solution. Using UAS and advanced computer vision techniques, detailed data of over 400 overtaking cases was collected.

In addition, the specific database paved the way for advanced methodological tools. Decision Trees and other meta-algorithms, a special case of Machine Learning (ML) models, are developed in order to model the unconventional overtaking patterns of PTW drivers. The developed decision tree models enable the identification of the significant factors during overtaking such as speed difference, spatial factors and vehicle type and positions. The two-high performance predictive two models can be used in the design of modern ITS.

Then, the interactions between PTW and the rest of the traffic are examined. Using the concept of Game Theory, both the PTW driver and the preceding vehicle's driver are assumed to be rational decision-makers that develop strategies, trying to maximise their payoffs. These strategies may be cooperative or not with respect to distances and safety gaps, while other behavioural aspects are also taken into account. Using advanced statistical methods and structural equation modelling an innovative variable named as "Comfort at Overtake" is created to describe the supplementary to high speeds factors that are connected to overtaking such as safety of the individual driver-vehicle system, joy of driving and social welfare.

Results show that cooperation can emerge, even in a competitive environment as the roads are. The advantages of cooperation can be detected in increased average speed of all vehicles, increased "Comfort at Overtake" and increased percentage of successful overtakes. Findings also revealed that taking advantage of the high accuracy models, the cooperativeness in mixed traffic conditions could be enhanced and conspicuity issues frequently met when vehicles interact with PTW could be tackled.

Then a discussion arises as to how this conclusion can be a critical in the design of innovative applications and services and set the framework for an assistive system. Specifically, by using wireless communication and data transmission, it could suggest the PTW driver whether the traffic conditions upstream are adequate for a safe and comfortable pass to be completed, while the administrator of a road network can change traffic parameters by optimizing cooperation conditions.

The state-of-the-art of the PhD dissertation are summarized in the innovative use of Unmanned Aerial Systems as part of the ITS infrastructure, in the new way of approaching interaction of different types of vehicles, in the use of advanced Machine Learning techniques and in the application of Game Theory to overtaking phenomena. The contribution of results and findings from the modeling of driver decision-making and the interaction of different types of vehicles is of particular importance for the design of modern Cooperative ITS, particularly in an environment where V2V technologies, autonomous and Connected Vehicles are among the hot topics of the international research community.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	11
ABSTRACT	15
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	17
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	20
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	21
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	22
ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	23
Επιστημονικά Περιοδικά	23
Επιστημονικά Συνέδρια	23
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
1.1. Γενικά	25
1.2. Σκοπός	26
1.3. Διάρθρωση Διδακτορικής Διατριβής	28
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	31
2.1. Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών για την Κυκλοφορία & την Οδική Ασφάλεια	31
2.1.1. Συνεργατικά Συστήματα και Ανταλλαγή Πληροφοριών	32
2.1.2. Συστήματα Υποβοήθησης Οδηγού για την Ασφάλεια και την Κυκλοφοριακή Συμφόρηση	34
2.1.3. Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών για Μηχανοκίνητα Δίκυκλα	35
2.2. Κυκλοφορία Μηχανοκίνητων Δικύκλων	37
2.2.1. Τύπος Οδού	40
2.2.2. Παράμετροι Προτυποποίησης	41
2.2.3. Μέθοδοι Προτυποποίησης	42
2.2.4. Θέματα Δεδομένων & Επίπεδο Ανάλυσης	43
2.2.5. Επίδραση των ΜΔ σε Περιβάλλον με Διάφορα Μέσα Μεταφοράς	45
2.3. Κρίσιμα Ζητήματα	46
2.3.1. Ζητήματα Δεδομένων και Ακρίβεια	46
2.3.2. Νέες Τεχνολογίες στη Συλλογή Δεδομένων	47
2.3.3. Διαδικασία Προσπέρασης Μηχανοκίνητων Δικύκλων	55
2.4. Σύνοψη	56

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	59
3.1. Εισαγωγή	59
3.2. Δυναμική Διαδικασία Λήψης Απόφασης κατά την Προσπέραση	59
3.3. Πρόβλεψη Οδηγικής Συμπεριφοράς μέσω Δέντρων Αποφάσεων	62
3.4. Συνεργασία κατά την Προσπέραση	64
3.5. Παίγνια Συνεργασίας οδηγών κατά την προσπέραση	65
3.6. Η «Άνεση Κατά την Προσπέραση» ως μέγεθος Απολαβής	67
3.7. Έλεγχος Συνθηκών Συνεργασίας	67
4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	71
4.1. Εισαγωγή	71
4.2. Περιγραφή Εξοπλισμού	72
4.3. Περιοχή Μελέτης	75
4.3.1. Επιλογή Περιοχής Μελέτης και Στοιχεία Πτήσεων του UAV	75
4.4. Διαδικασία Δημιουργίας Βάσης Δεδομένων	77
4.4.1. Εγγραφή Βίντεο	77
4.4.2. Βαθμονόμηση Βίντεο	77
4.4.3. Σταθεροποίηση Βίντεο	80
4.4.4. Περιγραφή Λογισμικού Ανάλυσης Βίντεο και Εξαγωγής Τροχιών	81
4.5. Περιγραφή Βάσης Δεδομένων	82
4.5.1. Γενικά Στοιχεία	82
4.5.2. Αρχή Προσπέρασης (Φάση 1)	83
4.5.3. Ολοκλήρωση Προσπέρασης (Φάση 2)	85
4.5.4. Συμπληρωματικές Μεταβλητές	85
5. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΠΕΡΑΣΗΣ	87
5.1. Εισαγωγή	87
5.2. Πρόβλεψη επιτυχούς προσπέρασης	88
5.3. Πρόβλεψη της σχετικής θέσης της μοτοσυκλέτας	95
6. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΟΔΗΓΩΝ	99
6.1. Εισαγωγή	99
6.2. Ποσοτικοποίηση της «Άνεσης κατά την Προσπέραση»	99
6.3. Παίγνια για την Προτυποποίηση της Λήψης Απόφασης κατά την Προσπέραση	104
6.4. Ανάλυση ορθολογικότητας επιλογών των παικτών	108
6.5. Έλεγχος Στρατηγικών για την καθοδήγηση των Οδηγών	111
6.5.1. Διερεύνηση Μέσης Ταχύτητας ΜΔ ανά σετ στρατηγικών	112

6.5.2.	Διερεύνηση Μέσης Ταχύτητας Προπορευόμενου οχήματος	114
6.5.3.	Διερεύνηση Απολαβής «Άνεσης κατά την Προσπέραση» για το Δίκυκλο	115
6.5.4.	Διερεύνηση Απολαβής «Άνεσης κατά την Προσπέραση» για το Προπορευόμενο Όχημα	116
6.5.5.	Διερεύνηση Ποσοστού Επιτυχημένων Προσπεράσεων	117
6.5.6.	Σύνοψη Αποτελεσμάτων για διαφορετικά Όρια Συνεργασίας	118
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑ	121
7.1.	Γενικά	121
7.2.	Σύνοψη Αποτελεσμάτων Ανάλυσης	122
7.3.	Συμπεράσματα & Συνεισφορά Διδακτορικής Διατριβής	125
7.3.1.	Γενικά Συμπεράσματα	125
7.3.2.	Συνεισφορά Προτύπων Διαδικασίας Προσπέρασης	126
7.3.3.	Συνεισφορά Προτυποποίησης Αλληλεπίδρασης	129
7.3.4.	Συνεισφορά στη διαχείριση κυκλοφορίας	131
7.4.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	135
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	138
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	159
A.1	Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων	159
A.2	Δέντρα Αποφάσεων & Μέτα-αλγόριθμοι	162
A.2.1	Γενική Περιγραφή	162
A.2.2	«Κλάδεμα» και Ενίσχυση	164
A.3	Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων	166

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Απόσπασμα από το σύγγραμμα "The Evolution of Cooperation" του R.Axelrod (1984) (Axelrod, 1984)	28
Εικόνα 2: Τα συστατικά μέρη ενός Μη Επανδρωμένου Εναέριου Συστήματος (Unmanned Aerial System)	48
Εικόνα 3: Οι τρεις (3) διαφορετικές χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές της προσπέρασης	60
Εικόνα 4: Δυναμική Διάσταση της Αλληλεπίδρασης των ΜΔ με τα υπόλοιπα οχήματα	61
Εικόνα 5: Παράδειγμα αναπαράστασης δενδρικής μορφής	63
Εικόνα 6: Διαμόρφωση Παιγνίου Αναλυτικής Μορφής	66
Εικόνα 7: Αφηρημένο διάγραμμα απολαβής σε επίπεδο χρήστη και επίπεδο συστήματος	69
Εικόνα 8: Χρήση σταθερής κάμερας με περιορισμένο μήκος καταγραφής	71
Εικόνα 9: Το DJI S900 του εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής (α) έτοιμο για απογείωση και (β) κατά τη διάρκεια αιώρησης.	72
Εικόνα 10: Περιοχή Μελέτης όπως φαίνεται σε Προβολή Πρώτου Προσώπου (FPV)	74
Εικόνα 11: Στιγμιότυπο με τα στοιχεία τηλεμετρίας και πτήσης του UAS	74
Εικόνα 12: Η περιοχή μελέτης στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται το σημείο αιώρησης του UAV ενώ το γράμμα Η υποδεικνύει το σημείο απογείωσης και προσγείωσης	76
Εικόνα 13: Στιγμιότυπο από το σημείο απογείωσης με όλον τον εξοπλισμό	76
Εικόνα 14: Μετατροπή της καμπύλης επιφάνειας λόγω παραμόρφωσης σε οριζόντιο ορθογώνιο επίπεδο.	79
Εικόνα 15: Στιγμιότυπο από την χρήση εξοπλισμού GNSS	79
Εικόνα 16: Σημεία λήψης συντεταγμένων UTM	80
Εικόνα 17: Ο μηχανισμός σταθεροποίησης της κάμερας (www.dji.com)	80
Εικόνα 18: Ορισμός σημείων εξαίρεσης από τη διαδικασία σταθεροποίησης και ταύτιση εικονικών με πραγματικές συντεταγμένες	81
Εικόνα 19: Στιγμιότυπο από το Λογισμικό DataFromSky (DataFromSky, 2016)	82
Εικόνα 20: Κωδικοποίηση Ταχυτήτων και Επιταχύνσεων (Α' Φάση)	84
Εικόνα 21: Κωδικοποίηση Αποστάσεων & Χωρικών Διαχωρισμών (Α' Φάση)	84
Εικόνα 22: Κωδικοποίηση Ταχυτήτων και Αποστάσεων (Β' Φάση)	85
Εικόνα 23: Σύγκριση Καμπυλών ROC	88
Εικόνα 24: Αποτύπωση του Δέντρου Απόφασης	92
Εικόνα 25: Δέντρο απόφασης για Αριστερά ή Δεξιά.	97
Εικόνα 26: Πρότυπο MIMIC για τον Παίκτη 1 (Μηχανοκίνητο Δίκυκλο)	102
Εικόνα 27: Πρότυπο MIMIC για τον Παίκτη 2 (Προπορευόμενο Όχημα)	103
Εικόνα 28: Το παίγνιο που διαμορφώνεται σε δενδρική μορφή με τις αντίστοιχες απολαβές	106
Εικόνα 29: Διαγράμματα QRE για το δίκυκλο και το προπορευόμενο όχημα	110
Εικόνα 30: Η κατάσταση τώρα (α) και η πιθανή εφαρμογή ενός συστήματος που θα προωθεί την προσπέραση των ΜΔ (b)	130
Εικόνα 31: Η κυκλική επίδραση των Μηχανοκίνητων Δικύκλων στην Κυκλοφορία	132
Εικόνα 32: Εικονικό Διάγραμμα Μεταβολής QRE	133
Εικόνα 33: Παίγνιο Αναλυτικής Μορφής	161
Εικόνα 34: Γραφική αναπαράσταση ενός προτύπου δομικών εξισώσεων.	167

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών για Τετράτροχα και Μηχανοκίνητα Δίκυκλα	37
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός Πίνακας Βιβλιογραφίας που αφορά στην κυκλοφορία Μηχανοκίνητων Δικύκλων.....	37
Πίνακας 3: Συγκριτική αξιολόγηση των τριών μέσων καταγραφής ως προς τις απαιτήσεις ανά κατηγορία.....	48
Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας βιβλιογραφίας στη χρήση εναέριων μέσων καταγραφής της κυκλοφορίας.....	49
Πίνακας 5: Γενικά στοιχεία κατά την Προσπέραση	83
Πίνακας 6: Μεταβλητές Ταχυτήτων & Επιταχύνσεων.....	83
Πίνακας 7: Μεταβλητές Αποστάσεων & Χωρικών Διαχωρισμών	84
Πίνακας 8: Μεταβλητές που αφορούν τη μετάβαση από τη Φάση 2 στη Φάση 3.....	85
Πίνακας 9: Συμπληρωματικές Μεταβλητές που προκύπτουν από τις προηγούμενες	86
Πίνακας 10: Συγκριτική Ανάλυση των προτύπων για Προσπέραση	89
Πίνακας 11: Συγκριτική Ανάλυση των προτύπων για επιλογή σχετικής θέσης της μοτοσυκλέτας	95
Πίνακας 12: Δείκτες Καλής Προσαρμογής των δύο Προτύπων για την Ποσοτικοποίηση της Άνεσης κατά την Προσπέραση για τα δύο οχήματα	100
Πίνακας 13: Πρότυπο MIMIC για τον Παίκτη 1 (Μηχανοκίνητο Δίκυκλο).....	101
Πίνακας 14: Πρότυπο MIMIC για τον Παίκτη 2 (Προπορευόμενο Όχημα)	102
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας επιτυχημένων προσπεράσεων ανά ομάδα στρατηγικών	107
Πίνακας 16: Μέσες Ταχύτητες Οχημάτων ανά ομάδα στρατηγικών.....	107
Πίνακας 17: Σύνοψη Αποτελεσμάτων Προτύπων Πρόβλεψης Προσπέρασης	122
Πίνακας 18: Σύνοψη Αποτελεσμάτων Θεωρίας Παιγνίων	124
Πίνακας 19: Παίγνιο Στρατηγικής Μορφής.....	160

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάρθρωση Διδακτορικής Διατριβής	29
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής Μεθοδολογικής Προσέγγισης	59
Διάγραμμα 3: Περιγραφή Διαδικασίας Δημιουργίας Βάσης Δεδομένων	77
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα ροής Προτυποποίησης Διαδικασίας Προσπέρασης	87
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα ροής Προτυποποίησης Συνεργασίας	99
Διάγραμμα 6: Μέση Ταχύτητα ΜΔ ανά ομάδα στρατηγικών	113
Διάγραμμα 7: Μέση ταχύτητα προπορευόμενου οχήματος ανά ομάδα στρατηγικών	114
Διάγραμμα 8: Απολαβές δικύκλου βάσει του μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση»	116
Διάγραμμα 9: Απολαβές οχήματος βάσει του μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση»	117
Διάγραμμα 10: Ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων ανά ομάδα στρατηγικών	118

Λίστα Δημοσιεύσεων στα πλαίσια της Διατριβής

Επιστημονικά Περιοδικά

1. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2017). Identifying predictable patterns in the unconventional overtaking decisions of PTW for Cooperative ITS, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Σε στάδιο αναθεώρησης τον Ιούλιο 2017
2. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C. and Babinec, A. (2017). How accurate are small Drones for measuring microscopic traffic parameters?, Transportation Letters, Σε διαδικασία εκτύπωσης το Σεπτέμβριο 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/19427867.2017.1354433>
3. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2016). Modeling Cooperation and Powered-Two Wheelers Short-term Strategic Decisions during Overtaking in Urban Arterials, International Journal of Transportation Science and Technology, Volume 5, Issue 4, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2016.11.001>
4. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2016). Intelligent Transportation Systems and Powered Two Wheelers Traffic, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(4), 908-916. <http://doi.org/10.1109/TITS.2015.2497406>
5. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2016). Unmanned Aerial Systems for Transportation Engineering: Current practice and future challenges, International Journal of Transportation Science and Technology, Volume 5, Issue 3, October 2016, Pages 111-122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.02.001>
6. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2016). Vision based multivariate statistical modelling for Powered Two-Wheelers Maneuverability during Overtaking in Urban Arterials, Transportation Letters, 8 (3), 167-176. <http://doi.org/10.1179/1942787515Y.0000000020>

Επιστημονικά Συνέδρια

1. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Yannis, G. & Golias, J.C. (2017). Modeling Powered Two Wheelers' overtaking maneuvers using Game Theory, In the 8th International Congress on Transport Research - ICTR, October, Thessaloniki, Greece

2. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Yannis, G. & Golias, J.C. (2017). Naturalistic Aerial Approaches for Monitoring Powered Two Wheelers, 6th International Symposium on Naturalistic Driving Research, 8-9 June, The Hague, The Netherlands
3. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2017). Decision trees and meta-algorithms for revealing Powered Two Wheelers Overtaking Patterns, TRB 96th Annual Meeting January 8-12, Washington, D.C. US
4. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2016). Extracting Kinematic Characteristics from Unmanned Aerial Vehicles, TRB 95th Annual Meeting January 10-14, Washington, D.C., US.
5. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2015). A Game Theoretic Approach to Powered Two Wheelers Overtaking Phenomena, TRB 94th Annual Meeting January 11-15, Washington, D.C., US.
6. Καταχανάκη, Π., Μπαρμπουνάκης, Ε., Βλαχογιάννη, Ε. & Γκόλιας Ι. (2015). Ανάπτυξη προτύπων για την περιγραφή της κίνησης των μοτοσυκλετιστών σε αστικές αρτηρίες. Στο 7ο Διεθνές Συνέδριο για την Έρευνα στις Μεταφορές - ICTR, Νοέμβριος, Αθήνα, Ελλάδα
7. Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., & Golias, J.C. (2014). Investigation of Powered Two-Wheelers Behavior during Overtaking in Urban Arterials, TRB 93rd Annual Meeting January 12-16, Washington, D.C., US.

1.Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Το σύγχρονο αστικό περιβάλλον μεταβάλλεται με γρήγορους ρυθμούς. Για πολλούς που έχουν επιλέξει να ζουν και να δραστηριοποιούνται σε αυτό, το αστικό τοπίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με το αυτοκίνητο, πολλές φορές ως λύση μονόδρομος για να πραγματοποιούνται οι καθημερινές μετακινήσεις τους. Παρόλ' αυτά, διαπιστώνεται μία συνεχής αναζήτηση νέων μέσων μεταφοράς από τους μετακινούμενους για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους και την εξοικονόμηση πόρων. Η απόφαση για την επιλογή του μέσου που τελικά θα επιλέξουν εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα θέσεων στάθμευσης, το επίπεδο εξυπηρέτησης της δημόσιας συγκοινωνίας και η κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Ένα από τα μέσα που επιλέγουν οι μετακινούμενοι πολλές φορές είναι το Μηχανοκίνητο Δίκυκλο (ΜΔ – Powered Two Wheeler – PTW). Τα τελευταία χρόνια ο αριθμός των ΜΔ αυξάνεται συστηματικά αφού γίνονται όλο και πιο δημοφιλή ως μέσα μεταφοράς για τις καθημερινές μετακινήσεις. Στην Ευρώπη οι πωλήσεις των ΜΔ παρουσιάζουν μία αυξητική τάση (ACEM, 2016) ενώ αύξηση στη χρήση τους καταγράφεται σε πολλές ασιατικές χώρες (Hsu et al., 2003; Lubis, 2009) και στην Αυστραλία (Rose and Delbosc, 2016). Τα ΜΔ χρησιμοποιούνται ευρέως ως ένα γρήγορο και ευέλικτο μέσο μεταφοράς εξαιτίας της μεγάλης ισχύος και της καλής αναλογίας κιλών ανά ίππο μετά τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στους σύγχρονους κινητήρες. Επίσης, με τις υψηλές ταχύτητες που μπορούν να αναπτύξουν και σε συνδυασμό με το μικρό τους πλάτος δίνεται η δυνατότητα προσπέρασης των υπολοίπων οχημάτων και ιδιαίτερα όταν διαμορφώνονται ουρές οχημάτων σε αναμονή. Επιπλέον, η στάθμευσή τους είναι συγκριτικά πιο εύκολη καθιστώντας τα πιο ελκυστικά για χρήση στο αστικό περιβάλλον (Leong and Mohd Sadullah, 2007). Τέλος, είναι πιο οικονομικό μέσο μετακίνησης απ' ό,τι το αυτοκίνητο, τόσο κατά την αγορά όσο και την συντήρηση, αφού τα τέλη κυκλοφορίας, τα ασφάλιστρα και η κατανάλωση ανά χιλιόμετρο είναι χαμηλότερα σε σχέση με τα ΙΧ, καθιστώντας τα ΜΔ πιο προσιτά.

Ένα βασικό μειονέκτημα των ΜΔ σε σχέση με το ΙΧ είναι η μειωμένη παθητική ασφάλεια (Theofilatos and Yannis, 2015). Η συνεχής έκθεση του αναβάτη σε κινδύνους και τις καιρικές συνθήκες μπορεί να προκαλέσει ευκολότερα κάποιο ατύχημα, με συνέπεια το μικρό έως σοβαρό τραυματισμό του. Το μικρό μέγεθος του ΜΔ το καθιστά μη ιδιαίτερα διακριτό καθώς κινείται, με αποτέλεσμα την αυξημένη πιθανότητα ατυχήματος. Επίσης, το γεγονός ότι είναι δίτροχο όχημα έχει άμεση συνέπεια στην ασφάλεια του αναβάτη λόγω ισορροπίας και επίδρασης της κίνησης των

άλλων οχημάτων, πράγμα που δεν ισχύει στα υπόλοιπα οχήματα πέραν του ποδηλάτου. Τέλος, το γεγονός ότι μπορεί να μεταφέρει το πολύ δύο άτομα είναι άλλο ένα μειονέκτημα του ΜΔ σε σχέση με άλλα οχήματα που χρησιμοποιούνται στις πόλεις για μεταφορές ανθρώπων και αγαθών.

Ένα από τα σημεία που προκαλεί εντύπωση είναι ότι ενώ η αύξηση στον αριθμό των ΜΔ οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στον τρόπο με τον οποίο αυτά διαφοροποιούνται από τα υπόλοιπα μέσα μετακίνησης, η ανάπτυξη ερευνητικών δραστηριοτήτων γύρω από αυτά δεν συμβαδίζει με τους ίδιους ρυθμούς (Barmounakis et al., 2016a). Οι περισσότερες έρευνες που αφορούν τα ΜΔ ασχολούνται με θέματα οδικής ασφάλειας και βελτίωσης της ευπάθειας των χρηστών, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα κινηματικά χαρακτηριστικά των δικύκλων και τον τρόπο με τον οποίο κινούνται στην κυκλοφορία, και ειδικότερα όσον αφορά τις ιδιαίτερες κινήσεις ή ελιγμούς που εκτελούν. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην έρευνά τους οι Minh et al. (2010) κάνουν μια καταγραφή των αιτιών για τις οποίες τα ΜΔ εκτελούν ελιγμούς και αναφέρουν τις εξής: α) την επιθυμία να βρίσκονται σε πλεονεκτική θέση όταν υπάρχει συμφόρηση (για παράδειγμα αν υπάρχει σηματοδοτούμενος κόμβος), β) την επιθυμία να μη βρίσκονται πίσω από κάποιο βαρύ όχημα λόγω της προτίμησης ενός ευρέος και καθαρού οπτικού πεδίου, γ) για καλύτερη προετοιμασία πριν από στροφή και δ) την προσπάθεια να αποφύγουν ένα εμπόδιο (για παράδειγμα πεζούς). Μία επίσης βασική αιτία που δεν έχει επισημανθεί στην παραπάνω έρευνα είναι η επιθυμία των μοτοσυκλετιστών να κινηθούν γρηγορότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα που κινούνται στην οδό. Αυτό συμβαίνει σε χώρες όπου κατ' εξοχήν υπάρχει συμφόρηση, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ελλάδα, όπου τέτοια φαινόμενα είναι συνήθη, ιδιαίτερα σε οδούς με λίγες λωρίδες κυκλοφορίας.

1.2. Σκοπός

Η συγκεκριμένη διατριβή εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο τα ΜΔ κινούνται σε αστικές οδούς και επικεντρώνεται στο φαινόμενο της προσπέρασης. Σκοπός της διατριβής είναι η διερεύνηση της διαδικασίας λήψης των αποφάσεων των οδηγών κατά την προσπέραση οχημάτων από μηχανοκίνητα δίκυκλα και η αλληλεπίδρασή τους με τα υπόλοιπα οχήματα σε αστική αρτηρία.

Αν και το φαινόμενο της προσπέρασης έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον αρκετών ερευνητών στη σχετική βιβλιογραφία, τις περισσότερες φορές εξετάζονται φαινόμενα προσπεράσεων ΙΧ αυτοκινήτων χωρίς να εξετάζεται ο διαφορετικός τρόπος με τον οποίο προσπερνούν τα διαφορετικά είδη οχημάτων και ιδιαίτερα τα ΜΔ (Farah and Toledo, 2010; Hegeman et al., 2009; Jamson et al., 2012; Vlahogianni, 2013; Vlahogianni and Golias, 2012). Τα ειδικά χαρακτηριστικά των ΜΔ που τα διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα οχήματα (μέγεθος,

ευελιξία, επιτάχυνση κτλ.) τούς επιτρέπουν να εκτελούν πιο συχνά ελιγμούς σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα σε μια οδό για να βρεθούν μπροστά από κάποιο προπορευόμενο όχημα. Έχει λοιπόν ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί η διαδικασία λήψης της απόφασης για προσπέραση και τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά που επικρατούν όταν ο μοτοσυκλετιστής ξεκινάει τον ελιγμό για να προσπεράσει ή όχι το προπορευόμενο όχημα μέσω ανεπτυγμένων τεχνικών μηχανικής μάθησης.

Ιδιαίτερα σε μία εποχή όπου οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των αυτόνομων και των συνδεδεμένων οχημάτων προχωρούν με εξαιρετικά γρήγορους ρυθμούς, το συγκεκριμένο φαινόμενο αποκτά ακόμη μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αν λάβει κανείς υπόψη την αλληλεπίδραση των πολλαπλών τύπων οχημάτων κατά τη διάρκειά του και το πως αυτή μπορεί να επηρεάσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες και την ασφάλεια των χρηστών. Ενώ η επικοινωνία Οχήματος με Όχημα (Vehicle-to-Vehicle - V2V) ή τα συνδεδεμένα οχήματα (Connected Vehicles) είναι στα φλέγοντα ζητήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας και απασχολούν ένα μεγάλο αριθμό ερευνητών και ακαδημαϊκών, η προτυποποίηση της αλληλεπίδρασης των οχημάτων είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, ειδικά όσον αφορά στις διαφορετικές ομάδες χρηστών, π.χ. δίκυκλα και ΙΧ αυτοκίνητα. Λαμβάνοντας κανείς υπόψη ότι σε σχέση με τα αυτόνομα οχήματα, η έρευνα επικεντρώνεται στα ΙΧ, είναι πολύ πιθανό στο εγγύς μέλλον να παρατηρηθεί το φαινόμενο να κυκλοφορούν στο ίδιο κυκλοφοριακό περιβάλλον αυτόνομα οχήματα και ΜΔ που θα κινούνται ανάμεσα στα πρώτα. Ως εκ τούτου, η προτυποποίηση της κίνησής τους υπό το πρίσμα της Θεωρίας Παιγνίων θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη, αφού η τωρινή αλληλεπίδραση μεταξύ οδηγών, θα εξελιχθεί σε αλληλεπίδραση οδηγών και μηχανών.

Κάποια από τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι το πως μπορούν δύο «ανταγωνιστικές» ομάδες χρηστών, χρησιμοποιώντας την ίδια υποδομή και πόρους, να έχουν πιθανώς συνεργατικές συμπεριφορές μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, όπως ο Robert Axelrod αναρωτήθηκε «κάτω υπό ποιες συνθήκες θα αναδειχθεί η συνεργασία σε έναν κόσμο γεμάτο εγωιστές χωρίς κεντρική εξουσία» στο ξεκίνημα του συγγράμματός του (Εικόνα 1) (Axelrod, 1984) στην παρούσα διατριβή εξετάζονται οι τρόποι με τους οποίους η συνεργασία μεταξύ των οδηγών μπορεί να καταλήξει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της προσπέρασης και στη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών.

CHAPTER 1

The Problem of Cooperation

UNDER WHAT CONDITIONS will cooperation emerge in a world of egoists without central authority? This question has intrigued people for a long time. And for good reason. We all know that people are not angels, and that they tend to look after themselves and their own first. Yet we also know that cooperation does occur and that our civilization is based upon it. But, in situations where each individual has an incentive to be selfish, how can cooperation ever develop?

The answer each of us gives to this question has a fundamental effect on how we think and act in our social, political, and economic relations with others. And the answers that others give have a great effect on how ready they will be to cooperate with us.

The most famous answer was given over three hundred

3

Εικόνα 1: Απόσπασμα από το σύγγραμμα "The Evolution of Cooperation" του R.Axelrod (1984) (Axelrod, 1984)

1.3. Διάρθρωση Διδακτορικής Διατριβής

Η δομή της συγκεκριμένης διατριβής απεικονίζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 1. Αρχικά, γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σε θέματα που άπτονται της κυκλοφορίας των ΜΔ και τα έξυπνα συστήματα μεταφορών που συνδέονται με αυτά ενώ στη συνέχεια διατυπώνονται τα ερευνητικά ερωτήματα και εντοπίζονται τα κρίσιμα ζητήματα. Έπειτα γίνεται η ανάλυση της μεθοδολογίας που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή η τεχνική Μηχανικής Μάθησης των Δέντρων Αποφάσεων ως μέθοδος πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς του μοτοσυκλετιστή, οι βασικές αρχές της Θεωρίας Παιγνίων για την προτυποποίηση των αλληλεπιδράσεων που δημιουργούνται και ο ορισμός ενός καινοτόμου κυκλοφοριακού μεγέθους που ορίζεται ως «Άνεση κατά την

Προσπέραση» κάνοντας χρήση Προτύπων Δομικών Εξισώσεων. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος συλλογής δεδομένων μέσω της πρωτοποριακής χρήσης των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων (ΜΕΣ – Unmanned Aerial Systems – UAS) για την καταγραφή της κυκλοφορίας.



Διάγραμμα 1: Διάρθρωση Διδακτορικής Διατριβής

Η δημιουργία μιας αναλυτικής βάσης πραγματικών δεδομένων από τροχιές οχημάτων σε συνδυασμό με τεχνικές μηχανικής μάθησης οδηγεί στη δημιουργία δύο προτύπων πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς του μοτοσυκλετιστή. Το πρώτο αφορά στην πρόβλεψη της επιτυχούς προσπέρασης ή όχι του προπορευόμενου οχήματος ενώ το δεύτερο στην τροχιά την οποία θα ακολουθήσει μέχρι να γίνει τελικώς αυτή η προσπέραση. Έπειτα, με την εισαγωγή Προτύπων Δομικών Εξισώσεων ορίζεται το προαναφερθέν μέγεθος «Άνεση κατά την Προσπέραση» και κάνοντας χρήση της Θεωρίας Παιγνίων προτυποποιείται η αλληλεπίδραση του οδηγού του ΜΔ με την υπόλοιπη κυκλοφορία. Επιπλέον, οι συνθήκες συνεργασίας που ορίζονται στο παίγνιο που έχει διαμορφωθεί διαφοροποιούνται μέσω μίας Ανάλυσης Ευαισθησίας για να γίνει η τελική αξιολόγηση των συνθηκών που επικρατούν κατά τη συνεργασία των οδηγών και το αν αυτή δύναται να οδηγήσει στη βελτίωσή τους.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής γίνεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που εξάγονται από τα πρότυπα που περιγράφονται στις προηγούμενες ενότητες. Ακολουθεί μια περιγραφή της συνεισφοράς της παρούσας διατριβής σχετικά με το πως τα ευρήματά της θα μπορούσαν να αποτελέσουν το υπόβαθρο στο σχεδιασμό Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών με επίκεντρο τα ΜΔ ενώ προτείνονται θέματα τα οποία θα μπορούσαν να απασχολήσουν την ερευνητική κοινότητα σε μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τα θέματα που αφορούν στην έρευνα που έχει διεξαχθεί μέχρι στιγμής στα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems – ITS) για την κυκλοφορία και την οδική ασφάλεια, δίνοντας έμφαση στα ΜΔ και συγκρίνονται με παρόμοια συστήματα για άλλα οχήματα. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση στους τρόπους προτυποποίησης της κυκλοφορίας των ΜΔ και ερευνών που σχετίζονται με αυτά. Τέλος, περιγράφονται τα κύρια ζητήματα που προκύπτουν από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, ενώ δίνονται κάποιες πρώτες κατευθυντήριες γραμμές για τον τρόπο με τον οποίο η έρευνα που σχετίζεται με τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά των ΜΔ θα μπορούσε να ενισχυθεί από τις νέες τεχνολογίες και από νέες προσεγγίσεις στον τρόπο προτυποποίησης της κίνησής τους.

2.1. Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών για την Κυκλοφορία & την Οδική Ασφάλεια

Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών, η έρευνα των ITS έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον ερευνητών και ακαδημαϊκών. Κάποια από τα θέματα που συσσωρεύεται μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον είναι η βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών και η διάδοση αξιόπιστης πληροφορίας στον μετακινούμενο (Cobo et al., 2014). Προς αυτήν την κατεύθυνση, εντοπίζονται στη βιβλιογραφία αρκετές προσπάθειες δημιουργίας προτύπων πρόβλεψης της κυκλοφορίας, πληθοπορικές προσεγγίσεις (Crowdsourcing) και προσεγγίσεις εξόρυξης δεδομένων (Data Mining) (Chen and Cheng, 2010; Faouzi et al., 2011; Vlahogianni et al., 2014a). Παρόλ' αυτά, περιορισμένες έρευνες επικεντρώνονται στα ξεχωριστά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των ΜΔ και στον τρόπο που αυτά μπορούν να επηρεάσουν το σχεδιασμό και τη λειτουργικότητα των ITS (Barnpounakis et al., 2016a).

Ο σχεδιασμός των ITS που σχετίζονται με τα ΜΔ είναι ένα αναδυόμενο θέμα στην ερευνητική κοινότητα των ΜΔ, που αφορά όμως περισσότερο στον τομέα της Οδικής Ασφάλειας (Theofilatos and Yannis, 2016, 2015; Vlahogianni et al., 2012). Όσον αφορά στην κυκλοφορία τους, η ενσωμάτωση των ήδη υπάρχοντων ITS άλλων οχημάτων σε ΜΔ είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία όχι μόνο για τους ακαδημαϊκούς αλλά και για τη βιομηχανία, λόγω των διαφορών ανάμεσα στον τρόπο οδήγησης άλλων οχημάτων και στον τρόπο που οδηγείται ένα ΜΔ (driving vs riding) (Broughton et al., 2009; Crundall et al., 2008). Σε ένα ανομοιογενές κυκλοφοριακό περιβάλλον, οι τροχιές των ΜΔ και η οδηγική συμπεριφορά των αναβατών τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό λόγω του μικρότερου πλάτους τους, ειδικά σε πιο περίπλοκα φαινόμενα, όπως αυτό

της προσπέρασης ή των ελιγμών αλλαγής λωρίδας (Lee et al., 2009; Minh et al., 2009; Vlahogianni, 2014; Vlahogianni et al., 2014b, 2013).

Η σημασία των ITS στο να παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες πραγματικού χρόνου στους χρήστες και/ή στους διαχειριστές της κυκλοφορίας ή των συστημάτων υποβοήθησης της οδήγησης έχει αναφερθεί συστηματικά στη βιβλιογραφία (Vlahogianni et al., 2004). Μολαταύτα, η επίδραση των ΜΔ στην κυκλοφορία - ανεξάρτητα από την σημασία τους ή την ποσόστωσή τους στις αστικές περιοχές - παραβλέπεται στο σχεδιασμό των ITS, τα οποία σε μεγάλο βαθμό είναι προσανατολισμένα στα τετράτροχα οχήματα. Ως εκ τούτου κρίνεται χρήσιμο να γίνει μία ανασκόπηση σε βασικές έρευνες που αφορούν τη μελέτη και εφαρμογή συνεργατικών συστημάτων και συστημάτων υποβοήθησης οδήγησης που έχουν εφαρμοστεί σε άλλα οχήματα αφού θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση για παρόμοια συστήματα για τα ΜΔ.

2.1.1. Συνεργατικά Συστήματα και Ανταλλαγή Πληροφοριών

Ο έλεγχος των αστικών αυτοκινητοδρόμων σε αρκετές πόλεις της Ισπανίας, με συστήματα που βασίζονται στην πληροφόρηση των χρηστών χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους ανά το δίκτυο αλλά και προβληματικές περιοχές, ήταν το κεντρικό αντικείμενο έρευνας στην εργασία των Cuena et al. (1995). Στην εργασία των Adler and Blue (2002) προτείνεται η λύση στα προβλήματα ενός αστικού δικτύου μέσω της συνεργατικής διαπραγμάτευσης μεταξύ πολλαπλών μέσων που συμπεριλαμβάνουν διαχειριστές, υπηρεσίες παροχής υπηρεσιών και οδηγούς εξοπλισμένους με συστήματα καθοδήγησης. Στην εργασία των Tseng et al. (2002) ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα καταγραφής βίντεο σε πραγματικό χρόνο και σταθερές κάμερες με ακρίβεια πάνω από 96% στην μέτρηση οχημάτων, ενώ τα αποτελέσματα για άλλες παραμέτρους δεν υπολογίζονται. Μετρήσεις βασισμένες σε βίντεο χρησιμοποιούνται και στην Boillot et al. (2006) για να αξιολογήσουν ένα αλγόριθμο ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο σε έναν κόμβο, έχοντας βελτιώσεις στην συνολική καθυστέρηση αλλά και στον συνολικό αριθμό στάσεων των οχημάτων.

Μερικά παραδείγματα από εργασίες που αφορούν τη συνεργασία ή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ χρηστών (Agent Based Modeling) μπορούν να βρεθούν στις (Adler et al., 2005; Hernández et al., 2002; Lee et al., 2010; Logi and Ritchie, 2002; Van Katwijk and van Koningsbruggen, 2002). Το αντίκτυπο των Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) στα χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής διερευνώνται στην εργασία των van Arem et al. (2006), με τα αποτελέσματα να δείχνουν βελτιώσεις στη ομαλοποίηση της ροής, στην απόδοση και στην ικανότητα. Επιπλέον, ένα Συνεργατικό Σύστημα Οχήματος-Υποδομής (Cooperative Vehicle

Infrastructure System - CVIS) προτείνεται στην Sun et al. (2014) με σκοπό τη μακροσκοπική βελτίωση της κυκλοφορίας και της πρόληψης της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τόσο μεσοσκοπικό όσο και μικροσκοπικό επίπεδο ανάλυσης για να επιτευχθεί βελτίωση στα μακροσκοπικά κυκλοφοριακά της κυκλοφορίας. Στην H. Liu et al. (2017) οι συγγραφείς αναφέρουν ότι σε ένα συνδεδεμένο περιβάλλον ρυθμίζοντας συγκεκριμένες παραμέτρους σε μικροσκοπικό επίπεδο είναι δυνατόν να βελτιωθούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες, αυξάνοντας τον κυκλοφοριακό φόρτο και μειώνοντας τα σημεία διαμάχων. Στην εργασία των Motro et al. (2016) έγιναν προσομοιώσεις επικοινωνίας οχημάτων σε περιπτώσεις προσπεράσεων με σημαντικά ευρήματα για την απόδοση τέτοιων συστημάτων και τα χαρακτηριστικά των δικτύων που θα πρέπει να σχεδιαστούν ενώ στην εργασία των Talebrou et al. (2015) προτυποποιούνται προσπεράσεις με βάση τη Θεωρία Παιγνίων σε ένα συνδεδεμένο περιβάλλον. Στην εργασία των Prasan and Murugappan (2016) προτείνονται οι βασικές αρχές και πλαίσια που θα πρέπει να βασιστεί ο σχεδιασμός παρόμοιων συστημάτων. Άλλες έρευνες έχουν ως αντικείμενό τους την ανταλλαγή πληροφοριών για την πρόληψη επικίνδυνων καταστάσεων και την αποφυγή συγκρούσεων (Biswas et al., 2006; Gomathi et al., 2014; Liu and Khattak, 2016). Στην εργασία των Jia and Ngoduy (2016) περιγράφεται ένα σύστημα επικοινωνίας οχημάτων και υποδομής για τη σταθεροποίηση της κυκλοφοριακής ροής και την εξομάλυνση των κυκλοφοριακών κυμάτων ενώ στην εργασία των Ntousakis et al. (2017) το φαινόμενο της συγχώνευσης οχημάτων στην κυκλοφορία σε αυτοκινητόδρομο. Ένα άλλο ενδιαφέρον κομμάτι των συνεργατικών συστημάτων είναι το πέρασμα διασταυρώσεων, όπου η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων μπορεί όχι μόνο να έχει πολλαπλά οφέλη στον τομέα της ασφάλειας αλλά και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός κόμβου (Lee and Park, 2012; Li and Wang, 2006).

Η παροχή υψηλού επιπέδου και ακριβούς πληροφορίας σε χρήστες (agents) που συνεργάζονται και/ή διαπραγματεύονται είναι μία από τις βασικές προσεγγίσεις στην εκμετάλλευση των νέων τεχνολογιών για την επίλυση κυκλοφοριακών προβλημάτων. Φαίνεται από τις προαναφερθείσες έρευνες ότι η συνεργασία μεταξύ των χρηστών θα οδηγούσε στην πλειοψηφία των περιπτώσεων στη βελτίωση των κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών. Σε μερικά παραδείγματα, φαίνεται ότι η κατοχή της πληροφορίας δεν είναι αρκετή για τους χρήστες, εκτός κι αν δρουν με ένα συντονισμένο τρόπο ή ακόμη ότι η κατοχή πρόσθετης πληροφορίας μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη χειρότερα αποτελέσματα για την κυκλοφορία, ειδικά αν η πληροφορία δεν είναι χρήσιμη (de Oliveira and Bazzan, 2009).

Με τα πλεονεκτήματα στην τεχνολογία και τις επικοινωνίες, η ανίχνευση της κυκλοφοριακής συμφόρησης μέσω της επικοινωνίας V2V έχει προταθεί σαν μία εναλλακτική της εγκατάστασης

δαπανηρών αισθητήρων υποδομής (Bauza et al., 2010). Άλλοι προτείνουν συστήματα που συνδυάζουν επικοινωνία V2V με σύγχρονα συστήματα GPS για να εκτιμήσουν την πυκνότητα της κυκλοφορίας σε αυτοκινητοδρόμους και αστικό περιβάλλον (Garelli et al., 2011) ή για να συλλέξουν και να μοιράσουν πληροφορίες (Goel et al., 2004). Τα συνεργατικά συστήματα κυκλοφοριακής πληροφορίας που βασίζονται σε αυτοοργανωμένα δίκτυα (ad hoc networks) συνοψίζονται στην εργασία των Seredynski and Bouvry (2011) και παρουσιάζονται δύο διαφορετικές εναλλακτικές όπου στη μία συμμετέχουν υποδομές στο σύστημα ενώ στην άλλη όχι.

2.1.2. Συστήματα Υποβοήθησης Οδηγού για την Ασφάλεια και την Κυκλοφοριακή Συμφόρηση

Εκτός από τις προαναφερθείσες έρευνες, αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει ιδέες και μεθοδολογίες των ITS από μία μικροσκοπική σκοπιά. Οι περισσότερες εξ αυτών στοχεύουν στην υποβοήθηση του οδηγού, όπως συστήματα προσαρμοστικής οδήγησης (Adaptive Driving), συστήματα προειδοποίησης και ασφάλειας, συστήματα αυτόματου ελέγχου κτλ. (Faouzi et al., 2011; Zhang et al., 2011). Η επίδραση ενός Προχωρημένου Συστήματος Υποβοήθησης Οδηγών (Advanced Driver Assistance Systems - ADAS) στην οδηγική συμπεριφορά για τη διατήρηση ασφαλούς ταχύτητας και ασφαλών αποστάσεων ερευνάται στην εργασία των Adell et al. (2011) με τα θετικά στοιχεία να είναι περισσότερα από τα αρνητικά. Στην εργασία του Hegeman (2004) γίνεται η προσέγγιση ενός ADAS σχετικά με την προσπέραση, ενώ σε μια ακόλουθη έρευνα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος προτείνεται μία πρώτη ιδέα για ένα βοηθό προσπέρασης (overtaking assistant) σε αγροτικές περιοχές με σκοπό να μειωθούν τα ατυχήματα (Hegeman et al., 2005).

Σε μια επόμενη έρευνα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης της κυκλοφορίας σε μικροσκοπικό επίπεδο με τη χρήση ενός συστήματος υποβοήθησης για προσπέραση, παρέχοντας σημαντικά ευρήματα που αφορούν θέματα ασφάλειας δίνοντας έμφαση το χρόνο μέχρι την πρόσκρουση (Time To Collision - TTC) με τα επερχόμενα οχήματα (Hegeman et al., 2009). Ένα σύστημα υποβοήθησης οδηγού που δίνει τη δυνατότητα να αναγνωρίζεται η κάθετη σήμανση αναπτύσσεται στις εργασίες των de la Escalera et al. (2003) και Møgelmoose et al. (2014), με τη δεύτερη να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στους Ευρωπαϊκούς απ' ό,τι στους Αμερικάνικους δρόμους. Μία πρώτη ανασκόπηση στα Προχωρημένα Συστήματα Ελέγχου Οχημάτων (Advanced Vehicle Control Systems - AVCS) μπορεί να βρεθεί στην εργασία του Shladover (1995), που συνοψίζει τα σημαντικά κομμάτια της έρευνας σε έλεγχο πλάγιων, οριζόντιων και συνδυασμό των δύο αποστάσεων. Τέλος, αν και υπάρχουν και άλλα συστήματα με προσανατολισμό με σκοπό την υποβοήθηση του οδηγού (συστήματα καθοδήγησης, συστήματα πληροφόρησης του οδηγού en route κτλ.) δεν επηρεάζουν γενικά την οδηγική

συμπεριφορά αλλά μόνο όσον αφορά την επιλογή διαδρομής του. Είναι λοιπόν προφανές ότι η πλειοψηφία των ερευνών που επικεντρώνονται στον οδηγό αφορούν κατά βάση τον τομέα της οδικής ασφάλειας.

Μια διαφορετική προσέγγιση μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Hegeman et al. (2005), όπου οι συγγραφείς θεωρούν αυτοματοποιημένη κυκλοφοριακή ροή χρησιμοποιώντας Έξυπνα Συστήματα Ελέγχου της Πορείας (Intelligent Cruise Control System - ICCS) με σκοπό να ομαλοποιήσουν την κυκλοφοριακή ροή ελέγχοντας τους χωρικούς διαχωρισμούς μεταξύ των οχημάτων. Άλλοι ποσοτικοποίησαν το πως η παρουσία ή όχι ενός υποχρεωτικού ή προαιρετικού Έξυπνου Συστήματος Προσαρμογής Ταχύτητας (Intelligent Speed Adaptation - ISA) επηρεάζει τις αποφάσεις των οδηγών για προσπέραση ή όχι σε αγροτικούς δρόμους (Jamson et al., 2012). Σε άλλη έρευνα φάλαγγες συνεργαζόμενων οχημάτων προτυποποιήθηκαν σαν κομμάτι ενός συνεργατικού οδηγικού συστήματος (Collaborative Driving System - CDS) που έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται ή να αποχωρίζονται από αυτό (Hallé and Chaib-draa, 2005). Όπως είναι φανερό, τα παραπάνω συστήματα ενδέχεται να έχουν ένα σημαντικό αντίκτυπο συνολικά στην κυκλοφορία. Παρόλ' αυτά, τέτοια συστήματα δεν έχουν ακόμη κάποια ιδιαίτερη σύνδεση με τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας και σπάνια αξιολογούνται για τη σχέση τους με τη γενικότερη αποδοτικότητα του οδικού δικτύου.

2.1.3. Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών για Μηχανοκίνητα Δίκυκλα

Παρόλο που υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον στα συνεργατικά συστήματα, ελάχιστες προσεγγίσεις επικεντρώνονται σε συστήματα που στοχεύουν στην αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής αστάθειας που μπορεί να προκληθεί λόγω της ανομοιογενούς κυκλοφορίας και της κυκλοφορίας των ΜΔ. Παράλληλα, οι προσπάθειες για ανάπτυξη ITS αφιερωμένων στα ΜΔ είναι περιορισμένες και περισσότερο αφορούν την οδική ασφάλεια με σκοπό να προστατέψουν τους αναβάτες από λάθη και να μειώσουν την ευπάθειά τους σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς (Bayly et al., 2006; Bishop, 2000; Huang and Preston, 2004).

Ενδεικτικά, στην εργασία των Seiniger et al. (2012) αναφέρεται ότι τα ήδη υπάρχοντα συστήματα, συμπεριλαμβανομένου των Συστημάτων Αντιμπλοκαρίσματος Φρένων (Anti-Lock Back Systems - ABS) και Συστημάτων Ελέγχου Πρόσφυσης (Traction Control Systems - TCS) είναι πολύ μεγάλης σημασίας για την ισορροπία της μοτοσυκλέτας και θα πρέπει να αναπτυχθούν περαιτέρω, ενώ στην εργασία των Rizzi et al., (2009) προτείνεται η υποχρεωτική εγκατάσταση τού συστήματος ABS σε όλες τις νέες μοτοσυκλέτες. Σε άλλες εργασίες εξετάζεται η σκοπιμότητα και τα πιθανά πλεονεκτήματα από ένα αυτόνομο σύστημα πέδησης για μοτοσυκλέτες (G. Savino et

al., 2013; Giovanni Savino et al., 2013; Savino et al., 2014), με τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ασφάλεια για τον αναβάτη σε μια πιθανή εφαρμογή τους συστήματος, ενώ σε άλλη εργασία προτείνεται ένα ενεργό σύστημα ισορροπίας για τη μείωση των φαινομένων πτώσεως του αναβάτη (De Filippi et al., 2014). Στην εργασία των Biral et al. (2010) προτείνεται ένα σύστημα για προειδοποίηση πριν από μία στροφή ώστε ο αναβάτης να μπορέσει καλύτερα να «υπολογίσει» τον τρόπο με τον οποίο θα εισέλθει στην καμπύλη, ένα από τα πιο συχνά λάθη των μοτοσυκλετιστών, ενώ δύο διαφορετικά τέτοια συστήματα συγκρίνονται σε προσομοιωτή στην εργασία των Véronique Huth et al. (2012). Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος για μελλοντική εφαρμογή και έρευνα (Biral et al., 2014). Ένα παρόμοιο σύστημα ειδοποιούσε τον αναβάτη όποτε η μοτοσυκλέτα πλησίαζε με μεγάλη ταχύτητα έναν κόμβο (Biral et al., 2012; V. Huth et al., 2012) ενώ μια πρώτη έρευνα στη διατήρηση της λωρίδας με τη χρήση προσομοίωση εξετάζεται στην εργασία των Katagiri et al. (2009). Στην εργασία των Fang et al. (2014) αναπτύχθηκε ένα πρωτοποριακό σύστημα υποβοήθησης του οδηγού, όπου ένα smartphone τοποθετήθηκε πάνω σε μια μοτοσυκλέτα για να εντοπίζει εμπόδια και την απόσταση μεταξύ της μοτοσυκλέτας και του προπορευόμενου οχήματος. Στην εργασία των Attal et al. (2014) προτείνεται ένα σύστημα εντοπισμού πτώσεων με τη χρήση επιταχυνσιόμετρου και γυροσκοπίου που θα μπορούσε να επιτρέψει το έγκαιρο άνοιγμα ενός αερόσακου. Μια διαφορετική προσέγγιση σε ήδη υπάρχοντα συστήματα αερόσακων προτείνεται στην εργασία των Aikyo et al. (2015) όπου οι συγγραφείς προτείνουν ένα σύστημα αερόσακου με ευεργετικά αποτελέσματα για την ασφάλεια του αναβάτη. Άλλες προσεγγίσεις συμπεριλαμβάνουν διαφορετικές διαμορφώσεις προβολέων για τις μοτοσυκλέτες ώστε η κίνησή τους να είναι πιο εύκολα κατανοητή από τους άλλους οδηγούς (Cavallo et al., 2013; Pinto et al., 2014). Τέλος, έγινε έρευνα αποδοχής σχετικά με τα συστήματα υποβοήθησης από τους αναβάτες με τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν χαμηλά ποσοστά αποδοχής, εκτός κι αν το σύστημα δεν παρεμβαίνει στη διαδικασία της οδήγησης ενώ η ανάγκη για πρόβλεψη της αποδοχής των χρηστών ΜΔ αναφέρεται σαν μεγάλης σημασίας (Beanland et al., 2013), ενώ και στην εργασία των Sundharam et al. (2016) αναφέρεται η ανάγκη για σύνδεση των ΜΔ με το διαδίκτυο για τη διαχείρισή τους.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου συστήματα υποβοήθησης εφαρμόστηκαν ή εξετάστηκαν σε ΜΔ, η έρευνα για τέτοιους είδους συστήματα είναι ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο, λόγω της πολυπλοκότητας της οδήγησης μοτοσυκλέτας, καθώς και των αλληλεπιδράσεων με άλλα οχήματα στο δρόμο. Προφανώς, ακόμη και για την ασφάλεια, τα διαθέσιμα ITS είναι περιορισμένα (Πίνακας 1). Κάποια από αυτά περιλαμβάνουν συστήματα πέδησης ή τζάκετ με

αερόσακο (Espíe and Baldanzini, 2012) ενώ άλλα συστήματα είναι ακόμη σε πολύ πρώιμο ερευνητικό στάδιο.

Πίνακας 1: Σύγκριση Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών για Τετράτροχα και Μηχανοκίνητα Δίκυκλα

Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών	Τετράτροχα	Μηχανοκίνητα Δίκυκλα
Συστήματα Αντιμπλοκαρίσματος Φρένων (ABS)	✓	✓
Adaptive Cruise Control (ACC)	✓	Ερευνητικό Στάδιο
Αερόσακοι	✓	✓
Αυτόνομη Πέδηση	✓	Ερευνητικό Στάδιο
Συνδυαστική Συστήματα Πέδησης (CBS)	✓	✓
Προειδοποίηση Καμπύλων	-	Ερευνητικό Στάδιο
Ηλεκτρονικός Έλεγχος Ισορροπίας	✓	Ερευνητικό Στάδιο
Συστήματα Διατήρησης Λωρίδας	✓	Ερευνητικό Στάδιο
Εντοπισμός Εμποδίων	✓	Ερευνητικό Στάδιο
Σύστημα Πρόσκρουσης	✓	Ερευνητικό Στάδιο
Υπενθύμιση Ζώνης Ασφαλείας/Κράνους	✓	-
Συστήματα Ελέγχου Πρόσφυσης	✓	✓

2.2. Κυκλοφορία Μηχανοκίνητων Δικύκλων

Η κατανόηση τού τρόπου με τον οποίο κινούνται τα ΜΔ εν μέσω της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένων πολύπλοκων φαινομένων που προκύπτουν από ειδικούς ελιγμούς, όπως η προσπέραση, το φιλτράρισμα της κυκλοφορίας, οι απότομες επιβραδύνσεις και επιταχύνσεις, οι ελιγμοί αποφυγής εμποδίων κτλ. είναι το πρώτο βήμα για την εφαρμογή νέων τεχνολογικών ευρημάτων και έξυπνων συστημάτων. Η έρευνα στην κυκλοφορία των ΜΔ αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς. Ο Πίνακας 2 συγκεντρώνει στη συντριπτική τους πλειοψηφία τις ερευνητικές προσπάθειες που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία σε σχέση με την περιοχή μελέτης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, τις παραμέτρους των προτύπων και το επίπεδο ανάλυσης.

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός Πίνακας Βιβλιογραφίας που αφορά στην κυκλοφορία Μηχανοκίνητων Δικύκλων

Συγγραφείς	Χρονολογία	Αντικείμενο Έρευνας	Τύπος Οδού	Οδική	Δεδομένα		Μικρο/Μάκρο	Βασικές Παράμετροι	Ανάλυση	
				Ασφάλεια	Προσομ.	Πραγ.			Προσ.	Στατ.
Umar et al.	1995	Επίδραση της αποκλειστικής λωρίδας των μοτοσυκλετών στην ασφάλειά τους	Υπεραστική	✓		✓	Μάκρο	Ατυχήματα		✓
Oketch	2000	Προτυποποίηση μεικτών	Υπεραστική		✓	✓	Αμφότερα	Καθυστερήσεις & Ουρές	✓	✓

Συγγραφείς	Χρονολογία	Αντικείμενο Έρευνας	Τύπος Οδού	Οδική Ασφάλεια	Δεδομένα		Μικρο/Μάκρο	Βασικές Παράμετροι	Ανάλυση	
					Προσομ.	Πραγ.			Προσ.	Στατ.
		κυκλοφοριακών κυμάτων								
Tiwari	2000	Σχέση μικτής κυκλοφορίας και ασφάλειας	Αστική	✓		✓	Μάκρο	Ροή		✓
Nakatsuji et al.	2001	Επίδραση των ΜΔ σε σηματοδοτούμενους κόμβους	Αστική			✓	Μικρο	Χρονικοί Διαχωρισμοί		✓
Arasan and Kashami	2003	Φάλαγγες μικτής κυκλοφορίας	Αστική		✓	✓	Αμφότερα	Αναλογία Φαλάγγων	✓	
Hsu et al.	2003	Συγκριτική έρευνα ανάπτυξης μοτοσυκλετών σε Ασιατικές χώρες	Αστική	✓		✓	Μάκρο	Διάφορα		✓
Minh and Sano	2003	Επίδραση στον ρυθμό ροής κορεσμού σε σηματοδορούμενους κόμβους	Αστική			✓	Μάκρο	Ροή Κορεσμού		✓
Oketch	2003	Απόδοση προτύπων ετερογενούς κυκλοφορίας	Αστική		✓	✓	Μάκρο	Χωρητικότητα Λωρίδων & Ροή Κορεσμού		✓
Cho and Wu	2004	Προσομοίωση φαινομένων μικτής κυκλοφορίας	Αστική		✓		Μάκρο	Πυκνότητα	✓	
Law and Radin Umar	2005	Αποκλειστικές λωρίδες κίνησης μοτοσυκλετών και φαινόμενα προσπεράσεως	Υπεραστική	✓		✓	Μικρο	Ασφαλείς αποστάσεις		✓
Matsuhashi et al.	2005	Προσομοίωση φαινομένων μικτής κυκλοφορίας	Αστική		✓	✓	Αμφότερα	Διάφορα	✓	✓
Minh et al.	2005a	Αναλύσεις ταχύτητας, ροής και χωρικών διαχωρισμών ΜΔ	Αστική		✓	✓	Μικρο	Διαχωρισμοί και Ταχύτητες		✓
Minh et al.	2005b	Ελιγμοί προσπεράσεως και παράλληλης κίνησης	Αστική		✓	✓	Μικρο	Διαχωρισμοί και Ταχύτητες		✓
Rongviriyapanich and Suppatrakul	2005	Επίδραση μοτοσυκλετών σε σηματοδοτούμενους κόμβους, συμπεριλαμβανομένου υ αποκλειστικού χώρου αναμονής	Αστική			✓	Αμφότερα	Απολυμένος Χρόνος Εκκίνησης		✓
Bonte et al.	2007	Προσομοίωση για εικονικές λωρίδες δικύκλων	Αστική		✓		Μικρο	Διάφορα	✓	
Lee	2007	Προτυποποίηση οδηγικής συμπεριφοράς ΜΔ	Αστική		✓	✓	Μικρο	Διαχωρισμοί	✓	✓
Meng et al.	2007	Προσομοίωση CA για μικτή κυκλοφορία	Αστική		✓		Μάκρο	Ροή	✓	
Crundall et al.	2008	Συμπεριφορές οδηγών αυτοκινήτων προς ΜΔ	Αμφότερες	✓	-	E*	-	-	-	-

Συγγραφείς	Χρονολογία	Αντικείμενο Έρευνας	Τύπος Οδού	Οδική Ασφάλεια	Δεδομένα		Μικρο/Μάκρο	Βασικές Παράμετροι	Ανάλυση	
					Προσομ.	Πραγ.			Προσ.	Στατ.
Broughton et al.	2009	Σύγκριση μεταξύ οδηγών αυτοκινήτων και ΜΔ	Αμφότερες	✓	-	E*	-	-	-	-
Lan et al.	2009	Προσομοίωση CA για μικτή κυκλοφορία	Υπεραστική		✓		Μάκρο	Πυκνότητα & Ροή	✓	
Lee et al.	2009	Προτυποποίηση μεικτών κυκλοφοριακών συνθηκών βάσει αποστάσεων	Αστική			✓	Μίκρο	Απόσταση, Ταχύτητα και Πυκνότητα	✓	✓
Minh et al.	2009	Υπολογισμός καθυστερήσεων σε συνθήκες ετερογενούς κυκλοφορίας	Αστική			✓	Μάκρο	Καθυστερήσεις		✓
Kov and Yai	2010	Επίδραση των μοτοσυκλετών και ελαφτών οχημάτων σε οδούς που κυριαρχούν οι μοτοσυκλέτες	Αστική	✓		✓/E*	Μάκρο	Ταχύτητα και Ατυχήματα		✓
Lan et al.	2010	Προσομοίωση CA για μικτή κυκλοφορία	Αστική		✓		Μάκρο	Βασικά Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής	✓	
Minh et al.	2010	Ελιγμοί μοτοσυκλετών σε ουρές σηματοδοτούμενων κόμβων	Αστική			✓	Μίκρο	Διαχωρισμοί και Ταχύτητες		✓
Lee et al.	2012	Κινηματικά χαρακτηριστικά των μοτοσυκλετών	Αστική			✓	Μίκρο	Διαχωρισμοί		✓
Nikias et al.	2012	Πλάτος εικονικής λωρίδας κατά τη διάρκεια φιλτραρίσματος της κυκλοφορίας	Αστική			✓	Μίκρο	Απόσταση		✓
Mulvihill and Salmon	2013	Φιλτράρισμα λωρίδων σε αστικό περιβάλλον	Αστική	✓		✓	Μάκρο	Συμβάντα φιλτραρίσματος		✓
Nguyen and Hanaoka	2013	Προσπέραση δικύκλων με τη θεώρηση του χώρου ασφαλείας	Αστική			✓	Μίκρο	Διαχωρισμοί		✓
Ambarwati et al.	2014	Πορώδης προτυποποίηση της ροής μικτής κυκλοφορίας	Αστική			✓	Αμφότερα	Μέγεθος πόρου		✓
Bampounakis et al.	2014	Προτυποποίηση ελιγμών μοτοσυκλετών	Αστική			✓	Μίκρο	Διαχωρισμοί και ταχύτητες		✓
Bhavathrathan and Mallikarjuna	2014	Ανασκόπηση μακροσκοπικών προτύπων σε μικτή κυκλοφορία	Αμφότερες		-	-	Μάκρο	Πυκνότητα	-	-
Clabaux et al.	2014	Ρίσκο σύγκρουσης ΜΔ σε σχέση με τις λεωφορειολωρίδες	Αστική	✓		✓	Μάκρο	Ατυχήματα		✓

Συγγραφείς	Χρονολογία	Αντικείμενο Έρευνας	Τύπος Οδού	Οδική Ασφάλεια	Δεδομένα		Μικρο/Μάκρο	Βασικές Παράμετροι	Ανάλυση	
					Προσομ.	Πραγ.			Προσ.	Στατ.
Mallikarjuna and Kuzhiyamkunnath	2014	Επίδραση της κοινής χρήσης λωρίδων από τα ΜΔ	Αστική			✓	Αμφότερα	Πυκνότητα	✓	
Nguyen et al.	2014	Εκτίμηση κυκλοφοριακών διαμέξεων σε κορεσμένες συνθήκες	Αστική		✓	✓	Μικρο	Διαχωρισμοί	✓	
Vlahogianni	2014	Φιλτράρισμα της κυκλοφορίας και προσπεράσεις	Αστική			✓	Μικρο	Διαχωρισμοί και Ταχύτητες		✓
Bampounakis et al.	2015	Προσέγγιση φαινομένου προσπερασής μέσω Θεωρίας Παιγνίων	Αστική			✓	Μικρο	Διαχωρισμοί και Ταχύτητες		✓
Wong and Lee	2015	Επιθετικότητα των οδηγών των ΜΔ σε μικτή κυκλοφορία	Αστική			✓	Μικρο	Διαχωρισμοί και Ταχύτητες		✓
Aupetit et al.	2016	Διερεύνηση επικίνδυνων καταστάσεων που συναντούν νέοι οδηγοί	Αστική	✓		E*	-	-	-	-
Hung et al.	2016	Κατηγοριοποίηση οχημάτων βάσει γωνιών	Αστική			✓	Μάκρο	Γωνίες και Τύποι Οχημάτων	-	-
Lee and Wong	2016	Δημιουργία ουρών δικύκλων	Αστική			✓	Μικρο	Αποστάσεις	✓	✓
Eyssartier et al.	2017	Εξέταση πρόθεσης των οδηγών να παραβιάσουν το όριο ταχύτητας	Υπεραστική	✓		✓/E*	-	-	-	✓

*E = Ερωτηματολόγια

Περιοχή μελέτης: Αστική, Υπεραστική, Αμφότερες

Δεδομένα: Προσομοίωση (Simulation - S), Πραγματικά Δεδομένα (Real Data - R)

Οι Βασικές Παράμετροι αφορούν τις παραμέτρους που επικεντρώνονται οι συγγραφείς στα συμπεράσματα ή είναι βασικές στις αναλύσεις τους

Ανάλυση: Χρήση Προσομοίωσης ή Στατιστικών Εργαλείων για την ανάλυση των δεδομένων

Μικρο/Μάκρο: Το επίπεδο ανάλυσης της εκάστοτε έρευνας.

2.2.1. Τύπος Οδού

Η πλειοψηφία των δημοσιευμένων εργασιών που σχετίζονται με την κυκλοφορία ΜΔ επικεντρώνεται σε αστικό περιβάλλον (Πίνακας 2). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα ΜΔ χρησιμοποιούνται περισσότερο στο αστικό περιβάλλον απ' ότι σε υπεραστικές μετακινήσεις λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες. Επιπλέον, όταν τα ΜΔ χρησιμοποιούνται σε αυτοκινητοδρόμους, ο τρόπος με τον οποίο κινούνται δεν διαφέρει σημαντικά από αυτόν που κινούνται τα ΙΧ ή άλλα μεγαλύτερα οχήματα. Ως εκ τούτου, οι πιο ασυνήθιστοι ελιγμοί εκτελούνται σε αστικό περιβάλλον και συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον των ερευνητών, για παράδειγμα η επίδραση που έχουν οι μοτοσυκλέτες στη χωρητικότητα σηματοδοτούμενων κόμβων (Minh and Sano, 2003).

Μολαταύτα, υπάρχουν έρευνες που ασχολούνται με την κυκλοφορία σε αυτοκινητοδρόμους, όμως είναι περιορισμένες και εστιάζουν σε τοπικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, στις έρευνες των (Law and Radin Umar, 2005; Radin Umar et al., 1995) προτείνεται μια ξεχωριστή λωρίδα για μοτοσυκλετιστές σαν ένας τρόπος να μειωθούν τα ατυχήματα σε έναν αυτοκινητόδρομο στη Μαλαισία. Στην εργασία του (Oketch, 2000) προτείνεται ένα πρότυπο ανομοιογενούς κυκλοφορίας που χρησιμοποιεί δεδομένα για βαθμονόμηση και έλεγχο από έναν αυτοκινητόδρομο στην Κένυα, ενώ στην εργασία των Lan et al. (2009) εξετάζεται η επίδραση των πλευρικών ελιγμών που εκτελούν τα ΜΔ.

2.2.2. Παράμετροι Προτυποποίησης

Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην προτυποποίηση των ΜΔ είναι η ταχύτητα, η επιτάχυνση και ο χωρικός διαχωρισμός από το μπροστινό και/ή τα γειτονικά οχήματα. Κάποιοι ερευνητές εξέτασαν πιο ιδιαίτερα φαινόμενα, ενώ έλαβαν υπόψη τους τη συχνότητα προσπεράσεων και τους χρόνους αντίδρασης (Adell et al., 2011; Hegeman, 2004; Hegeman et al., 2009, 2005). Η πλειοψηφία αυτών των ερευνών προσανατολίζεται στην οδική ασφάλεια, παρόλ' αυτά υπάρχουν παραδείγματα που σκοπεύουν στον έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής μέσω τέτοιων συστημάτων (Darbha and Rajagopal, 1999; Hallé and Chaib-draa, 2005).

Με μια ευρύτερη ματιά στη βιβλιογραφία που επικεντρώνεται στην κυκλοφορία των ΜΔ, τα τρία θεμελιώδη κυκλοφοριακά μεγέθη (Φόρτος, Πυκνότητα και Ταχύτητα) εισέρχονται για να περιγράψουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες στη βελτιστοποίηση συστημάτων. Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πρόβλεψη της κυκλοφορίας (Vlahogianni et al., 2014a), όπως επίσης και σε μακροσκοπικές έρευνες με σκοπό να δείξουν την επίδραση των ΜΔ σε κυκλοφοριακά δίκτυα (Ambarwati et al., 2014; Mallikarjuna and Kuzhiyamkunnath, 2014). Άλλες έρευνες σχετικά με το πως τα ΜΔ επηρεάζουν τους σηματοδοτούμενους κόμβους βασίζονται στις παραμέτρους του απολυμένου χρόνου και στο ρυθμό ροής κορεσμού (Arasan and Kashani, 2003; Minh et al., 2009; Minh and Sano, 2003; Nakatsuji et al., 2001).

Όταν η έρευνα επικεντρώνεται στην μελέτη μικροσκοπικών μεγεθών, οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται μεταβάλλονται ανάλογα με τη φύση του εκάστοτε φαινομένου που διερευνάται. Για παράδειγμα, όταν διερευνώνται φαινόμενα προσπέρασης, η ταχύτητα, η διαφορά ταχυτήτων και ο χωρικός διαχωρισμός είναι οι πιο συχνά εξεταζόμενες παράμετροι. Στην εργασία των (Minh et al., 2005a) εξετάζονται οι ταχύτητες των ΜΔ που εμπλέκονται σε φαινόμενα προσπέρασης, όπως και οι πλάγιες και επιμήκεις αποστάσεις κατά την προσπέραση. Σε μία άλλη έρευνα, οι κινήσεις των

ΜΔ εξετάστηκαν με μία μικρο-μακροσκοπική προσέγγιση που βασίζεται στην ταχύτητα και στους χωρικούς διαχωρισμούς των οχημάτων (Minh et al., 2005b).

Κάποιες προσεγγίσεις επικεντρώνονται στις πλάγιες και στις επιμήκεις αποστάσεις από την υπόλοιπη κυκλοφορία παρά στις ταχύτητες (Lee, 2007; Lee et al., 2012, 2009; Lee and Wong, 2016). Άλλες έρευνες επικεντρώνονται στην ιδέα της απόστασης ασφαλείας (Nguyen et al., 2014; Nguyen and Hanaoka, 2013). Η σχέση μεταξύ του πλάτους της εικονικής λωρίδας που χρησιμοποιούν τα ΜΔ για να «φιλτράρουν» την κυκλοφορία και οι ταχύτητές τους είναι οι δύο βασικές παράμετροι μεταξύ άλλων (Nikias et al., 2012). Στην εργασία των (Barnpounakis et al., 2014) εξετάζονται φαινόμενα προσπέρασης με έμφαση εξίσου σε ταχύτητες και σε χωρικές παραμέτρους, ενώ σε άλλες εργασίες πρόσθετες παράμετροι, όπως ο τύπος του ΜΔ ή του προπορευόμενου οχήματος, λαμβάνονται υπόψη για τη μελέτη παρόμοιων φαινομένων (Barnpounakis et al., 2015; Wong and Lee, 2015). Τέλος, άλλη εργασία επικεντρώνεται σε χωρικές παραμέτρους, ταχύτητες και διαφορές ταχυτήτων μεταξύ των οχημάτων που αλληλοεπιδρούν, για να διερευνηθούν φαινόμενα φιλτραρίσματος και προσπέρασης σε αστικές αρτηρίες (Vlahogianni, 2014).

2.2.3. Μέθοδοι Προτυποποίησης

Μέχρι πρόσφατα, το βασικό μεθοδολογικό εργαλείο για την ανάλυση της κίνησης ΜΔ ήταν η μικροσκοπική προσομοίωση λόγω της έλλειψης λεπτομερών κυκλοφοριακών δεδομένων. Η προτυποποίηση με Κυτταρικά Αυτόματα (Cellular Automata - CA) είναι μία από τις πιο σημαντικές τεχνικές προσομοίωσης που έχουν εφαρμοστεί αφού η διαφορά στο μέγεθος των ΜΔ μπορεί να αναπαρασταθεί εύκολα (Lan et al., 2010; Meng et al., 2007; Oketch, 2000). Τα πρότυπα CA έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και για άλλους τύπους οχημάτων σε μικτή και μη κυκλοφορία (Kokubo et al., 2011; Lo, 2012). Άλλοι ερευνητές δοκίμασαν την προσομοίωση μικτής κυκλοφοριακής ροής (Cho and Wu, 2004; Matsushashi et al., 2005) και άλλοι επέκτειναν την έρευνά τους στην εικονική λωρίδα που δημιουργούν τα ΜΔ (Bonte et al., 2007).

Ανεξάρτητα από τα σημαντικά αποτελέσματα των προαναφερθεισών ερευνών, η συμπεριφορά των μοτοσυκλετιστών δεν μπορεί πλήρως να περιγραφεί, ειδικά σε μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η αλλαγή λωρίδας, η προσπέραση κ.α. (Lee et al., 2009; Vlahogianni, 2014). Μία εναλλακτική της προσομοίωσης αποτέλεσαν τα ερωτηματολόγια, έχοντας όμως ένα ξεκάθαρο προσανατολισμό προς την οδική ασφάλεια (Aupetit et al., 2016; Broughton et al., 2009; Crundall et al., 2008; Eyssartier et al., 2017). Σε μία ανασκόπηση που αφορά το φαινόμενο της κοινής χρήσης λωρίδας, αναφέρεται ότι το συγκεκριμένο θέμα δεν έχει

διερευνηθεί αρκετά και απαιτείται πρόσθετη έρευνα (Sperley and Pietz, 2010), αφού δε βρέθηκε καμία έρευνα που να εξετάζονται τα πλεονεκτήματα για την κυκλοφορία ενώ μονάχα ένας περιορισμένος αριθμός έχει διεξαχθεί με ποσοτικοποιημένα δεδομένα. Άλλοι ερευνητές μελέτησαν μεν το φαινόμενο της κοινής χρήσης λωρίδας, όμως επικεντρώθηκαν στον τομέα της οδικής ασφάλειας παρά σε αυτόν της λειτουργίας της κυκλοφορίας (Mulvihilla et al., 2013).

Η πρόσφατη εξέλιξη στην ανάλυση βίντεο έδωσε τη δυνατότητα στους ερευνητές να συλλέξουν λεπτομερή δεδομένα τροχιών και ως εκ τούτου να διερευνήσουν πιο πολύπλοκα φαινόμενα, όπως η προσπέραση, ένα πολύπλοκο φαινόμενο που έχει εξεταστεί σε μεγαλύτερο βάθος για τα ΙΧ. Για παράδειγμα, στις εργασίες των Minh et al., (2005a, 2005b) οι προσπεράσεις διερευνήθηκαν μέσω της συλλογής δεδομένων από καταγραφές βίντεο. Πραγματικά δεδομένα από βίντεο σε αστικά δίκτυα επίσης χρησιμοποιήθηκαν σε πρότυπα που βασίστηκαν σε πλάγιες και διαμήκεις αποστάσεις ή σε πρότυπα επιλογής διαδρομής (Lee, 2007; Lee et al., 2012, 2009). Η θεώρηση της διατήρησης μιας ασφαλούς απόστασης ορίστηκε στην εργασία των Nguyen et al. (2014) και Nguyen and Hanaoka (2013) για να περιγράψει την προσπέραση των μοτοσυκλετιστών. Στην εργασία των Nikias et al. (2012) προτυποποιήθηκε η εικονική λωρίδα των ΜΔ και διερευνήθηκαν οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το πλάτος της. Τα φαινόμενα προσπέρασης των ΜΔ σε αστικό περιβάλλον διερευνήθηκαν στην εργασία των Barmounakis et al. (2014), με επίκεντρο τις παραμέτρους που λαμβάνει υπόψη ένας μοτοσυκλετιστής όταν αποφασίζει να προσπεράσει ή όχι το προπορευόμενο όχημα, ενώ οι διαφορές στα κινηματικά χαρακτηριστικά των ΜΔ κατά την προσπέραση και το φιλτράρισμα διερευνήθηκαν στην Vlahogianni (2014). Η ανομοιογένεια στη συμπεριφορά των αναβατών των ΜΔ σε μικτή κυκλοφορία σε σχέση με τη νευρικότητά τους διερευνήθηκε στην εργασία των Wong and Lee (2015). Τέλος, μία προσέγγιση με τη θεωρία παιγνίων στα φαινόμενα προσπέρασης των ΜΔ προτείνεται στην εργασία των Barmounakis et al. (2015), με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι η καλύτερη στρατηγική και για τους δύο παίκτες είναι η συνεργατική συμπεριφορά.

2.2.4. Θέματα Δεδομένων & Επίπεδο Ανάλυσης

Ένα τυπικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται όταν διερευνώνται κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά ΜΔ είναι η έλλειψη δεδομένων από τις πραγματικές τροχιές τους. Η πλειοψηφία των ερευνών που προσπαθούν να παρακολουθήσουν σε πραγματικό χρόνο την συμπεριφορά των αναβατών τους και να προτυποποιήσουν τους ελιγμούς τους χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά καταγραφές βίντεο και εξαγωγή τροχιών από αυτά για να μαζέψουν μαζικά μικροσκοπικά κυκλοφοριακά δεδομένα. Οι καταγραφές από την κυκλοφορία με κάμερες παρουσιάζουν ένα

σημαντικό αριθμό πλεονεκτημάτων. Αρχικά, η συλλογή δεδομένων γίνεται χωρίς να υπάρχει επίδραση στη συμπεριφορά του οδηγού. Επιπλέον, το βίντεο μπορεί να επεξεργαστεί ξανά με τον ίδιο ή διαφορετικό τρόπο για πολλαπλά σενάρια, ενώ μπορούν να συλλεχθούν δεδομένα από περισσότερα από ένα όχημα. Από τη βιβλιογραφία συμπεραίνεται ότι στις περισσότερες έρευνες που απαιτείται μικροσκοπικό επίπεδο ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές βίντεο από την κυκλοφορία για να εξαχθούν οι απαραίτητες μεταβλητές των προτύπων. Μόνο σε μία εξ αυτών βρέθηκε ανάλυση μικροσκοπικού επιπέδου χωρίς τη χρήση πραγματικών δεδομένων, αν και η ανάγκη για τη συλλογή και περαιτέρω χρήση τους στην αξιολόγηση του προτύπου αναφέρεται στα συμπεράσματα της έρευνας (Bonte et al., 2007).

Παρόλ' αυτά, σε μακροσκοπικό επίπεδο ανάλυσης, η βιβλιογραφία συχνά βασίζεται σε μεταβλητές που μπορούν να υπολογιστούν με λιγότερο προχωρημένα τεχνολογικά μέσα και μικρότερα σφάλματα από αυτά της μικροσκοπικής ανάλυσης, για παράδειγμα ανιχνευτές επαγωγικού βρόγχου. Σε κάποιες έρευνες χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα παρατηρητές και καταγραφές βίντεο για πρόσθετη πληροφορία (Minh and Sano, 2003; Oketch, 2000). Τέλος, σε άλλες έρευνες τα πραγματικά δεδομένα έρχονται σαν συμπλήρωμα στις μελέτες που βασίζονται στην προσομοίωση, για παράδειγμα για να ελεγχθούν πρότυπα που δημιουργούνται σε περιβάλλον προσομοίωσης (Mallikarjuna and Kuzhiyamkunnath, 2014).

Σε πιο πρόσφατες έρευνες, στοιχεία από την Όραση Υπολογιστών (Computer Vision) χαρακτηρίζονται συχνά σαν ανάγκη για τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων από καταγραφές βίντεο (Buch et al., 2011). Αρκετές προσεγγίσεις όρασης υπολογιστών μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Μία πολύ λεπτομερής ανασκόπηση επί του θέματος μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Sivaraman and Trivedi (2013a). Κάποιες από αυτές περιλαμβάνουν καταγραφές ροής πεζών (Carsten et al., 1998) και εντοπισμό ή παρακολούθηση οχημάτων για τη συλλογή ταχύτητας, φόρτου, πυκνότητας και κατηγοριοποίησης οχημάτων (Coifman et al., 1998; Tseng et al., 2002). Στην εργασία των Hung et al. (2016) αναφέρεται μία πρωτοποριακή μέθοδος αυτόματης κατηγοριοποίησης οχημάτων βάσει γεωμετρικών υπολογισμών.

Η ανάγκη για μαζικά πραγματικά δεδομένα επίσης αναφέρεται στην εργασία των Hallé and Chaib-draa (2005) με σκοπό να γίνουν πιο κατανοητές οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οχημάτων. Σε άλλες έρευνες, οι καταγραφές βίντεο χρησιμοποιούνται για τη χειροκίνητη εξαγωγή κυκλοφοριακών μεγεθών, για παράδειγμα τον απολυμένο χρόνο ή τον τύπο των οχημάτων (Minh and Sano, 2003; Oketch, 2000). Παρόλ' αυτά, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, μπορούσαν να γίνουν πιο λεπτομερείς μετρήσεις και να δημιουργηθούν βάσεις δεδομένων με διάφορες μεταβλητές, όπως ταχύτητες, αποστάσεις και τύπους οχημάτων. Σε μία από αυτές μπορούν να

βρεθούν τροχίες 477 μοτοσυκλετών και 1293 ΙΧ αυτοκινήτων που εξάγονται από καταγραφές βίντεο (Lee, 2007). Στην εργασία των Minh et al. (2010) χρησιμοποιούνται 150 μοτοσυκλέτες για τον υπολογισμό του πλάτους της εικονικής λωρίδας των ΜΔ, ενώ σε μία έρευνα με παρόμοια θεματολογία οι περιπτώσεις αυξάνονται στις 1200 (Nikias et al., 2012). Φαινόμενα προσπέρασης διερευνήθηκαν με μία βάση δεδομένων 850 περιπτώσεων στις εργασίες των Barmounakis et al. (2016b, 2015) ενώ στην εργασία της Vlahogianni (2014) χρησιμοποιήθηκαν 1375 περιπτώσεις προσπεράσεων και φιλτραρίσματος της κυκλοφορίας. Στην εργασία των Nguyen et al. (2014) χρησιμοποιήθηκε ένας συνολικός αριθμός 296 περιπτώσεων για τη μελέτη διενέξεων μεταξύ των οδηγών ενώ στη Wong and Lee (2015) ένας συνολικός αριθμός 818 μοτοσυκλετών και 1660 οχημάτων χρησιμοποιήθηκε για να διερευνηθεί η νευρικότητα των οδηγών.

2.2.5. Επίδραση των ΜΔ σε Περιβάλλον με Διάφορα Μέσα Μεταφοράς

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε ΜΔ αναφέρεται σε χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας, όπως η Μαλαισία, η Ταϊβάν, το Βιετνάμ κτλ. αφού ο αριθμός των ΜΔ σε αυτές τις χώρες έχει αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες σε σχέση με τους άλλους τύπους οχημάτων (Hsu et al., 2003; Lubis, 2009). Αρκετές έρευνες έχουν πρόσφατα υπογραμμίσει την ανάγκη για νέα πρότυπα που θα εξηγούν την ανομοιογενή κυκλοφορία και συμφόρηση σε αστικές περιοχές, αφού το μεγαλύτερο μέρος αυτών έχει βασιστεί σε ομοιογενή κυκλοφορία (Ambarwati et al., 2014; Bhavathrathan and Mallikarjuna, 2012; Mallikarjuna and Kuzhiyamkunnath, 2014).

Η επίδραση των ΜΔ σε περιβάλλον με πολλαπλά μέσα έχει διερευνηθεί στο παρελθόν από διάφορες σκοπιές. Σε επίπεδο κόμβων, σημαντική έρευνα έχει γίνει σε σηματοδοτούμενους κόμβους, που αφορά τον απολυμένο χρόνο, το ρυθμό ροής κορεσμού και χωρικά χαρακτηριστικά (Minh et al., 2009; Minh and Sano, 2003; Nakatsuji et al., 2001) ή την επίδραση ενός χώρου αναμονής μοτοσυκλετών (Rongviriyapanich and Suppattrakul, 2005). Σε μία άλλη έρευνα, θεωρείται μια δυναμική εικονική λωρίδα για να προτυποποιηθεί η δυνατότητα ελιγμών των ΜΔ όταν σχηματίζονται ουρές (Meng et al., 2007).

Σε επίπεδο αρτηρίας ή δικτύου, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο μία αποκλειστική λωρίδα μοτοσυκλετών επηρεάζει την ασφάλεια και τη ροή (Law and Radin Umar, 2005; Radin Umar et al., 1995). Μία έρευνα που αφορά στα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά μιας περιοχής που κατακλύζεται από ΜΔ έδειξε ότι αν και η μέση ταχύτητα δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις μοτοσυκλέτες, δεν ισχύει το ίδιο με τα ελαφρά οχήματα (Kon and Yai, 2010). Μια μεθοδολογία για να εντοπιστούν οι επικρατούσες οδηγικές πράξεις σε κρίσιμα περιστατικά προτείνεται στην εργασία των Vlahogianni et al. (2012). Στην εργασία της Vlahogianni (2014) εξετάζονται οι παράγοντες που

επηρεάζουν τις αλληλεπιδράσεις των ΜΔ με το υπόλοιπο της κυκλοφορίας σε καταστάσεις προσπέρασης ή φιλτραρίσματος. Στην εργασία των Clabaux et al. (2014) εξετάζεται το αποτέλεσμα από την είσοδο των μοτοσυκλετών στις λεωφορειολωρίδες με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι υπάρχει αυξημένο ρίσκο για ατύχημα για τους μοτοσυκλετιστές που εισέρχονται σε αυτές.

2.3. Κρίσιμα Ζητήματα

2.3.1. Ζητήματα Δεδομένων και Ακρίβεια

Αν και οι αναλύσεις βίντεο δίνουν τη δυνατότητα για δημιουργία μιας λεπτομερούς βάσης δεδομένων με διάφορες μεταβλητές, υπάρχουν συγκεκριμένα μειονεκτήματα που ίσως περιορίζουν τις δυνατότητες μιας έρευνας. Αρχικά, χρησιμοποιώντας μια σταθερή κάμερα επιτρέπεται η καταγραφή μονάχα ενός συγκεκριμένου μέρους της οδικής αρτηρίας. Ως εκ τούτου, πιο περίπλοκα φαινόμενα δεν μπορούν πλήρως να περιγραφούν ούτε είναι δυνατή η καταγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς των οδηγών στον απαιτούμενο βαθμό.

Επιπροσθέτως, η συλλογή οπτική πληροφορίας για μεγάλα δίκτυα μπορεί να είναι μία επίπονη διαδικασία. Η εγκατάσταση καμερών ανά το δίκτυο για να παρακολουθείται η συγκοινωνιακή υποδομή αποτελεί μία πετυχημένη πρακτική για χρόνια. Παρόλ' αυτά, μπορούν να προκύψουν τεχνικά ζητήματα, όπως για παράδειγμα μεγάλες εκτάσεις που απαιτούν υπερβολικά μεγάλο αριθμό καμερών. Επιπλέον, η εγκατάσταση σταθερών καμερών και συμπληρωματικού εξοπλισμού μπορούν μερικές φορές να αποδειχτεί ιδιαίτερα μεγάλου κόστους, ειδικά όταν μία περιοχή από ένα διάστημα και μετά δε χρειάζεται ιδιαίτερη παρακολούθηση. Ακόμη κι αν κάποιος αφαιρέσει τον παράγοντα του κόστους, το πρόβλημα της απόκτησης οπτικής πληροφορίας και συλλογής δεδομένων οξύνεται ειδικά σε ακραίες περιπτώσεις. Ένα ακραίο γεγονός μπορεί να λάβει χώρα οποιαδήποτε στιγμή και σε οποιοδήποτε μέρος. Η ανταπόκριση σε τέτοια γεγονότα θα έπρεπε να είναι άμεση για να μειωθούν οι επιπτώσεις στο κυκλοφοριακό σύστημα. Ως εκ τούτου, ακόμη και από τη σκοπιά της αντιμετώπισης συμβάντων, ένας αριθμός σταθερών καμερών δεν μπορεί πάντα να αποτελέσει μια αξιόπιστη λύση που θα μεταφέρει την απαραίτητη πληροφορία/εικόνα.

Επιπλέον, η ακρίβεια των δεδομένων είναι ένα θέμα που μπορεί να απασχολήσει τον ερευνητή. Αρκετά από τα προβλήματα που συναντώνται κατά την καταγραφή με βίντεο, αντιμετωπίζονται στην εργασία του Lee (2007) με τη χρήση μιας μοντέρνας τεχνικής για την εξαγωγή δεδομένων. Ένα από αυτά που θα έπρεπε να σημειωθεί είναι το σφάλμα που προκύπτει από την γωνία λήψης. Για να μειωθούν τέτοια σφάλματα, η βιντεοκάμερα θα πρέπει να τοποθετείται

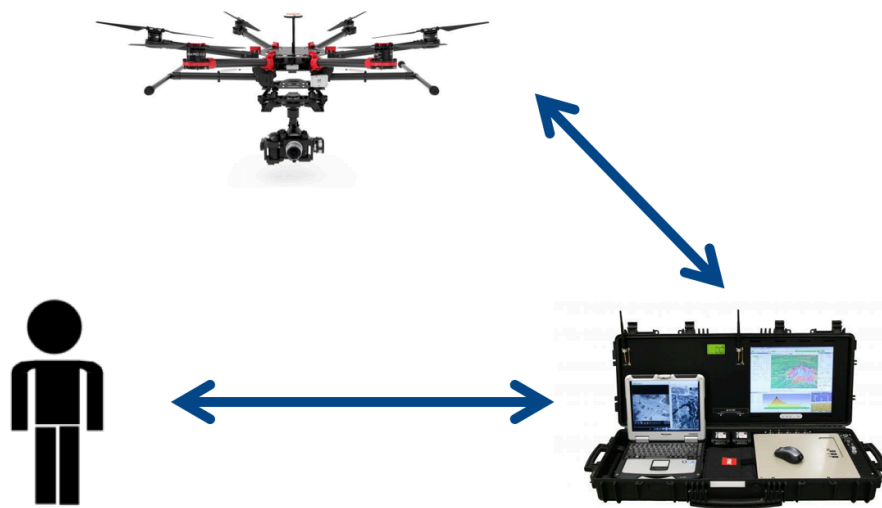
σε όσο ψηλότερο σημείο γίνεται (για παράδειγμα μια πεζογέφυρα) και προφανώς δεν μπορούν όλες οι αστικές περιοχές να ικανοποιήσουν τη συγκεκριμένη απαίτηση. Κρυφά σημεία, σκιές οχημάτων κ.α. μπορούν επίσης να μειώσουν την ακρίβεια αφού μπορεί να μην είναι ορατές οι άκρες ορισμένων οχημάτων ή να παρερμηνευτεί η πραγματική τους θέση. Είναι λοιπόν προφανές ότι λόγω του άναρχου τρόπου με τον οποίο κινούνται τα ΜΔ στην κυκλοφορία, των κοντινών προσπερασμάτων και των μη συμβατικών ελιγμών που εκτελούν, απαιτούνται όχι μονάχα μαζικά πραγματικά δεδομένα, αλλά και να ξεπεραστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα για τη συλλογή υψηλής ακρίβειας δεδομένα με αλληλεπιδράσεις με άλλα οχήματα.

2.3.2. Νέες Τεχνολογίες στη Συλλογή Δεδομένων

Μέχρι τώρα, ένας από τους πιο συνήθεις τρόπους παρακολούθησης της κυκλοφορίας και μετάδοσης ζωντανής (ή μη) εικόνας σε επιχειρησιακά κέντρα ή κέντρα λήψης αποφάσεων ήταν τα Επανδρωμένα Αεροσκάφη (ΕΑ, Manned Aerial Vehicles ή MAV), συνήθως ελικόπτερα της αστυνομίας ή άλλων φορέων που μπορούσαν να ανταπεξέλθουν σε ακραία συμβάντα. Εκτός από το γεγονός ότι τα επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν ένα υψηλό επιχειρησιακό κόστος εκτός από αγοράς και συντήρησης, υπάρχουν περιπτώσεις που η αποστολή ανθρώπων ή ακριβού εξοπλισμού πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος δεν είναι πάντα δυνατή λόγω υψηλού ρίσκου.

Προκειμένου να ξεπεραστούν όλοι οι περιορισμοί που αναφέρονται στις προηγούμενες ενότητες, ένας αριθμός πρόσφατων ερευνών έχουν προτείνει τη χρήση Μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων (ΜΕΣ - Unmanned Aerial Systems - UAS), για την καταγραφή βίντεο από ψηλό σημείο, όχι μόνο για τη μελέτη κίνησης των ΜΔ αλλά και για γενικότερες έρευνες που αφορούν την κυκλοφορία οχημάτων.

Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά και ο όρος του Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΜΕΑ – Unmanned Aerial Vehicle – UAV) ή όπως έχουν γίνει πρόσφατα ευρέως γνωστά ως drones. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η διαφορά μεταξύ του UAV και του UAS έγκειται στο γεγονός ότι το UAS αποτελείται από ένα ή περισσότερα UAV, το χειριστή τους (πιλότος εδάφους) και το σύστημα επικοινωνίας μεταξύ των δύο (Εικόνα 2). Ως εκ τούτου, αν και οι δύο όροι χρησιμοποιούνται ευρέως, το UAV αποτελεί μέρος ενός UAS.



Εικόνα 2: Τα συστατικά μέρη ενός Μη Επανδρωμένου Εναέριου Συστήματος (Unmanned Aerial System)

Αυτή η τεχνολογία προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα για επαγγελματικούς και ερευνητικούς σκοπούς (Πίνακας 3). Ένα από τα πιο σημαντικά είναι ότι τα UAVs έχουν την δυνατότητα να συλλέγουν δεδομένα χωρίς να επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών και χωρίς οπτική επαφή λόγω του μικρού τους μεγέθους. Επιπλέον, ενώ έχουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος από ένα επανδρωμένο αεροσκάφος, μπορούν να καλύψουν μία τεράστια περιοχή σε μικρούς χρόνους λόγω της πρόσφατης ανάπτυξης στα υλικά τους και στα μηχανικά τους μέρη. Τέλος, το συγκριτικά μικρό μέγεθός τους δίνει τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων από μέρη που στο παρελθόν ήταν απροσπέλαστα. Στις εργασίες των Coifman et al. (2004) και Kanistras et al. (2014) αναφέρονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης των UAS για την καταγραφή της κυκλοφορίας.

Πίνακας 3: Συγκριτική αξιολόγηση των τριών μέσων καταγραφής ως προς τις απαιτήσεις ανά κατηγορία

	Σταθερές Κάμερες	ΕΑ	ΜΕΑ
Μήκος Καταγραφής	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Ασφάλεια/Ιδιωτικότητα	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή
Κόστος Απόκτησης και Συντήρησης	Χαμηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Πολλαπλές χρήσεις	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Κατανάλωση Ενέργειας	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή
Ανάπτυξη/Τοποθέτηση	Χαμηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Επιχειρησιακός χρόνος	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Χρήση υπό δυσμενείς συνθήκες	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή
Ρίσκο	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια
Αντοχή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Μεταεπεξεργασία Βίντεο	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή

	Σταθερές Κάμερες	ΕΑ	ΜΕΑ
Μετάδοση δεδομένων, επικοινωνία και αποθήκευση	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Δεξιότητες χρήσης	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια
Ανάγκη εκπαίδευσης	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια
Περιπλοκότητα	Μέτρια	Υψηλή	Μέτρια

Η προοπτική χρήσης των UAS σαν μέρος της υποδομής των έξυπνων συστημάτων μεταφορών έχει εξεταστεί σε προηγούμενες έρευνες. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται συνοπτικά οι έρευνες που έχουν γίνει μέχρι στιγμής με έμφαση στην παρακολούθηση και τη διαχείριση της κυκλοφορίας (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας βιβλιογραφίας στη χρήση εναέριων μέσων καταγραφής της κυκλοφορίας

Συγγραφέας	Έτος	Τύπος Α/Φ	Σκοπός της εργασίας	Κεντρικά Σημεία
<i>Doherty et al.</i>	2000	UAV	Αναγνώριση, εντοπισμός και παρακολούθηση οχημάτων (WITAS Project)	Ένα πλήρες σχέδιο για χρήση UAVs σε κυκλοφοριακές εφαρμογές
<i>Granlund et al.</i>	2000	UAV	Αναγνώριση, εντοπισμός και παρακολούθηση οχημάτων (WITAS Project)	Θέματα Όρασης Υπολογιστών
<i>Mirchandani et al.</i>	2002	MAV	Εξαγωγή κινηματικών χαρακτηριστικών όπως πυκνότητα, χρόνοι ταξιδιού, αριθμός στρεφουσών κινήσεων κτλ.	Αναγνώριση δυνατοτήτων των UAVs για παρακολούθηση και διαχείριση κυκλοφορίας
<i>Shastri and Schowengerdt</i>	2002	MAV	Σταθεροποίηση βίντεο και εντοπισμός οχημάτων	Συνδυασμών GIS και βίντεο από αέρα
<i>Frew et al.</i>	2004	UAV	Παρακολούθηση της οδού (UC Berkeley)	Θέματα ακρίβειας λόγω υψομέτρου
<i>Srinivasan et al.</i>	2004	-	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs για παρακολούθηση κυκλοφορίας (Florida DOT)	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs
<i>Farradyne</i>	2005	-	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs σαν μέρος της υποδομής των ITS	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs
<i>Kaaniche et al.</i>	2005	UAV	Παρακολούθηση της οδού και εντοπισμός κινούμενων αντικειμένων	Αποτελεσματικός, γρήγορος και πραγματικού χρόνου αλγόριθμος
<i>Coifman et al.</i>	2006	UAV	Εξαγωγή παραμέτρων όπως Επίπεδο Εξυπηρέτησης, ΕΜΗΚ, μητρώα προέλευσης προορισμού κ.α.	Δυνατότητες των βίντεο από αέρα για εφαρμογές κυκλοφορίας
<i>Lin et al.</i>	2006	-	Γενική ιδέα και πρώτη προσέγγιση για μετατροπή δεδομένων πραγματικού χρόνου σε κυκλοφοριακή πληροφορία	Δυνατότητες των βίντεο από αέρα για εφαρμογές κυκλοφορίας

<i>Reinartz et al.</i>	2006	MAV	Αυτόματος εντοπισμός οχημάτων και υπολογισμός ταχυτήτων	Δυνατότητες των βίντεο από αέρα για εφαρμογές κυκλοφορίας
<i>Heintz et al.</i>	2007	UAV	Αναγνώριση, εντοπισμός και παρακολούθηση οχημάτων (WITAS Project)	Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο
<i>Puri et al.</i>	2007	UAV	Χρήση δεδομένων πραγματικού χρόνου σαν είσοδος σε Πρότυπα προσομοίωσης	Δυνατότητες σμήνους UAVs για την κυκλοφορία
<i>Ro et al.</i>	2007	UAV	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs σαν μέρος της υποδομής των ITS.	Επόμενα ερευνητικά βήματα
<i>Yu Min Chen and Oh</i>	2007	UAV	Έλεγχος ποιότητας σύνδεσης με ένα DOT (Michigan DOT) Αυτοματοποιημένος τρόπος παρακολούθησης της	Ασφάλεια και θέματα συνδεσιμότητας
<i>Lenhart et al.</i>	2008	-	κυκλοφορίας με εντοπισμό οχημάτων	Χρήση σειριακών εικόνων
<i>Li</i>	2008	UAV	Εντοπισμός οχημάτων για υπολογισμός κυκλοφοριακού φόρτου και κατηγοριοποίηση οχημάτων	Αποτελεσματικός ασαφής (fuzzy) αλγόριθμος
<i>McCormack and Trepanier</i>	2008	UAV	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs για παρακολούθηση της κυκλοφορίας	Έρευνα σκοπιμότητας χρήσης των UAVs
<i>Cheng et al.</i>	2009	UAV	Εντοπισμός και παρακολούθηση οχημάτων σε βίντεο από πραγματικό χρόνο	Αποτελεσματικός αλγόριθμος εντοπισμού
<i>Braut et al.</i>	2012	UAV	Υπολογισμός μητρώων Προέλευσης Προορισμού σε σύνθετες διασταυρώσεις	Αναγνώριση θεμάτων βίντεο για εντοπισμό οχημάτων
<i>Liu et al.</i>	2013	UAV	Πρότυπο βελτιστοποίησης επιλογής διαδρομής για UAV	Εντοπισμός θεμάτων για χρήση των UAV ως μέσο συλλογής κυκλοφοριακής πληροφορίας
<i>Salvo et al.</i>	2013	UAV	Μέτρηση κενού αποδοχής	Απόδειξη της αξιοπιστίας των UAVs
<i>Zhang et al.</i>	2013	UAV	Αναγνώριση συμβάντων, όπως για παράδειγμα ακινητοποιημένα οχήματα, ή οχήματα που κινούνται σε λάθος κατεύθυνση	Υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό συμβάντων
<i>Gao et al.</i>	2014	UAV	Αυτόματος εντοπισμός τροχιών οχημάτων και υπολογισμός ταχυτήτων και επιταχύνσεων	Υψηλή ακρίβεια στον αυτόματο εντοπισμό οχημάτων
<i>Kanistras et al.</i>	2014	-	Ανασκόπηση σε εφαρμογές UAVs για παρακολούθηση κυκλοφορίας	Δυνατότητες των UAV και πλεονεκτήματα για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας
<i>Lima et al.</i>	2014	MAV	Αυτόματος εντοπισμός οχημάτων	Υψηλή ακρίβεια στην εξαγωγή τροχιών
<i>Salvo et al.</i>	2014a	UAV	Σύγκριση μακροσκοπικών προτύπων κάνοντας χρήση βίντεο από UAVs	Πλεονεκτήματα των UAVs στην παρακολούθηση της κυκλοφορίας
<i>Salvo et al.</i>	2014b	UAV	Σύγκριση ταχυτήτων μεταξύ GPS και UAVs	Υψηλή ακρίβεια και ελάχιστος αριθμός σημείων για βαθμονόμηση
<i>Wang et al.</i>	2014	UAV	Συλλογή δεδομένων από τροχιές οχημάτων	Επιρροή του υψομέτρου στην ακρίβεια

<i>Xin et al.</i>	2014	UAV	Σύγκριση ταχυτήτων μεταξύ επίγειων ραντάρ και UAVs	Λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας εντοπισμού και υπολογισμού ταχύτητας
<i>Zhang et al.</i>	2014	UAV	Αναγνώριση ορίων δρόμου	Υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό ορίων της οδού
<i>Gheisari et al.</i>	2015	-	Προτάσεις για χρήση UAVs σαν υποδομή των ITS	Συνεντεύξεις με προσωπικό από DOT
<i>Lee et al.</i>	2015	UAV	Παρακολούθηση κυκλοφοριακών συμβάντων	Επιρροή της ποιότητας των βίντεο στην αποτελεσματικότητα των UAV
<i>Liu et al.</i>	2015	UAV	Εντοπισμός σταματημένων οχημάτων	Πειράματα και προσομοιώσεις πτήσεων
<i>Wang et al.</i>	2015	UAV	Εντοπισμός και παρακολούθηση οχημάτων	Υψηλή ακρίβεια στον αυτόματο εντοπισμό οχημάτων και στην παρακολούθησή τους
<i>Bampounakis et al.</i>	2016	UAV	Εξαγωγή κινηματικών παραμέτρων όπως ταχύτητα, επιταχύνσεις και τροχιές	Υψηλή ακρίβεια και ανάλυση βήμα-προς-βήμα
<i>Erdelj and Natalizio</i>	2016	-	Ανασκόπηση βασικών εφαρμογών διαχείρισης καταστροφών	Λεπτομερής ανασκόπηση των εφαρμογών που χρησιμοποιούν UAV και ανοιχτά θέματα προς επίλυση

Μία από τις πρώτες έρευνες που επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη ενός πλήρως αυτόνομου UAV ήταν το WITAS Project (Doherty et al., 2000; Granlund et al., 2000; Heintz et al., 2007). Σκοπός του συγκεκριμένου έργου ήταν να σχεδιαστεί ένα UAV το οποίο θα μπορεί να πλοηγείται σε διαφορετικά ύψη και να φέρνει εις πέρας εργασίες όπως ο εντοπισμός και η παρακολούθηση συγκεκριμένων οχημάτων. Το ενδεχόμενο της συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων από εναέρια βίντεο εξετάζεται στην εργασία των Mirchandani et al. (2002) ενώ σε μία διαφορετική έρευνα ήταν δυνατή η εξαγωγή αρκετά σημαντικών μεγεθών όπως η πυκνότητα, χρόνοι ταξιδιού, μετρήσεις στροφών, μήκος ουρών κ.α. Στην Shastri and Schowengerdt (2002), οι συγγραφείς περιγράφουν μία μέθοδο για ταυτόχρονη σταθεροποίηση του βίντεο και τον εντοπισμό οχημάτων ενώ και στην Srinivasan et al. (2004) εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης των UAV για παρακολούθηση της κυκλοφορίας. Επιπλέον, έγιναν δοκιμές προσομοίωσης στοχεύοντας κυρίως σε θέματα μεταφοράς δεδομένων, συνδεσιμότητας, ποιότητας βίντεο και σήματος. Στην εργασία Frew et al. (2004) οι Frew et al. εφάρμοσαν οπτικές τεχνικές ώστε το UAV να ακολουθεί το μήκος μιας οδού με περισσότερο από 90% επιτυχία σε εικόνες από πραγματικές οδούς. Στην εργασία του PB Farradyne (2005) αναφέρεται μια διαφορετική έρευνα όπου τα UAV συμπεριλαμβάνονται ως μέρος της υποδομής Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών και αν και δεν έγιναν κάποιες δοκιμές ή πτήσεις, αναφέρονται σημαντικά συμπεράσματα και προτάσεις σχετικά με την προοπτική χρήσης των UAS και την ανάγκη για περισσότερη ανάπτυξη στον τομέα της εναέριας παρακολούθησης της κυκλοφορίας. Στην εργασία των Yu Min Chen and Oh (2007) αν και αναφέρονται θέματα ασφαλείας, έλαβαν χώρα πειράματα για να εξεταστεί η ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ ενός UAV

και τερματικών της Υπηρεσίας Μεταφορών του Μίσιγκαν των ΗΠΑ. Τέλος, και στις εργασίες των Ro et al. (2007) και McCormack and Trepanier (2008) αναφέρονται τα σημαντικά οφέλη που μπορούν να επέλθουν τη χρήση των UAS για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας.

Με την ανάπτυξη των υλικών και της τεχνολογίας στον τομέα των UAV, έγιναν και άλλες σχετικές έρευνες, που είχαν όμως ως επίκεντρο την εξαγωγή μικροσκοπικών χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας και τη μελέτη πιο ειδικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα την εξαγωγή τροχιών. Στην εργασία των Kaaniche et al. (2005) περιγράφεται ένα σύστημα όρασης όπου το UAV μπορεί να ακολουθήσει ένα συγκεκριμένο οδικό τμήμα και να εντοπίσει κινούμενα οχήματα ενώ στην εργασία των Reinartz et al. (2006), οι συγγραφείς κατάφεραν ακρίβεια έως και 3km/h στον υπολογισμό ταχυτήτων από εναέριες κάμερας και αυτόματο εντοπισμό οχημάτων. Αν και στη συγκεκριμένη έρευνα δεν συμπεριλήφθηκε κάποιο UAV, αναφέρεται η σημασία των εναέριων λήψεων για την ανάλυση της κυκλοφοριακής ροής και της χρήσης των εξαγόμενων δεδομένων ως είσοδο σε κυκλοφοριακά πρότυπα και πρότυπα προσομοίωσης. Στην εργασία των Coifman et al. (2006) κάνοντας χρήση δεδομένων από UAV που πετούσε σε αστικό περιβάλλον ήταν δυνατός ο καθορισμός της Στάθμης Εξυπηρέτησης (Level Of Service), η εκτίμηση της Ετήσιας Μέσης Ημερήσιας Κυκλοφορίας (EMHK), μέτρηση κυκλοφοριακών συνθηκών στους κόμβους και η δημιουργία μητρώων προέλευσης προορισμού. Κάποια προκαταρκτικά αποτελέσματα σχετικά με την μετατροπή βίντεο σε κυκλοφοριακά δεδομένα παρήχθησαν στην εργασία των Lin et al. (2006), ενώ στην εργασία των Puri et al. (2007) πληροφορία που συλλέχθηκε σε πραγματικό χρόνο από οπτικά μέσα χρησιμοποιήθηκε σαν είσοδος για τη βελτίωση προτύπων προσομοίωσης. Στη συγκεκριμένη έρευνα επίσης οι συγγραφείς καταλήγουν ότι με τη χρήση πολλαπλών UAV είναι δυνατή η εξαγωγή σημαντικής πληροφορίας ειδικά όσον αφορά τη μελέτη κόμβων και διασταυρώσεων. Πιο πρόσφατες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην επεξεργασία των εναέριων βίντεο κάνοντας χρήση προχωρημένων οπτικών τεχνικών και μεθόδων μηχανικής μάθησης για την εξαγωγή κυκλοφοριακής πληροφορίας. Στην εργασία του Li (2008) περιγράφεται μια προσέγγιση με χρήση κατάτμησης εικόνας για την ανίχνευση οχημάτων, μια πληροφορία που θα μπορούσε να βρει εφαρμογή για τον υπολογισμό του κυκλοφοριακού φόρτου και στην ταξινόμηση οχημάτων. Στην εργασία των Lenhart et al. (2008) δοκιμάζεται ένας αυτόματος τρόπος παρακολούθησης της κυκλοφορίας με υψηλά ποσοστά στον εντοπισμό οχημάτων ενώ στην εργασία των Cheng et al. (2009) χρησιμοποιείται ένα UAV με σταθερά πτερύγια για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση οχημάτων με επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο.

Με τον ερχομό της τρέχουσας δεκαετίας, λόγω της ιδιαίτερης βελτίωσης των τεχνικών χαρακτηριστικών των UAV και την «επιθετική» είσοδό τους στον τομέα της καταγραφής βίντεο, η

έρευνα που αφορά την εξαγωγή κυκλοφοριακής πληροφορίας από τα UAV αυξήθηκε σημαντικά. Στην εργασία των Zhang et al. (2013) χρησιμοποιήθηκε ένα UAV με σκοπό τον εντοπισμό συγκεκριμένων συμβάντων, όπως για παράδειγμα σταματημένα οχήματα ή οχήματα που κινούνται ανάποδα σε οδούς με ποσοστό επιτυχίας 96.4% και 100% αντίστοιχα. Ένα παρόμοιο σύστημα περιγράφεται στην εργασία των Lima et al. (2014) για αυτόματο εντοπισμό οχημάτων, και αν και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο UAV, οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η χρήση τους θα βελτίωνε σημαντικά την ακρίβεια και την ανιχνευσιμότητα των αλγορίθμων. Στην εργασία των Salvo et al. (2013) συλλέχθηκαν δεδομένα από UAV με σκοπό να διερευνηθεί η αποδοχή του κενού για την προσπέραση ενώ στην εργασία των Salvo et al. (2014a) οι συγγραφείς έκαναν χρήση ιδίων δεδομένων για τη σύγκριση μακροσκοπικών προτύπων κυκλοφορίας. Στην εργασία των Salvo et al. (2014b) έγινε σύγκριση μεταξύ δεδομένων ταχύτητας που συλλέχθηκαν μέσω GPS και βίντεο από UAV, με τα αποτελέσματα να δείχνουν μικρές διαφορές μεταξύ των δύο μετρήσεων. Μία παρόμοια έρευνα είχε ποσοστά ακρίβειας πάνω από 90% με τη χρήση επίγειων ραντάρ (Xin et al., 2014). Στην εργασία των Gao et al. (2014) χρησιμοποιήθηκε ένα χαμηλού κόστους τετρακόπτερο για τον αυτόματο εντοπισμό τροχιών οχημάτων ενώ παράλληλα εξήχθησαν ταχύτητες και επιταχύνσεις οχημάτων. Στην εργασία των Wang et al. (2014) προτείνεται ένα σύστημα χαμηλού κόστους για τη συλλογή δεδομένων από τροχιές οχημάτων με ακρίβεια 10 cm. Στην εργασία των Zhang et al. (2014) χρησιμοποιήθηκε ένα UAV με σκοπό τον εντοπισμό των ορίων μιας οδού κάνοντας χρήση πολλαπλών αισθητήρων. Στην εργασία των Gheisari et al. (2015) περιγράφονται αρκετές χρήσεις των UAV στην διαχείριση της κυκλοφορίας όπως προέκυψαν έπειτα από συνεντεύξεις με στελέχη της Υπηρεσίας Μεταφορών της Τζόρτζια των ΗΠΑ. Τέλος, στην εργασία του (Barnrounakis et al. (2016c) περιγράφεται μία μέθοδος για την εξαγωγή τροχιών από κινούμενα αντικείμενα με το μέγιστο σφάλμα στην εκτίμηση της ταχύτητας να μην ξεπερνάει το 1km/h.

Εκτός όμως από την εξαγωγή κυκλοφοριακής πληροφορίας, η σχετική βιβλιογραφία εξετάζει θέματα τηλεπικοινωνιών, ακρίβειας δεδομένων και θέματα που αφορούν την επεξεργασία του εναέριου βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Στην εργασία των Braut et al. (2012) δημιουργούνται μητρώα προσέλευσης προορισμού, ενώ οι συγγραφείς δίνουν έμφαση στην ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη στη διαδικασία της σταθεροποίησης βίντεο για καλύτερη ακρίβεια και την αντιστοίχιση οχημάτων σε διαφορετικά καρέ του βίντεο. Στην έρευνα των Liu et al. (2013) περιγράφεται ένα πρότυπο βελτιστοποίησης που στοχεύει στον προγραμματισμό διαδρομών των UAV με σκοπό την παρακολούθηση συγκεκριμένων οδικών τμημάτων. Παρόλ' αυτά, αν και αλγόριθμοι παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά επιτυχίας, η σταθεροποίηση του βίντεο αναφέρεται ξανά από τους συγγραφείς

σαν ένα βασικό θέμα που θα πρέπει να επιλυθεί σε μελλοντικές έρευνες. Στην εργασία των Lee et al. (2015) χρησιμοποιήθηκαν συμβατικά 4G δίκτυα τηλεπικοινωνιών για την μετάδοση του εναέριου βίντεο σε ένα επίγειο σταθμό, ενώ -και εδώ- αναφέρεται η ανάγκη για βελτίωση των αλγορίθμων σταθεροποίησης του βίντεο. Στην εργασία των Liu et al. (2015) εξετάστηκε ένα πείραμα προσομοίωσης και εντοπισμού ακινητοποιημένων οχημάτων κατά μήκος οδών χαμηλού φόρτου. Στη συγκεκριμένη έρευνα αναγνωρίζονται κάποιοι περιορισμοί στη χρήση των UAS, όπως για παράδειγμα οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες και η σταθεροποίηση του βίντεο. Στην εργασία των L. Wang et al. (2015) περιγράφεται μια μέθοδος για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση οχημάτων με τα πειράματα να δείχνουν ένα ποσοστό σφάλματος χαμηλότερο από 3.9% στον εντοπισμό και 2.1% στην παρακολούθηση.

Όπως είναι φανερό, αν και προσπάθειες συλλογής δεδομένων με βίντεο από UAVs έχουν γίνει στο παρελθόν, η χρήση τους για κυκλοφοριακές έρευνες είναι ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο. Παρόλο που έχουν τρομερές δυνατότητες σαν μέρος της υποδομής των ITS, υπάρχουν ακόμη κάποια τεχνικά θέματα που πρέπει να επιλυθούν (διάρκεια μπαταρίας, καιρικές συνθήκες κ.α.) όπως και θέματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας που είναι ιδιαιτέρως σημαντικά. Θέματα που αφορούν την ιδιωτικότητα αφορούν συνήθως ευαίσθητα προσωπικά δεδομένα από πολίτες που έχουν καταγραφεί ή από καταγραφή ευαίσθητων περιοχών. Παρόλ' αυτά, θέματα ασφάλειας δικτύων επίσης μπορούν να απασχολήσουν τη δημόσια ασφάλεια και τις δημόσιες λειτουργίες, αφού η ασύρματη μεταφορά δεδομένων θα μπορούσε να προκαλέσει ανησυχίες για σχετικές επιθέσεις ή άλλες παράνομες πράξεις Sbeiti et al. (2016). Όσον αφορά πτήσεις πάνω από μη προσπελάσιμα μέρη, υπάρχουν προτάσεις για χρήσεις εκπαιδευμένων αρπακτικών πουλιών που θα «επιτίθενται» σε UAV (IEEE Spectrum, 2016).

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που απασχολεί το νομικό πλαίσιο γύρω από τις πτήσεις των UAS είναι οι πτήσεις πάνω από ανθρώπους, περιουσιακά στοιχεία και μέρη που δεν επιτρέπεται η προσπέλασή τους. Κάποιος θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι η υπάρχουσα τεχνολογία προσφέρει μία πληθώρα εναλλακτικών προστατευτικών μέτρων, όπως για παράδειγμα μηχανισμούς αλεξίπτωτων που ανοίγουν αυτόματα όταν εντοπίσουν ότι έχουν αστοχήσει κάποια συστήματα ή συστήματα που χρησιμοποιούν αυτόματη πλοήγηση για την επιστροφή πίσω στη βάση του UAS. Παρόλ' αυτά, δεν είναι όλα τα UAS εξοπλισμένα με τέτοια συστήματα, ενώ και η αξιοπιστία τους είναι ακόμη υπό αμφισβήτηση. Επιπλέον, από τη στιγμή που πολλά από τα μικρά UAVs είναι ευαίσθητα στις καιρικές συνθήκες, που μπορούν πολλές φορές να αλλάξουν ραγδαία, θα πρέπει να καταστεί σαφές για τους χειριστές τους πότε μία πτήση μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό ασφαλής συνθήκες και πότε όχι. Επίσης, άλλα ερωτήματα που θα πρέπει να απασχολήσουν είναι

το τι θα συνέβαινε αν UAVs πετούσαν κοντά σε αεροδρόμια ή αεροδιαδρόμους, θέτοντας σε άμεσο κίνδυνο τα επανδρωμένα αεροσκάφη ή ποιο θα πρέπει να είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος πτήσης τους ώστε να μην παρενοχλούν άλλα αεροσκάφη. Για παράδειγμα, ενώ η ασφάλεια είναι πρωταρχικός παράγοντας, θα πρέπει κάποιος να λάβει υπόψη ότι η ανάλυση στις εικόνες που λαμβάνονται από τα UAS είναι υψηλότερη όταν αυτό πετάει σε χαμηλότερα ύψη. Για όλα τα παραπάνω, και η Federal Aviation Agency (FAA) (Federal Aviation Administration, 2016) αλλά και η European Aviation Safety Agency (EASA) (European Aviation Safety Agency, 2016) έχουν δημοσιεύσει κανονισμούς που αφορούν την πολιτική δραστηριότητα των UAS όπου τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα θέματα αντιμετωπίζονται και ορίζονται συγκεκριμένα όρια και διαδικασίες. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, από τη στιγμή που οι συγκεκριμένοι κανονισμοί είναι ακόμη πολύ καινούριοι και δεν έχουν εφαρμοστεί πλήρως, μόνο μέσω την εφαρμογή τους θα είναι δυνατή η εμφάνιση πιθανών ασαφών ή αδύναμων κομματιών.

Τέλος, αν και κάποια υπάρχοντα UAS μπορούν να εκτελέσουν αυτόνομες πτήσεις, οι ισχύοντες κανονισμοί απαιτούν από τον χειριστή του (ή κάποιον τρίτο παρατηρητή) να διατηρεί πάντα οπτική επαφή. Σε ένα αστικό περιβάλλον παρόλ' αυτά όπου υπάρχουν ψηλά κτήρια τις περισσότερες φορές, αυτό μπορεί να περιπλέξει τις συνθήκες πτήσης των UAVs και ως εκ τούτου την αποτελεσματικότητά τους. Ομοίως, αν ένα σμήνος από UAVs παρακολουθεί μια συγκεκριμένη περιοχή, οι διάδρομοι πτήσης που ακολουθούν θα πρέπει να είναι σαφώς ορισμένα, αποφεύγοντας ψηλές υποδομές και άλλα εμπόδια που μπορούν να είναι παρόν. Στην εργασία των Mccarley and Wickens (2004) συζητούνται κάποιοι επιπλέον ανθρώπινοι παράγοντες σχετικά με τα UAS ενώ κατηγοριοποιούνται στις παρακάτω θεματικές ενότητες:

- Ενδείξεις και Χειρισμοί
- Αυτοματισμοί και Αστοχίες Συστήματος
- Σύνθεση πληρώματος, Συντονισμός, Επιλογή και Εκπαίδευση

2.3.3. Διαδικασία Προσπέρασης Μηχανοκίνητων Δικύκλων

Όπως διατυπώθηκε, ο τρόπος με τον οποίο κινούνται τα υπόλοιπα οχήματα στην οδό σε σχέση με τα δίκυκλα διαφέρει σημαντικά. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους ως προς το μέγεθος σε σχέση με τα άλλα οχήματα αλλά και ο τρόπος με τον οποίο ισορροπεί ένα δίκυκλο στους δυο τροχούς, μεταβάλλουν όχι μόνο τα κινηματικά χαρακτηριστικά των οχημάτων αλλά και τη διαδικασία λήψης των εκάστοτε αποφάσεων κατά την οδήγηση. Είναι λοιπόν πιθανό τα πρότυπα που έχουν ήδη δημιουργηθεί για άλλες κατηγορίες οχημάτων να μην μπορούν να περιγράψουν

πλήρως τον τρόπο με τον οποίο κινείται ένα δίκυκλο, ιδιαίτερα στις ετερογενείς συνθήκες που ισχύουν στο αστικό περιβάλλον.

Για παράδειγμα, στην εργασία των Wilson and Best (1982) η διαδικασία της προσπέρασης για τα αυτοκίνητα χωρίζεται σε 5 φάσεις: α) στην απόφαση του οδηγού να προσπεράσει ή όχι, β) στην προετοιμασία για προσπέραση, γ) στη διαδικασία αλλαγή λωρίδας, δ) στην προσπέραση και ε) στην επιστροφή στην προηγούμενη λωρίδα. Η διαφοροποίηση όμως του τρόπου με τον οποίο κινούνται τα δίκυκλα διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη διαδικασία αφού λόγω του μικρότερου πλάτους που έχουν, η διαδικασία αλλαγή λωρίδας μπορεί να επιτευχθεί με έναν πιο άμεσο εγκάρσιο ελιγμό, που εκτελείται γρηγορότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα. Άλλες φορές, το μικρότερο πλάτος τους δεν απαιτεί τη διαδικασία αλλαγής λωρίδας για την εκτέλεση του ελιγμού, αφού τα δύο οχήματα μπορούν να κινούνται παράλληλα σε μία λωρίδα. Ομοίως με προηγούμενως, όπου κάθε έξυπνο σύστημα σχεδιασμένο για τα ΙΧ αυτοκίνητα δεν μπορεί να βρει άμεση εφαρμογή στα δίκυκλα, κάθε φαινόμενο που προτυποποιείται για αυτά θα πρέπει να εξετάζεται από διαφορετική οπτική σκοπιά για την καλύτερη αποτύπωση και κατανόησή του. Στις εργασίες των Barmounakis et al. (2017, 2016b) η απόφαση για προσπέραση εξετάζεται αποκλειστικά τη στιγμή που ο μοτοσυκλετιστής ξεκινάει τη διαδικασία του ελιγμού, αφού ο τρόπος με τον οποίο προσπερνούν τα δίκυκλα διαφοροποιείται σημαντικά λόγω του μικρότερου μεγέθους τους.

Ως εκ τούτου, το φαινόμενο της προσπέρασης των ΜΔ θα πρέπει να εξεταστεί με διαφορετικό τρόπο ώστε να είναι δυνατή η καλύτερη αποτύπωση της διαδικασίας λήψης της απόφασης του μοτοσυκλετιστή για προσπέραση ή όχι.

2.4. Σύνοψη

Τα κρίσιμα ζητήματα που αναλύθηκαν οδηγούν στον εντοπισμό ενός αριθμού ερευνητικών κενών που υπάρχουν στο συγκεκριμένο γνωστικό θέμα και απαιτούν διερεύνηση. Συγκεκριμένα, η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε:

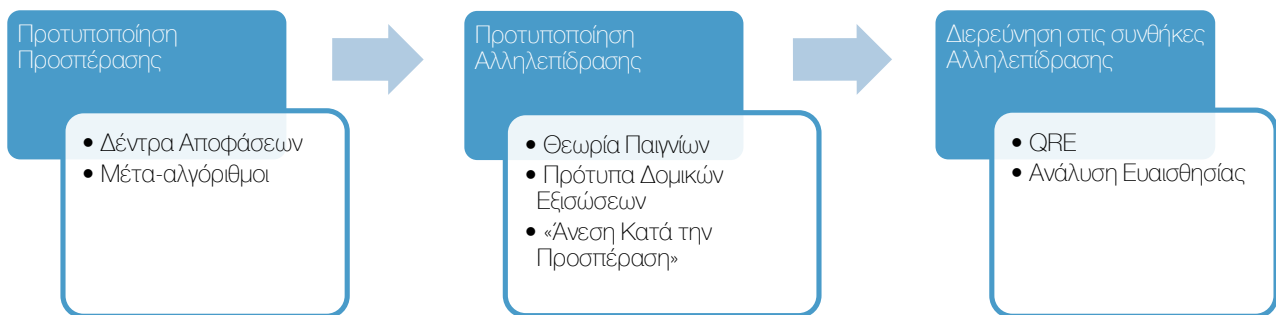
- Τη σημασία της συλλογής πραγματικών δεδομένων από την κυκλοφορία στη μελέτη και κατανόηση κυκλοφοριακών φαινομένων που αφορούν τα ΜΔ. Η αύξηση της κυκλοφορίας των ΜΔ σε Ευρωπαϊκά και μη αστικά κέντρα αποτελεί γεγονός που μπορεί να επηρεάσει μακροσκοπικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Την ανάγκη της συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων με τη χρήση UAS για την καλύτερη αποτύπωση του φαινομένου της προσπέρασης.

- Την ανάγκη για μία διαφορετική προσέγγιση στο φαινόμενο της προσπέρασης των μοτοσυκλετιστών σε σχέση με τον τρόπο που το έχουν προσεγγίσει έως τώρα έρευνες για τα υπόλοιπα οχήματα.
- Την ανάγκη σύνδεσης των Έξυπνων Συστημάτων Μεταφοράς και των ΜΔ σε τομείς πέραν της οδικής ασφάλειας, με έμφαση στη συνεργασία ΜΔ και υπόλοιπων οχημάτων.
- Την πρόκληση για αναγνώριση και εφαρμογή συνθηκών συνεργασίας σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον όπως αυτό των αστικών οδών.

3. Μεθοδολογία

3.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο βάσει του οποίου θα αντιμετωπιστούν τα κρίσιμα ζητήματα που διατυπώθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, με τη ροή που φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα 2. Αρχικά, γίνεται η περιγραφή της δυναμικής διαδικασίας λήψης της απόφασης του μοτοσυκλετιστή για προσπέραση μέσω του ορισμού δύο διαφορετικών φάσεων. Έπειτα, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των Δέντρων Αποφάσεων, της τεχνικής Μηχανικής Μάθησης που επιλέχθηκε ώστε να προτυποποιηθεί η διαδικασία απόφαση του μοτοσυκλετιστή για προσπέραση. Στη συνέχεια αντιμετωπίζεται η πρόκληση να αναγνωριστούν οι συνθήκες συνεργασίας υπό τη Θεωρία Παιγνίων (Game Theory). Η συγκεκριμένη θεωρία προσφέρει σημαντικά εφόδια για την προτυποποίηση της αλληλεπίδρασης των οχημάτων ως στρατηγικές και ως εκ τούτου αναλύονται οι βασικές έννοιες (Ισορροπία Nash, βέλτιστες στρατηγικές κ.α.) και οι φιλοσοφικές παραδοχές της (ορθολογικότητα, μορφή παιγνίων κτλ.). Έπειτα, περιγράφονται τα Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων ως το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό του μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση» ενώ τέλος, γίνεται διερεύνηση στις συνθήκες συνεργασίας των δύο παικτών μέσα από την ανάλυση της θεωρίας του Quantal Response Equilibrium (QRE) και της ανάλυσης ευαισθησίας των συνθηκών συνεργασίας.

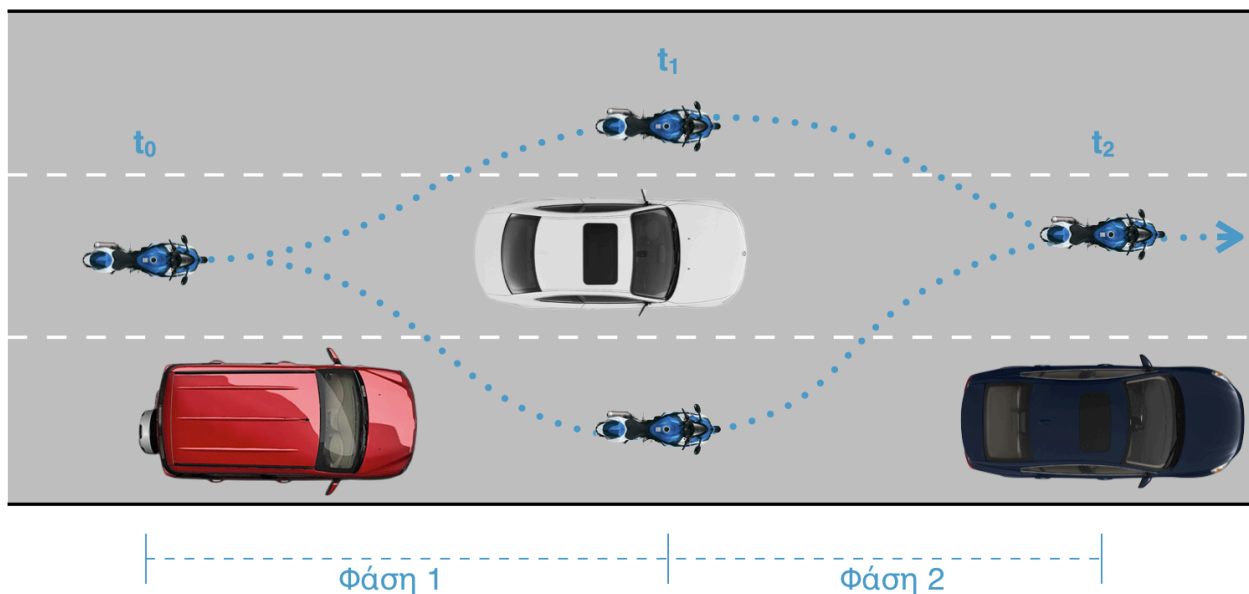


Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής Μεθοδολογικής Προσέγγισης

3.2. Δυναμική Διαδικασία Λήψης Απόφασης κατά την Προσπέραση

Στην παρούσα διατριβή γίνεται μία δυναμική αποτύπωση του φαινομένου της προσπέρασης όπως απεικονίζεται γραφικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3). Συγκεκριμένα, ο ελιγμός που εκτελεί ο μοτοσυκλετιστής ορίζεται σε δύο (2) φάσεις, μεταξύ τριών (3) χρονικών στιγμών t_0 , t_1 και t_2 . Ως t_0 ορίζεται η στιγμή που ο μοτοσυκλετιστής αποφασίζει να προσπεράσει το προπορεύον όχημα, ως t_1 ορίζεται η στιγμή που ο μοτοσυκλετιστής βρίσκεται παράλληλα του οχήματος που προσπερνάται και αποφασίζει να ολοκληρώσει την προσπέραση και ως t_2 ορίζεται το τέλος της προσπέρασης,

δηλαδή όταν ο μοτοσυκλετιστής έχει αποκτήσει μια απόσταση ασφαλείας από το όχημα που προσπέρασε.

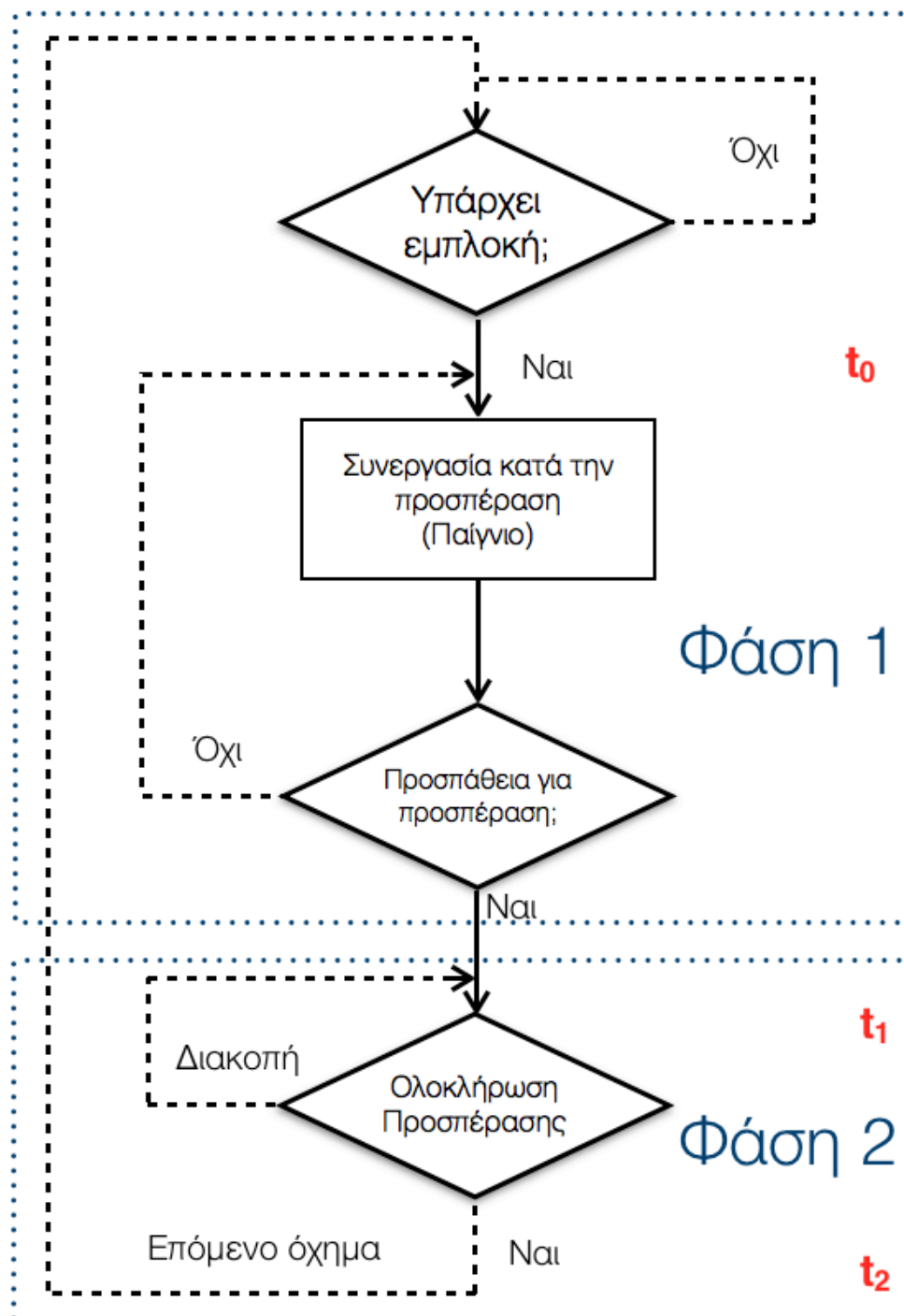


Εικόνα 3: Οι τρεις (3) διαφορετικές χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές της προσπέρασης

Ο σαφής εντοπισμός της χρονικής στιγμής t_0 βασίζεται στην ανάλυση των χρονοσειρών της εγκάρσιας και διαμήκουσ επιτάχυνσης του μοτοσυκλετιστή. Συγκεκριμένα, το t_0 ορίζεται ως η στιγμή που η εγκάρσια επιτάχυνση του μοτοσυκλετιστή παρουσιάζει τοπικό μέγιστο και η διαμήκουσ επιτάχυνση παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο, αφού θεωρείται ότι ο οδηγός του ΜΔ ξεκινάει την προσπέραση τη στιγμή που έχει λάβει την επιθυμητή θέση στο οδόστρωμα σε σχέση με το όχημα που προσπερνάει, πριν ξεκινήσει την επιτάχυνση ή διατηρήσει την ταχύτητά του για να προσπεράσει.

Η παραπάνω δυναμική θεώρηση αντανakλάται σε μια δυναμική θεώρηση λήψης αποφάσεων κατά την προσπέραση (Εικόνα 4). Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ο μοτοσυκλετιστής, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του οχήματός του, καθώς κινείται σε μια αστική οδό με διάφορα άλλα οχήματα εξετάζει ανά τακτά χρονικά διαστήματα την περίπτωση να βρίσκεται σε μία «εμπλοκή» με κάποιο άλλο όχημα. Για παράδειγμα, μιας και τα ΜΔ είναι μία από τις πιο ευπαθείς ομάδες μετακινουμένων, ο οδηγός τους εξετάζει να τηρούνται ικανοποιητικές αποστάσεις ασφαλείας ή να μην κινείται κοντά σε βαρέα οχήματα. Οποιαδήποτε κατάσταση θα έκανε τον οδηγό του ΜΔ να μεταβάλλει τη θέση του στην οδό, τα κινηματικά χαρακτηριστικά του, να εκτελέσει κάποιον ελιγμό κ.ο.κ. χαρακτηρίζεται ως «εμπλοκή». Αν δεν υπάρχει κάποια εμπλοκή, τότε ο οδηγός του ΜΔ συνεχίζει να οδηγεί με τον ίδιο τρόπο μέχρι να επανεξετάσει την κατάσταση. Εφόσον υπάρξει εμπλοκή που απαιτεί προσπέραση, τότε η διαδικασία λήψης της απόφασης ξεκινάει τη στιγμή t_0 . Ταυτόχρονα, οι δύο οδηγοί των οχημάτων συμμετέχουν σε μία κατάσταση αλληλεπίδρασης όπου αποφασίζουν για το αν θα συνεργαστούν ή όχι κατά τη διάρκεια του

φαινομένου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανεξαρτήτως το αν συνεργάζεται ο κάθε οδηγός, η τελική απόφαση για προσπέραση λαμβάνεται από τον μοτοσυκλετιστή που οδηγεί στη λήξη της συγκεκριμένης εμπλοκής.



Εικόνα 4: Δυναμική Διάσταση της Αλληλεπίδρασης των ΜΔ με τα υπόλοιπα οχήματα

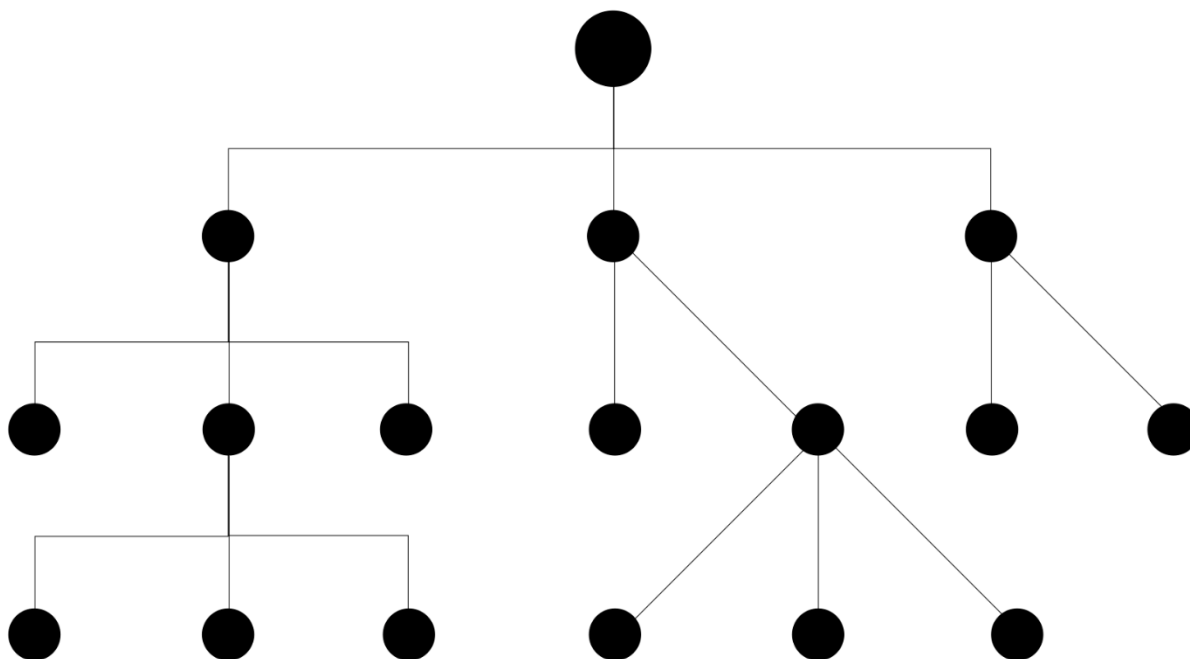
Η προτυποποίηση της παραπάνω διαδικασίας προϋποθέτει την ύπαρξη δύο διαφορετικών προτύπων. Το πρώτο θα περιγράφει την απόφαση του μοτοσυκλετιστή για προσπέραση ή όχι, ενώ το δεύτερο θα περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο οδηγών. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω καταλήγει στη δημιουργία μιας συνολικής περιγραφής του φαινομένου της

προσπέρασης, όπου εκτός την έκβαση της προσπέρασης, περιγράφεται και ο τρόπος με τον οποίο εκείνη εκτελείται.

Πρακτικά, με την προσέγγιση αυτή εκτός από το αν ολοκληρώθηκε ή όχι μια προσπέραση διερευνάται και η «ποιότητά» της, δηλαδή το αν τα οχήματα συνεργάστηκαν μεταξύ τους διευκολύνοντας την ολοκλήρωσή της με ασφάλεια. Η «ποιότητα» της προσπέρασης δεν μπορεί να περιγραφεί εύκολα. Ο τρόπος με τον οποίο ο κάθε οδηγός αντιλαμβάνεται τον τρόπο με τον οποίο κινείται ο ίδιος και οι υπόλοιποι οδηγοί περιλαμβάνει υποκειμενικούς παράγοντες που είναι δύσκολο να περιγραφούν, ενώ στη βιβλιογραφία δεν παρουσιάζεται σαφής προσδιορισμός τους. Ως εκ τούτου, λόγω και της απουσίας ποιοτικών χαρακτηρισμών της κάθε προσπάθειας προσπέρασης, που θα μπορούσαν να προκύψουν από συνεντεύξεις με οδηγούς οχημάτων και μοτοσυκλετιστών, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα σαφώς ορισμένο και ποσοτικοποιημένο μέγεθος που θα την περιγράφει. Όπως διατυπώνεται και σε επόμενη παράγραφο (3.5. Η «Άνεση Κατά την Προσπέραση» ως μέγεθος Απολαβής) κάνοντας χρήση μετρήσιμων μεγεθών ορίζεται ένα νέο μέγεθος που ονομάζεται «Άνεση κατά την Προσπέραση» για να ποσοτικοποιηθεί η ποιότητά της.

3.3. Πρόβλεψη Οδηγικής Συμπεριφοράς μέσω Δέντρων Αποφάσεων

Όταν υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών που συσχετίζονται μεταξύ τους και μπορεί να αλληλεπιδρούν με ιδιαίτερα πολύπλοκους τρόπους, τότε η δημιουργία αποκλειστικά μίας γραμμικής σχέσης μπορεί να αποδειχτεί μία ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία με ανεπαρκή επεξηγηματική δύναμη (Rokach and Maimon, 2014). Λόγω της περιπλοκότητας του φαινομένου της προσπέρασης και της εισαγωγής στο πρότυπο πολλαπλών παραγόντων που το επηρεάζουν, επιλέγεται η χρήση των Δέντρων Αποφάσεων (ΔΑ – Decision Trees) ως μία μέθοδο εξόρυξης δεδομένων (Data Mining Approach) (βλ. Α.2 Δέντρα Αποφάσεων & Μέτα-αλγόριθμοι). Η ονομασία της μεθόδου προκύπτει από τον τρόπο που μπορεί να αναπαρασταθεί το πρότυπο ΔΑ, μέσω της δενδρικής μορφής (Εικόνα 5). Όπως και η γραμμική παλινδρόμηση, τα ΔΑ είναι στατιστικά πρότυπα σχεδιασμένα για επιβλεπόμενη μάθηση (Supervised Learning) και αποτελούν μία από τις βασικές κατηγορίες μηχανικής μάθησης (Machine Learning). Το πρότυπο που σχεδιάζεται χρησιμοποιείται μετέπειτα για το χαρακτηρισμό νέων παραδειγμάτων και περιπτώσεων.



Εικόνα 5: Παράδειγμα αναπαράστασης δενδρικής μορφής

Ένα άλλο πλεονέκτημα της δενδρικής μορφής είναι ότι οι μεταβλητές που εισάγονται στο πρότυπο αναδεικνύουν τη σημασία τους στη διαδικασία λήψης της απόφασης ανάλογα με το επίπεδο που παρατίθενται. Για παράδειγμα, μία μεταβλητή που παρουσιάζεται στους πρώτους κόμβους απόφασης είναι πιο σημαντική από μία άλλη που παρουσιάζεται στους τελικούς κόμβους (Rokach and Maimon, 2014). Ως εκ τούτου, η δενδρική μορφή είναι ένας βολικός τρόπος αναπαράστασης της κλιμακωτής απόφασης που λαμβάνει ο μοτοσυκλετιστής, σε αντίθεση με ένα πρότυπο παλινδρόμησης, που ενώ μπορεί κάποιος να ξεχωρίσει τις σημαντικές μεταβλητές, δεν μπορεί πάντα να αναπαρασταθεί η κλιμακούμενη απόφαση.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα για να γίνει κατανοητό το παραπάνω, είναι η σημασία στη διαφορά ταχύτητας των δύο οχημάτων. Από προηγούμενες έρευνες έχει προκύψει ως ο πιο σημαντικός παράγοντας για την ολοκλήρωση ή όχι μιας προσπάθειας προσπέρασης αφού όταν η διαφορά ταχύτητας των δύο οχημάτων είναι μεγαλύτερη από 15 km/h τότε σπάνια δεν ολοκληρώνεται μια προσπέραση (Barnrounakis et al., 2016b). Ένα πρότυπο παλινδρόμησης αναλόγως τις τιμές των επιμέρους συντελεστών και άλλων συγκεκριμένων μεταβλητών θα μπορούσε να οδηγήσει σε λάθος πρόβλεψη παρά τη σημασία αυτού του παράγοντα, για παράδειγμα αν οι χωρικοί διαχωρισμοί δεν ήταν επαρκής για το ασφαλές πέρασμα.

3.4. Συνεργασία κατά την Προσπέραση

Σε προηγούμενες έρευνες η συνεργασία μεταξύ οχημάτων που πλησιάζουν σε έναν κόμβο ταυτίζεται με την κατάσταση που δεν λαμβάνει χώρα κάποιο ατύχημα ή κάποια σύγκρουση (Li and Wang, 2006; Sengupta et al., 2007; Xue Yang et al., 2004). Σε μια διαφορετική έρευνα, ο ορισμός της συνεργασία βασίζεται αποκλειστικά σε χωρικούς παράγοντες (van Arem et al., 2006). Σε μία προηγούμενη έρευνα με θέμα τους ελιγμούς αλλαγής λωρίδας, η συνεργασία ορίζεται ως την οδήγηση όπου δεν προκύπτουν «κρίσιμες καταστάσεις» ή όταν η αποδοτικότητα του ελιγμού μεγιστοποιείται σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου ή τη διάρκεια της προσπέρασης (Heesen et al., 2012). Όπως φαίνεται ο όρος «συνεργασία» κατά την οδήγηση είναι μία αφηρημένη έννοια, που δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας, αλλά χρειάζεται να οριστεί κάνοντας χρήση μετρήσιμων μεταβλητών αναλόγως κάθε φορά του φαινομένου που εξετάζεται (Talebrou et al., 2015).

Μιας και η προσπέραση είναι ένας από τους πιο περίπλοκους ελιγμούς, στην παρούσα προσέγγιση η συνεργασία ορίζεται με όρους ασφάλειας και αποφυγής ριψοκίνδυνων οδηγικών συνθηκών. Μεταξύ των δύο βασικών οχημάτων που συμμετέχουν στην προτυποποίηση του φαινομένου η συνεργασία ορίζεται από τα παρακάτω μεγέθη (Barmounakis et al., 2017):

- στους χωρικούς διαχωρισμούς μεταξύ τους
- το διαθέσιμο άνοιγμα που υπάρχει διαθέσιμο για το δίκυκλο
- το αν ο μοτοσυκλετιστής προτίθεται να προσπεράσει από δεξιά το προπορευόμενο όχημα
- την επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάται σε σχέση με το δίκυκλο
- τη διαφορά ταχύτητας των δύο οχημάτων

Συγκεκριμένα, οι αρχικές συνθήκες συνεργασίας του δικύκλου που θα εξεταστούν περιγράφονται από τους ακόλουθους κανόνες:

1. αν ο οδηγός του κρατάει μικρές αποστάσεις από το προπορευόμενο όχημα, τότε η συμπεριφορά του θεωρείται μη-συνεργατική.
2. αν ο οδηγός του προσπερνάει από αριστερά τότε θεωρείται συνεργατικός, αφού προκύπτουν λιγότερα προβλήματα ορατότητας ή κρίσιμων καταστάσεων.
3. αν ο οδηγός του δικύκλου δεν φοράει κράνος, τότε θεωρείται μη συνεργάσιμος, ως ένα δείγμα της μη ορθολογικότητάς του

Όσον αφορά στη συνεργασία του οδηγού του προπορευόμενου οχήματος οι αρχικές συνθήκες συνεργασίας που θα εξεταστούν διέπονται από τους παρακάτω κανόνες:

1. αν ο οδηγός του αφήνει αρκετό άνοιγμα για να ολοκληρώσει το δίκυκλο την προσπέραση, τότε θεωρείται συνεργατικός.
2. αν ο οδηγός του έχει μεγαλύτερη διαμήκη επιτάχυνση από το δίκυκλο ή αν έχει διαφορά ταχύτητας μεγαλύτερη από αυτή που ευνοεί την προσπέραση από το δίκυκλο, τότε θεωρείται μη συνεργατικός. Το όριο της διαφοράς ταχύτητας θα οριστεί σε επόμενα βήματα, μέσω της μεθόδου των Δέντρων Αποφάσεων που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο.

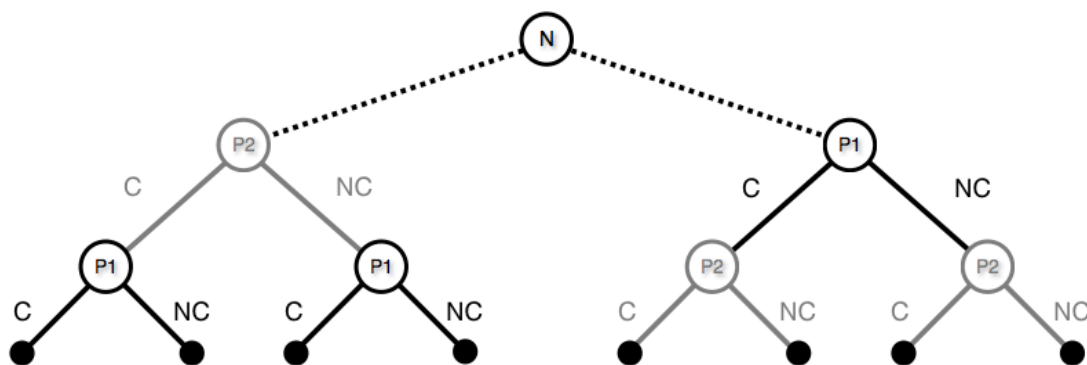
3.5. Παίγνια Συνεργασίας οδηγών κατά την προσπέραση

Όταν ένας οδηγός ΜΔ αποφασίζει να προσπεράσει το προπορευόμενο όχημα, τότε ο πρωτεύον ρόλος πηγαίνει σε αυτόν, αφού λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σχετικές παραμέτρους (ταχύτητα, διαφορά ταχύτητας, χωρικούς παράγοντες, πυκνότητα κ.τ.λ.) αποφασίζει αν ισχύουν οι κατάλληλες συνθήκες για να προσπεράσει ή όχι. Αυτό μπορεί να γίνει με έναν συνεργατικό ή μη συνεργατικό τρόπο σε σχέση με τους υπόλοιπους οδηγούς στην κυκλοφορία, για παράδειγμα αν κινείται σε κοντινές αποστάσεις από τα υπόλοιπα οχήματα ή κάνει κοντινά περάσματα. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια φαινομένων προσπέρασης, το όχημα που προπορεύεται συχνά μπορεί να ακολουθήσει συνεργατική στρατηγική για να διευκολύνει το ΜΔ στην προσπέραση (Barmounakis et al., 2017). Για παράδειγμα, υπάρχει η επιλογή το όχημα να σταματήσει να επιταχύνει και/ή να κρατάει σταθερή ταχύτητα, αφήνοντας παράλληλα τις κατάλληλες αποστάσεις για ένα άνετο και ασφαλές πέρασμα του ΜΔ, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη συνεργατικό, για παράδειγμα όταν επιταχύνει και δυσκολεύει το πέρασμα του ΜΔ.

Η κατάσταση της προσπέρασης των μοτοσυκλετιστών μπορεί να θεωρηθεί ως μία περίπτωση στρατηγικής αλληλεξάρτησης, κάνοντας την αρχική θεώρηση ότι οι οδηγοί διαφορετικών μέσων μεταφοράς αποτελούν «αντίπαλους» παίκτες σε μία τέτοια κατάσταση (ο όρος «παίκτης» δανείζεται από τη Θεωρία Παιγνίων όπου θεωρείται κάθε ορθολογικό άτομο που καλείται να πάρει μια απόφαση, βλ. Α.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων). Ενώ ο ένας οδηγός επηρεάζει τον άλλον, μιας και κινούνται στο ίδιο οδικό τμήμα, και οι δύο τους λαμβάνουν αποφάσεις με σκοπό να έχουν το μέγιστο δυνατό όφελος. Ταυτόχρονα, εκτελούν συνεχώς ελιγμούς και αυξομειώσεις ταχύτητας βασισμένοι σε προσδοκίες και πεποιθήσεις σχετικά με τον τρόπο που κινούνται οι υπόλοιποι οδηγοί (Arbis et al., 2016). Αν και είναι προφανές ότι υπάρχει μια σχέση

αλληλεπίδρασης και με τα υπόλοιπα οχήματα που κινούνται κοντά στο ΜΔ, θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρείται ως βασική αλληλεπίδραση εκείνη μεταξύ των δύο οχημάτων, ενώ οι υπόλοιπες θεωρούνται λιγότερο σημαντικές.

Σε εργασία των Barmounakis et al. (2015) το φαινόμενο της προσπέρασης των ΜΔ διαμορφώνεται ως ένα στρατηγικό παίγνιο σύμφωνα με τη Θεωρία Παιγνίων (βλ. Α.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων) όπου οι δύο παίκτες (μοτοσυκλετιστής και οδηγός προπορευόμενου οχήματος) λαμβάνουν την απόφαση για το αν θα συνεργαστούν ή όχι ταυτόχρονα, χωρίς να γνωρίζουν τι στρατηγική έχει επιλέξει ο άλλος παίκτης. Παρόλ' αυτά, στην παρούσα διατριβή θεωρείται ότι η αναλυτική μορφή του παιγνίου, όπου οι δύο παίκτες αποφασίζουν σε σειρά τη στρατηγική τους, θα μπορέσει να δώσει καλύτερη εικόνα στην αποτύπωση των στρατηγικών αποφάσεων των δύο παικτών. Ως εκ τούτου, το παίγνιο που διαμορφώνεται είναι αναλυτικής μορφής όπου ο κάθε παίκτης έχει την επιλογή να συνεργαστεί ή όχι με τον άλλον. Η παραπάνω περιγραφή θα μπορούσε να αναπαρασταθεί από ένα παίγνιο Stackelberg (Stackelberg game) όπου ο ένας παίκτης ορίζεται σαν ο αρχηγός (Leader) και επιλέγει να συνεργαστεί ή όχι, και ο δεύτερος παίκτης σαν τον ακόλουθο (Follower), που γνωρίζοντας την επιλογή του αρχηγού, αποφασίζει τη δική του στρατηγική (βλ. Α.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων). Αυτή διαμορφώνεται στην παρούσα διατριβή ως εξής: Αρχικά, γίνεται η εισαγωγή της τυχαιότητας/φύσης (Nature) ως ένας τρίτος παίκτης συμμετέχοντας στο παίγνιο μονάχα για να αποφασίσει ποιος παίζει πρώτος. Όπως αναπαρίσταται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6) το παίγνιο ξεκινάει με τον παίκτη «Τύχη» (N) που αποφασίζει τυχαία ποιος παίζει πρώτος.



Εικόνα 6: Διαμόρφωση Παιγνίου Αναλυτικής Μορφής

Έπειτα, ο Παίκτης 1 (P1) και ο Παίκτης 2 (P2) επιλέγουν το αν θα ακολουθήσουν μία συνεργατική στρατηγική (C) ή μία μη συνεργατική στρατηγική (NC) αναλόγως με το ποιος από τους δύο έχει σειρά. Τέλος, αναλόγως τον τελικό κόμβο του παιγνίου ο κάθε παίκτης θα λάβει την απολαβή που αντιστοιχεί στο ζευγάρι στρατηγικών που επελέγη.

3.6. Η «Άνεση Κατά την Προσπέραση» ως μέγεθος Απολαβής

Κατά την περαιτέρω διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο οχημάτων προκύπτει η ανάγκη για τον υπολογισμό μιας λανθάνουσας μεταβλητής που συμπεριλαμβάνει έννοιες όπως ο χρόνος για σύγκρουση (TTC) και η επιθυμία για τους οδηγούς να κινηθούν γρηγορότερα και με ασφαλείς αποστάσεις. Αν και υπάρχουν πολλές έρευνες που εξετάζουν τον τρόπο που οι οδηγοί αντιλαμβάνονται το ρίσκο κατά την οδήγηση σε διάφορες καταστάσεις, όπως σύγκρουση σε διασταυρώσεις (Arbis et al., 2016; Li et al., 2016; Liu et al., 2016; M. Liu et al., 2017; Mannering and Grodsky, 1995), δεν έχει οριστεί κάποιο μέγεθος μέχρι στιγμής που να συμπεριλαμβάνει την επιθυμία του οδηγού για να κινηθεί γρηγορότερα και να προσπεράσει.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, χρησιμοποιώντας Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων (Structural Equation Modeling – SEM – βλ. Α.3 Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων) ορίζεται ένα νέο μέγεθος που ονομάζεται Άνεση Κατά την Προσπέραση (ΑΚΠ - Comfort at Overtake - CaO). Το συγκεκριμένο μέγεθος, που αποτελεί μια λανθάνουσα μεταβλητή με πολλαπλούς δείκτες, χρησιμοποιείται σαν απολαβή για τους παίκτες θεωρώντας ότι οι οδηγοί επιθυμούν η προσπέραση να γίνεται με ασφάλεια, ταχύτητα και άνεση. Η ανάπτυξη των προτύπων της ΑΚΠ για τους δύο οδηγούς, η ποσοτικοποίηση και η περαιτέρω ανάλυση τους περιγράφεται σε επόμενη ενότητα της διατριβής (βλ. Ποσοτικοποίηση της «Άνεσης κατά την Προσπέραση»).

3.7. Έλεγχος Συνθηκών Συνεργασίας

Οι αρχικές συνθήκες συνεργασίας που ορίζονται στις προηγούμενες παραγράφους σε συνδυασμό με την απολαβή του κάθε παίκτη περιγράφουν σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά που λαμβάνει υπόψη του ο μοτοσυκλετιστής κατά την προσπέραση και μπορούν να εντοπίσουν τη βέλτιστη στρατηγική για τον καθένα από αυτούς. Η εύρεση της κατάλληλης λύσης των παιγνίων που ορίζονται δε σημαίνει όμως απαραίτητα ότι οι παίκτες ακολουθούν τη συγκεκριμένη στρατηγική κάθε φορά που παίζεται ένα τέτοιου είδους παίγνιο. Για την εξήγηση του φαινομένου έχει εισαχθεί η θεωρία του Quantal Response Equilibrium (QRE), όπου ο κάθε χρήστης μπορεί να επιλέξει τη λάθος στρατηγική είτε λόγω μη ορθολογικότητας, είτε επειδή ένα μέρος της απολαβής δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό (Goeree et al., 2016). Παρόλ' αυτά, η συγκεκριμένη θεωρία υποδεικνύει ότι όσες περισσότερες φορές παίξει κάποιο συγκεκριμένο παίγνιο ένας παίκτης, ακόμη κι αν δεν γνωρίζει ποια είναι η βέλτιστη στρατηγική, «εκπαιδεύεται» στο να την επιλέγει.

Η συγκεκριμένη θεωρία αντικαθιστά τις τέλεια ορθολογικές προβλέψεις με μη ορθολογικές προβλέψεις. Μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα ιδιότητα του QRE είναι ότι μπορεί να προβλεφθεί με ικανοποιητικό βαθμό η συστηματική διαφοροποίηση από την Ισορροπία Nash χωρίς να εισαχθούν

περισσότερα χαρακτηριστικά στο πρότυπο. Η θεωρία του QRE βασίζεται στις παρακάτω διαπιστώσεις (Chen et al., 1997; McKelvey and Palfrey, 1995; McKelvey and Palfrey, 1998; Rosenthal, 1989):

- Ένα κομμάτι της απολαβής των παικτών δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί
- Οι παίκτες κάνουν λάθη όταν εκτελούν τις ενέργειές τους
- Οι παίκτες είναι ναί μεν ορθολογικοί αλλά πολλές φορές η ορθολογικότητα εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες

Συνοπτικά, δύο παίκτες εκπαιδεύονται στο να ακολουθούν τη βέλτιστη στρατηγική και κάνουν λάθη όταν επιλέγουν ποια στρατηγική θα ακολουθήσουν. Αυτό δεν σημαίνει ότι η καλύτερη στρατηγική θα επιλέγεται πάντα αλλά ότι η καλύτερη απάντηση απέναντι στην στρατηγική που επέλεξε ο «αντίπαλος» παίκτης είναι πιο πιθανό να επιλεγεί από τις χειρότερες εναλλακτικές που έχει. Διατυπώνει ότι όσο ο παίκτης αποκτά περισσότερη εμπειρία παίζοντας ένα συγκεκριμένο παίγνιο και κάνει επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις σχετικά με τα πραγματικές απολαβές που έχει λάβει από τις διαφορετικές στρατηγικές, τόσο καλύτερα μπορεί να εκτιμήσει το αποτέλεσμα μιας διαφορετικής στρατηγικής.

Αυτή η εμπειρία που αποκτάται μέσω των επαναλαμβανόμενων παρατηρήσεων προτυποποιείται μέσω της παραμέτρου λ , η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα άτυπο μέτρο της ορθολογικότητας ενός παίκτη. Όταν $\lambda \rightarrow 0$ τότε ο παίκτης θεωρείται τελείως ανορθολογικός, ενώ όταν $\lambda \rightarrow \infty$ ο παίκτης θεωρείται τέλεια ορθολογικός. Παρόλ' αυτά, θα πρέπει να τονιστεί ότι η παράμετρος λ δέχεται κριτική, αφού δεν μπορεί να οριστεί το πως ακριβώς υπολογίζεται και μπορεί να αλλάξει άρδην τα αποτελέσματα (Goeree et al., 2016). Μερικές φορές η παράμετρος συνδέεται με κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παίκτη (για παράδειγμα, σχετίζεται με το πόσες φορές έχει παίξει το ίδιο παίγνιο) ενώ άλλες φορές διαφοροποιείται από παίγνιο σε παίγνιο ανάλογα με τις απολαβές οι οποίες έχουν οριστεί.

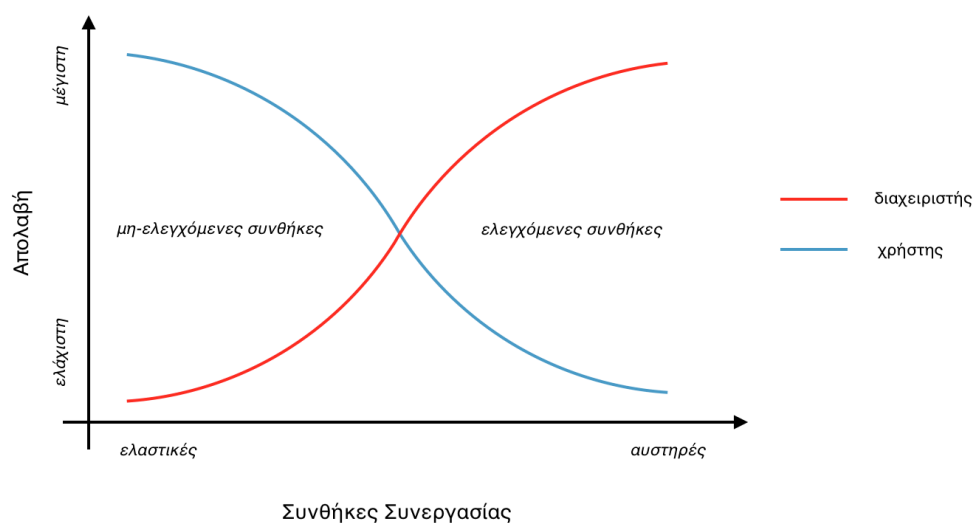
Το παραπάνω εύρημα δίνει τις κατευθυντήριες γραμμές στην εκμετάλλευση της προτυποποίησης του φαινομένου της προσπέρασης σε μικτή κυκλοφορία σε καταστάσεις στρατηγικής αλληλεπίδρασης των χρηστών με σκοπό τον έλεγχο της κυκλοφορίας και –τελικά– τη βελτίωσή της. Συγκεκριμένα, τίθεται το ερώτημα αν η βέλτιστη λύση για τους δύο οδηγούς αποτελεί και τη βέλτιστη για το κυκλοφοριακό σύστημα. Τα αισιόδοξα μηνύματα που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία είναι σαφή. Η συνεργασία οδηγεί –στην πλειοψηφία των περιπτώσεων– σε καλύτερα αποτελέσματα από την εγωιστική συμπεριφορά (Axelrod, 1984; Miller, 2013). Άμεσα προκύπτει λοιπόν το ερώτημα τι ορίζει κάποιος ως «καλύτερο» στην περίπτωση της κυκλοφορίας των οχημάτων σε μία οδό. Ως εκ τούτου κρίνεται σκόπιμο να οριστεί παρακάτω σε δύο επίπεδα τι

θεωρείται ως βέλτιστη κατάσταση, αρχικά για το χρήστη και έπειτα για το διαχειριστή ενός κυκλοφοριακού συστήματος.

Αρχικά σε επίπεδο χρήστη, αυτό που θεωρείται βέλτιστη κατάσταση είναι ο οδηγός του εκάστοτε οχήματος να φτάσει στον προορισμό του με ταχύτητα και ασφάλεια, άρα και οι προσπεράσεις που εκτελεί να γίνονται γρήγορα και με άνεση. Από την άλλη, ο διαχειριστής ενός κυκλοφοριακού συστήματος θεωρεί ως βέλτιστη λύση εκείνη που η συνολική απολαβή των χρηστών είναι μεγαλύτερη, για παράδειγμα όταν μειώνονται οι καθυστερήσεις, οι εκπομπές ρύπων, τα ατυχήματα και οι ανομοιόμορφες κυκλοφοριακές συνθήκες. Αυτό φυσικά μπορεί να περιλαμβάνει ένα ποσοστό χρηστών που δεν εξυπηρετούνται όπως θα ήθελαν και η εγωιστική συμπεριφορά να μπορούσε να τους προσφέρει μεγαλύτερο όφελος.

Προκύπτουν λοιπόν μία σειρά από ερωτήματα που εξετάζουν τις συνθήκες συνεργασίας σε δύο επίπεδα. Αρχικά θα πρέπει αν διερευνηθεί ποιες είναι εκείνες οι συνθήκες που ορίζουν τη συνεργασία μεταξύ των χρηστών για μέγιστη απολαβή σε επίπεδο χρήστη. Για παράδειγμα, ποιες συνθήκες συνεργασίας είναι εκείνες που θα δώσουν μεγαλύτερη «Άνεση Κατά την Προσπέραση» ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν τον αριθμό των επιτυχημένων προσπεράσεων; Ομοίως, σε επίπεδο διαχείρισης της κυκλοφορίας, ποιες είναι αυτές οι συνθήκες που αυξάνουν τα διανυθέντα οχηματοχιλιόμετρα, την ταχύτητα των οχημάτων και μειώνουν τη διακύμανση της ταχύτητας.

Τα παραπάνω συνοψίζονται σε ένα πρόβλημα ανάλυσης ευαισθησίας των ορίων συνεργασίας όπου, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, αρχικά εξετάζεται τι είναι βέλτιστο για το χρήστη και το κυκλοφοριακό σύστημα και, τέλος, να διερευνηθεί η ύπαρξη μίας πιθανής λύσης-ισορροπίας ώστε και οι δύο να απολαμβάνουν μεγαλύτερες απολαβές, όπως αφηρημένα απεικονίζεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Αφηρημένο διάγραμμα απολαβής σε επίπεδο χρήστη και επίπεδο συστήματος

4. Συλλογή Δεδομένων

4.1. Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της κυκλοφορίας με τεχνικά μέσα έχει αποδειχτεί ένα από τα βασικά εργαλεία για τους Συγκοινωνιολόγους μηχανικούς και ιδιαίτερα στο κομμάτι της διαχείρισης της κυκλοφορίας (Parageorgiou et al., 2008). Αρκετοί αλγόριθμοι ή συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να εντοπίζουν κινούμενα αντικείμενα και να αναλύουν την κυκλοφορία (Hsieh et al., 2006; Meng Liu et al., 2008; Shukla and Saini, 2015; Sivaraman and Trivedi, 2013b). Η παρακολούθηση του τρόπου με τον οποίο εξελίσσεται η κυκλοφορία (οχημάτων ή πεζών) σε σχέση με τον χώρο και τον χρόνο, μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση και αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων που μπορούν να παρουσιαστούν, για παράδειγμα όταν δημιουργείται αυξημένη ζήτηση σε ένα κυκλοφοριακό δίκτυο, γεγονός που μπορεί να μειώσει σε ιδιαίτερο βαθμό την απόδοση των δικτύου. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση στο θέμα της παρούσας διατριβής, ανέδειξε την ανάγκη συλλογής πραγματικών κυκλοφοριακών δεδομένων που σχετίζονται με την κίνηση των μοτοσυκλετιστών σε αστικές αρτηρίες.

Για τη διερεύνηση του φαινομένου της προσπέρασης που γίνεται αντικείμενο μελέτης στη συγκεκριμένη διατριβή εξετάστηκε αρχικά η δυνατότητα χρήσης μίας προϋπάρχουσας βάσης δεδομένων με 850 προσπάθειες προσπεράσεων που είχε χρησιμοποιηθεί σε παλιότερες έρευνες και είχε δημιουργηθεί με χρήση σταθερής κάμερας κατά τη καταγραφή της κυκλοφορίας και συγκεκριμένα τροχιών δικύκλων (Barnrounakis et al., 2016b, 2014). Όμως, τα ελλιπή στοιχεία που υπάρχουν μέχρι στιγμής και αφορούν την κίνηση των ΜΔ δεν επιτρέπουν την εφαρμογή πιο προχωρημένων μεθόδων και την μελέτη ειδικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, λόγω της χρήσης σταθερής κάμερας υπήρχαν κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά το μήκος καταγραφής, την αξιοπιστία των δεδομένων σε κάποια σημεία του βίντεο, την εμφάνιση κρυφών σημείων κ.α. (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Χρήση σταθερής κάμερας με περιορισμένο μήκος καταγραφής

Αν και με τη χρήση της συγκεκριμένης βάσης ήταν δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η περιγραφή του ελιγμού αλλά και τη διαδικασία για να απόφαση για προσπέραση ή όχι, δεν ήταν δυνατό να περιγραφεί πλήρως η δυναμική αλλαγή που μπορεί να παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια της προσπέρασης και η αλληλεπίδραση των δύο οχημάτων (ή και περισσοτέρων) οχημάτων λόγω των προβλημάτων που προαναφέρθηκαν.

Ως εκ τούτου, στη συγκεκριμένη διατριβή η λύση των UAS που περιγράφεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση κρίνεται η βέλτιστη για τη μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου και επιλέγεται για τη συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων αφού μπορεί να προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- προσφέρεται αυξημένο μήκος καταγραφής
- δεν απαιτεί την ύπαρξης σταθερής υποδομής (κτήριο, πεζογέφυρα κτλ.)
- υπάρχουν μειωμένα (έως καθόλου) κρυφά σημεία λόγω καλύτερης οπτικής
- είναι δυνατή η επιλογή ιδανικού σημείου για μελέτη του φαινομένου

4.2. Περιγραφή Εξοπλισμού

Το εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ έχει στην κατοχή του ένα πολυκόπτερο UAV για τη διενέργεια κυκλοφοριακών ερευνών. Συγκεκριμένα, το DJI Spreading Wings S900 (Εικόνα 9) επιλέχθηκε επειδή τα χαρακτηριστικά του μπορούν να ξεπεράσουν σε μεγάλο βαθμό τους περιορισμούς που είχαν τεθεί σε προηγούμενες έρευνες (DJI, 2016).



Εικόνα 9: Το DJI S900 του εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής (α) έτοιμο για απογείωση και (β) κατά τη διάρκεια αιώρησης.

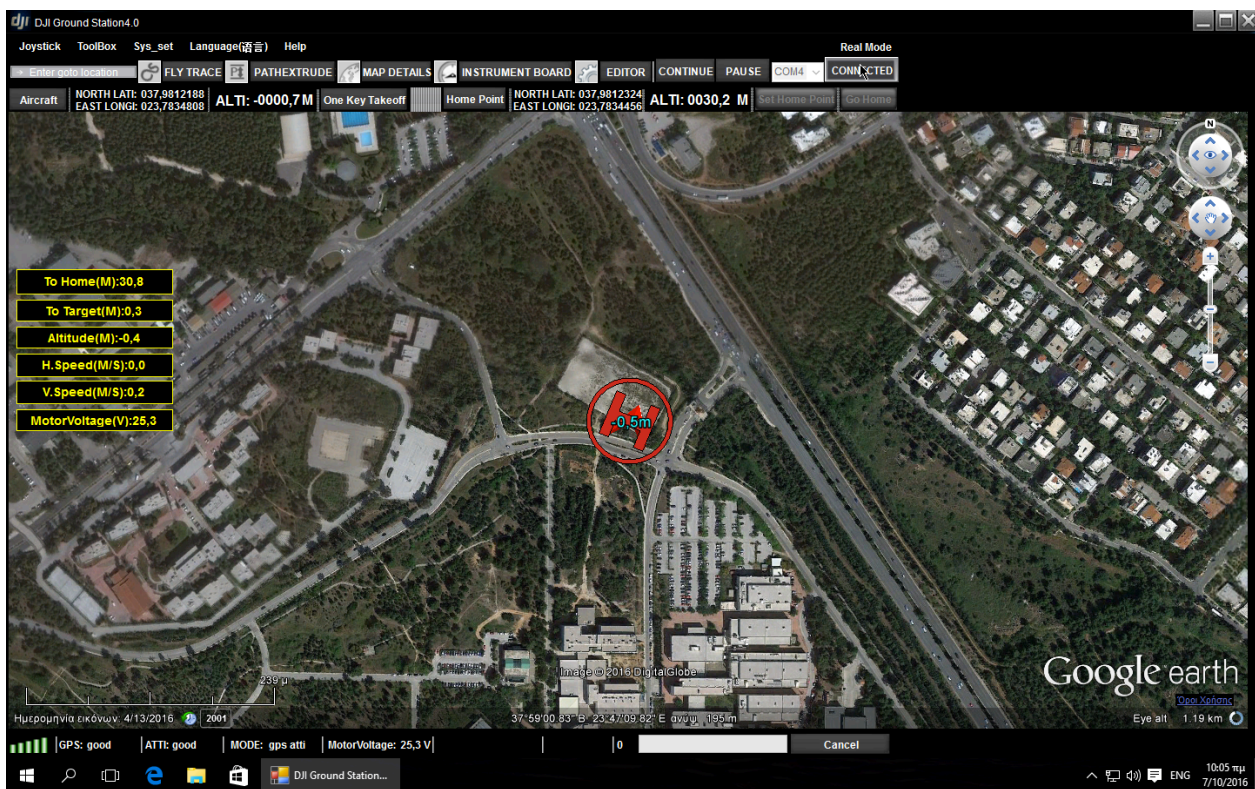
Οι περισσότερες έρευνες στο παρελθόν χρησιμοποιούν UAVs με σταθερά πτερύγια (fix-winged UAVs), τα οποία αν και έχουν μεγαλύτερο χρόνο πτήσης και μεγαλύτερα ωφέλιμα φορτία, υστερούν σε δυνατότητες ελιγμών και δυνατότητα αιώρησης σε σταθερό σημείο. Επιπλέον, ένα μουλτικόπτερο χαμηλού κόστους απαιτεί λιγότερη εμπειρία και εκπαίδευση για τον χειριστή σε

σχέση με ένα UAV με σταθερά πτερύγια αφού χρησιμοποιεί τις μεταβολές στις στροφές των μοτέρ του για τον έλεγχο του υψομέτρου και της περιστροφής του. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι τα μουλτικόπτερα μπορούν να πετάξουν σε χαμηλά υψόμετρα και να έχουν υψηλότερη ανάλυση στις λήψεις τους και ως εκ τούτου να διερευνηθούν πιο περίπλοκα φαινόμενα με καλύτερη λεπτομέρεια. Το μουλτικόπτερο που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή έχει έξι μοτέρ (εξακόπτερο) εκ των οποίων τα τρία στρέφονται ωρολογιακά και τα υπόλοιπα αντιωρολογιακά δίνουν τη δυνατότητα για τη διενέργεια πλήθος ελιγμών, με μέγιστη οριζόντια ταχύτητα τα 57km/h ενώ κάθετη ταχύτητα τα 22km/h. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο εξακόπτερο μπορεί να απογειωθεί και να πετάξει με ασφάλεια σε ταχύτητες ανέμου κάτω από 5 Beaufort (29-38 km/h) ενώ προτιμώνται χαμηλότερες τιμές ανέμου για μεγαλύτερη σταθερότητα.

Η κάμερα που χρησιμοποιεί το UAS εφαρμόζεται πάνω σε ένα μηχανισμό στήριξης για σταθερές λήψεις. Το μοντέλο κάμερας επιλέχθηκε να είναι ελαφρύ (0.150 kg), αφού κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο χρόνος πτήσης, ενώ προσφέρει ποιότητα 4K σε 30 καρέ το δευτερόλεπτο. Συγκεκριμένα, με τον παραπάνω εξοπλισμό το σύστημα έχει ένα μέγιστο χρόνο πτήσης περίπου 18 λεπτών σε ιδανικές καιρικές συνθήκες. Άλλα συστήματα που διαθέτει ο εξοπλισμός επιτρέπουν τη μεταφορά της εικόνας στο έδαφος σε ζωντανό χρόνο (Προβολή Πρώτου Προσώπου - First Person View) (Εικόνα 10) και τον καθορισμό ενδιάμεσων σταθμών (waypoints) για αυτοματοποιημένες πτήσεις. Επίσης, με χρήση τηλεμετρίας υπάρχει μία ψηφιακή ροή δεδομένων σχετικά με τα στοιχεία της πτήσης του UAV, οι οποίες ενημερώνουν το χρήστη για το υψόμετρο, την ταχύτητά του, την τάση της μπαταρίας, τη θέση του σχετικά με τη νοθή γραμμή του ορίζοντα καθώς και την εκτροπή του (Εικόνα 11). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν συστήματα ασφαλείας τα οποία σε περίπτωση χαμηλής στάθμης της μπαταρίας ή απουσίας επικοινωνίας με το τηλεχειριστήριο, το UAV έχει προγραμματιστεί να επιστρέφει αυτόματα στο σημείο απογείωσης και να εκτελεί αυτόνομα όλους τους απαραίτητους ελιγμούς για την ασφαλή προσγείωσή του.



Εικόνα 10: Περιοχή Μελέτης όπως φαίνεται σε Προβολή Πρώτου Προσώπου (FPV)



Εικόνα 11: Στιγμιότυπο με τα στοιχεία τηλεμετρίας και πτήσης του UAS

4.3. Περιοχή Μελέτης

Για τη δημιουργία της κατάλληλης βάσης δεδομένων ώστε να διερευνηθεί το φαινόμενο της προσπέρασης η επιλογή του σημείου που θα γίνουν οι μετρήσεις κρίνεται ιδιαίτερης σημασίας. Ως εκ τούτου θα πρέπει:

- Να υπάρχουν 3 λωρίδες ανά κατεύθυνση, με σκοπό να εξεταστούν προσπεράσεις από την αριστερή και την δεξιά μεριά του οχήματος
- Να είναι διαχωρισμένες οι δύο διαφορετικές κατευθύνσεις κυκλοφορίας με προστατευτική νησίδα στη μέση, ώστε να μην εισέρχονται τα οχήματα από τη μία στην άλλη σε περίπτωση προσπέρασης
- Να μην υπάρχουν στροφές και έντονες κοίλες ή κυρτές καμπύλες στην οδό (σε μηκοτομή και οριζοντιογραφία), που να επηρεάζουν η οδηγική συμπεριφορά των οδηγών
- Να μην υπάρχουν στάσεις λεωφορείων ή ταξί που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη φυσιολογική ροή των οχημάτων, ή παρκαρισμένα οχήματα
- Να μπορούν να τηρηθούν οι κανόνες για την ασφαλή πτήση του UAV

4.3.1. Επιλογή Περιοχής Μελέτης και Στοιχεία Πτήσεων του UAV

Ένα από τα σημεία που επιτρέπουν την καταγραφή ενός ικανοποιητικού αριθμού προσπεράσεων χωρίς το να δημιουργούνται φάλαγγες, όπως διαπιστώθηκε από κάποιες πρώτες μετρήσεις που έγιναν, είναι η λεωφόρος Αλίου - Κατεχάκη στο σημείο πλησίον της πύλης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ταυτόχρονα, με την ύπαρξη σηματοδότη επιτρέπεται η μελέτη πιο περίπλοκων περιπτώσεων προσπεράσεων, όπως για παράδειγμα του φιλτραρίσματος των σχηματιζόμενων ουρών, ενώ η μεγάλη διάρκεια της πράσινης ένδειξης επιτρέπει τη διενέργεια μεγάλου αριθμού προσπεράσεων σε κανονική ροή.

Επιπλέον, στην συγκεκριμένη περιοχή το UAV δύναται να ίπταται εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου σε σταθερό ύψος (50-60 μέτρων) επιτρέποντας την καταγραφή οδικού μήκους περίπου 200-220 μέτρων επί της Λεωφόρου Αλίου - Κατεχάκη (Εικόνα 12 και Εικόνα 13). Ταυτόχρονα, το σημείο αιώρησής του επιτρέπει την ασφαλή καταγραφή της κυκλοφορίας αφού δεν διέρχονται οχήματα ή πεζοί σε απόσταση 25 μέτρων από αυτό.



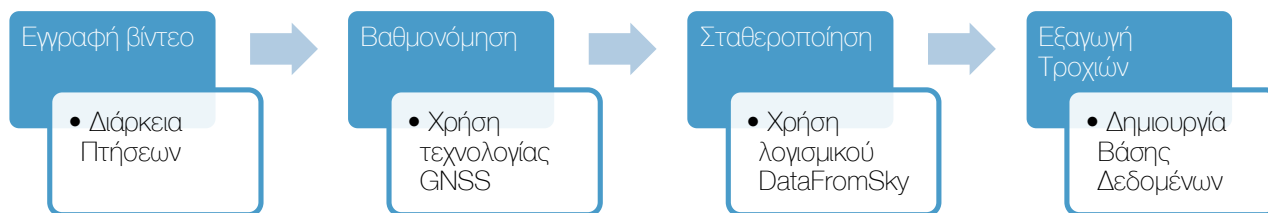
Εικόνα 12: Η περιοχή μελέτης στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται το σημείο αιώρησης του UAV ενώ το γράμμα H υποδεικνύει το σημείο απογείωσης και προσγείωσης



Εικόνα 13: Στιγμιότυπο από το σημείο απογείωσης με όλον τον εξοπλισμό

4.4. Διαδικασία Δημιουργίας Βάσης Δεδομένων

Τα βήματα που απαιτούνται για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων αναφέρονται ενδεικτικά στο Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3: Περιγραφή Διαδικασίας Δημιουργίας Βάσης Δεδομένων

4.4.1. Εγγραφή Βίντεο

Σε δειγματοληπτικές μετρήσεις που έγιναν στην περιοχή μελέτης, σε ένα βίντεο σε βίντεο διάρκειας 18 λεπτών σε καθημερινή ημέρα και μεσημεριανές ώρες, ο κυκλοφοριακός φόρτος στην ώρα στο ρεύμα προς Υμηττό βρέθηκε ίσος με 2815 οχήματα την ώρα, ενώ στο ρεύμα προς Αθήνα βρέθηκε ίσος με 865 οχήματα την ώρα. Ταυτόχρονα κατεγράφησαν 66 προσπάθειες προσπέραση. Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από τη μακροσκοπική ανάλυση του βίντεο που βιντεοσκοπήθηκε. Ως εκ τούτου, εκτιμήθηκε ότι η συγκεκριμένη περιοχή θα μπορέσει να καλύψει επαρκώς τις ανάγκες για τη συγκεκριμένη διατριβή αφού ο αριθμός των προσπεράσεων είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μην απαιτηθεί ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών πτήσεων, γεγονός που θα αύξανε σημαντικά τον χρόνο.

Συνολικά οι μετρήσεις διήρκησαν περίπου 6 μήνες όπου έγινε η συλλογή 433 περιπτώσεων προσπέρασης, σε συνολική διάρκεια πτήσεων ίση με 3 ώρες και 34 λεπτά, ενώ ο όγκος των δεδομένων που συλλέχθηκαν είναι 123 GB.

4.4.2. Βαθμονόμηση Βίντεο

Ένα από τα πιο βασικά βήματα για την καλή ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων είναι η βαθμονόμηση των βίντεο, δηλαδή την μετατροπή των εικονικών συντεταγμένων του βίντεο σε πραγματικές συντεταγμένες σε οριζόντιο επίπεδο, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή αξιόπιστων αποστάσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Προκειμένου να έχουμε πιστά αποτελέσματα από την περιοχή μελέτης μας ενδιαφέρει η αποκατάσταση της γεωμετρίας της περιοχής, δηλαδή ο εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός για κάθε στιγμιότυπο του βίντεο. Η συγκεκριμένη διαδικασία επιτυγχάνεται σε δύο βήματα.

Αρχικά, εφόσον είναι γνωστή η εσωτερική γεωμετρία της μηχανής, λαμβάνεται υπόψη η παραμόρφωση ειδώλου (distortion) στο φακό της κάμερας. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη παραμόρφωση δεν επηρεάζει την ευκρίνεια του φακού, αλλά μετατοπίζει τα σημεία του από τη θέση την οποία θα έπρεπε.

Σε δεύτερο βήμα, για τη σωστή εξαγωγή των απαραίτητων δεδομένων απαιτείται στην περιοχή μελέτης να οριστεί ένα οριζόντιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με ορισμένη απόσταση μεταξύ των τετμημένων και τεταγμένων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται η Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (Universal Transverse Mercator – UTM), ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται παγκοσμίως και έχει υιοθετηθεί κυρίως από τις στρατιωτικές υπηρεσίες διαφόρων χωρών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διατριβής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και κάποιο τοπικό σύστημα, όμως προτιμήθηκε το σύστημα UTM για την παραγωγή μιας βάσης δεδομένων που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές.

Τελικά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 14 η περιοχή μελέτης από ένα τυχαίο κυρτό πολύγωνο μετατρέπεται σε ένα διαστασιολογημένο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο όπου κάθε τετράγωνο εικονοστοιχείο (pixel) στο βίντεο αντιπροσωπεύει ένα τετράγωνο σταθερού μήκους στην πραγματικότητα.



Τέλος, έγιναν μετρήσεις στην περιοχή μελέτης που επιτρέπουν την μείωση του σφάλματος σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού GNSS (Εικόνα 15). Συγκεκριμένα, έγινε χρήση δορυφορικού δέκτη Leica 1230+ 2 συχνοτήτων (L1,L2), ο οποίος είναι συμβατός με τα συστήματα δορυφόρων GPS και GLONASS και του οποίου η συχνότητα δειγματοληψίας μπορεί να φτάσει τα 20 Hz. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος RTK (Real Time Kinematic) κατά την οποία ο δέκτης χρησιμοποιεί διορθώσεις που λαμβάνει από σύστημα μόνιμων δορυφορικών σταθμών αναφοράς μέσω σύνδεσης με το διαδίκτυο. Η ονομαστική ακρίβεια του συστήματος για το είδος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε (στατικές μετρήσεις με τη μέθοδο RTK) είναι $\pm 5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$ (οριζοντιογραφία) και $\pm 10 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$ (υψομετρία).



Εικόνα 15: Στιγμιότυπο από την χρήση εξοπλισμού GNSS

Όπως είναι κατανοητό, το σφάλμα που προκύπτει στις τελικές μετρήσεις τελικά επηρεάζεται αποκλειστικά από τη σωστή επιλογή του σημείου κατά την ανάλυση και σταθεροποίηση του βίντεο, διαδικασία που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Για την καλύτερη βαθμονόμηση του βίντεο στην περιοχή μελέτης λήφθηκαν δεδομένα για οκτώ (8) σημεία, διασκορπισμένα σε όλο το μήκος και των δύο ρευμάτων κυκλοφορίας με απώτερο σκοπό την περαιτέρω μείωση τού σφάλματος που προκύπτει από την επιλογή σημείων από τον ερευνητή (Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Σημεία λήψης συντεταγμένων UTM

4.4.3. Σταθεροποίηση Βίντεο

Με χρήση ειδικού λογισμικού που διαθέτει ο Τομέας Μεταφορών & Συγκοινωνιακής Υποδομής γίνεται η βαθμονόμηση, που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, και σταθεροποίηση του βίντεο και έπειτα η εξαγωγή των τροχιών των οχημάτων που έχουν βιντεοσκοπηθεί (DataFromSky, 2016).

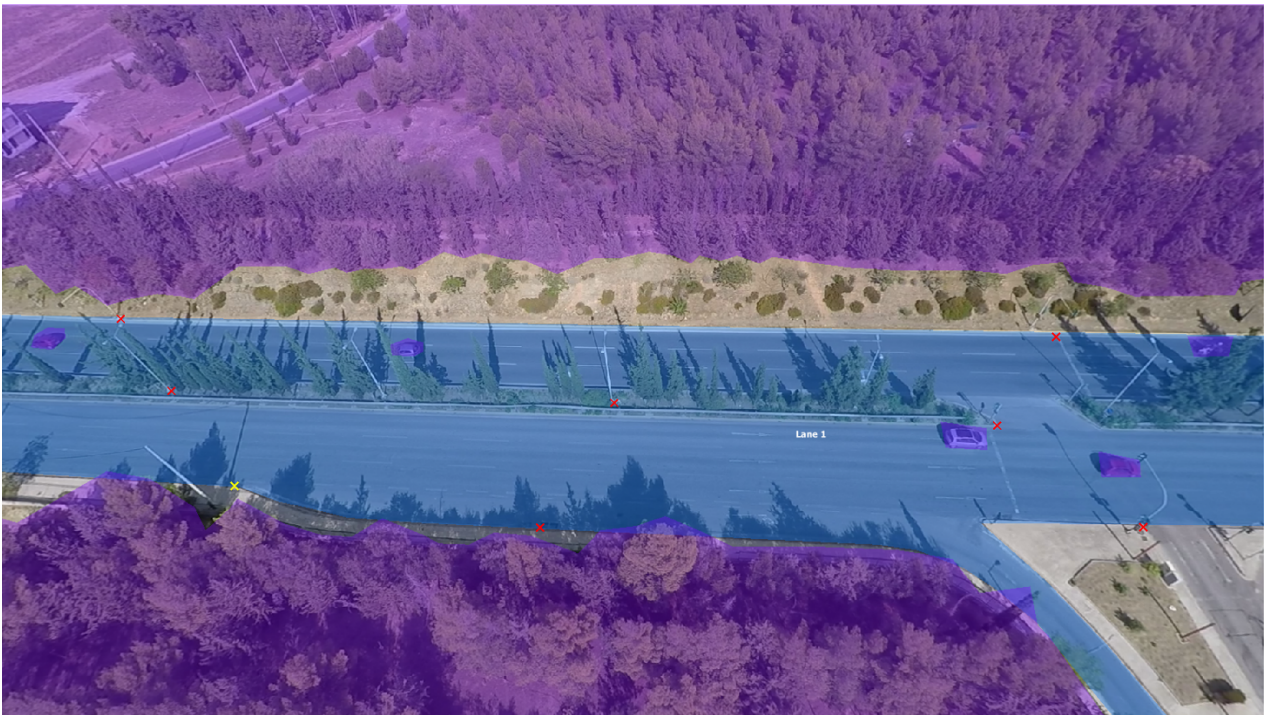
Η σταθεροποίηση του βίντεο επιτυγχάνεται σε δύο στάδια υλικού και λογισμικού (hardware and software). Αρχικά, το UAV διαθέτει σύστημα στήριξης με ηλεκτρονικά μοτέρ ακριβείας που προσαρμόζεται κάτω από αυτό με σκοπό να κρατήσει την κάμερα σε οριζόντια θέση ανεξάρτητα από την κλίση που έχει το UAV, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τη στροφή της κάμερας κατά έναν άξονα κατά τη διάρκεια της πτήσης (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Ο μηχανισμός σταθεροποίησης της κάμερας (www.dji.com)

Έπειτα, το βίντεο υφίσταται επεξεργασία μέσω ενός φίλτρου σταθεροποίησης που μηδενίζει τις κινήσεις της κάμερας. Αρχικά, το φίλτρο επιλέγει συγκεκριμένες ομάδες από

εικονοστοιχεία και συγκρίνοντας διαδοχικά καρέ του βίντεο μεταξύ τους υπολογίζονται τα διανύσματα κίνησης της κάμερας. Αυτά τα διανύσματα αναλύονται περαιτέρω για τον υπολογισμό της στροφής και του ζουμ με σκοπό τα δύο καρέ να μοιάζουν μεταξύ τους. Το δεύτερο πέρασμα του φίλτρου διαβάζονται οι τιμές των διανυσμάτων και εφαρμόζονται οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί ώστε η κίνηση της κάμερας να είναι μηδαμινή. Σε αυτό το βήμα, ορίζονται όλα τα σημεία που μπορούν να μετακινηθούν κατά τη διάρκεια της εγγραφής του βίντεο και μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα των παραπάνω φίλτρων. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18, ορίζονται τα οχήματα που έχουν μείνει στο συγκεκριμένο καρέ, οι φυλλωσιές των δέντρων και υψηλή βλάστηση και άλλα αντικείμενα που μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία σταθεροποίησης.



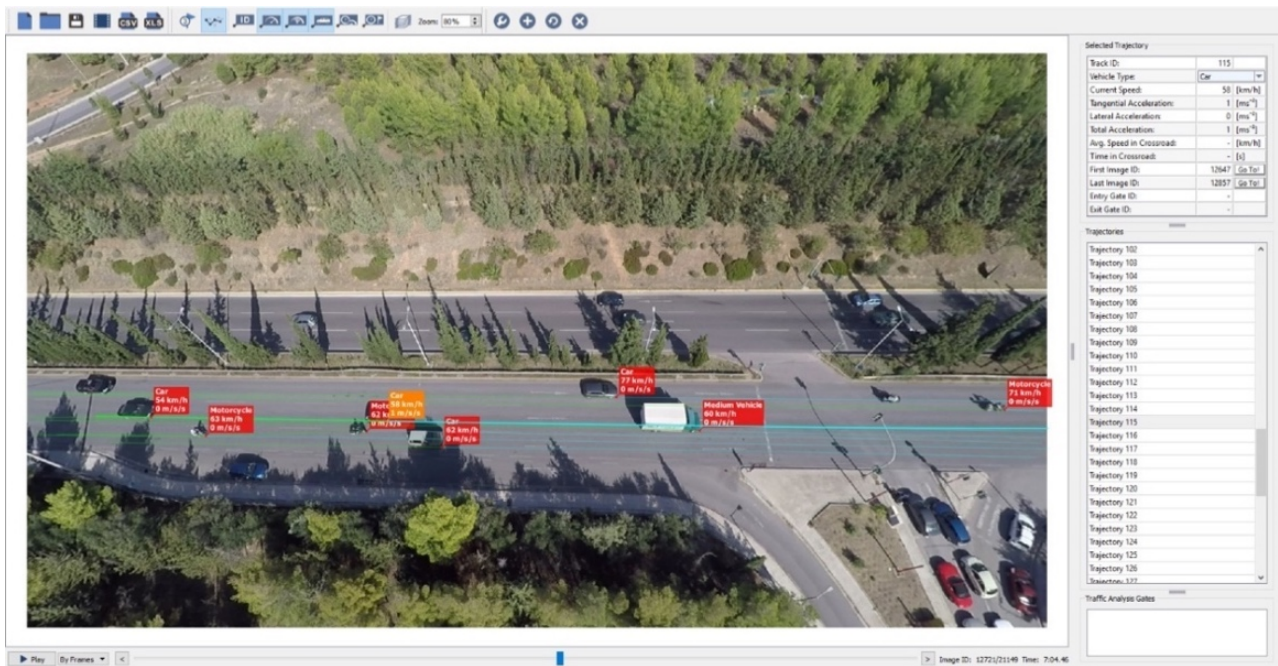
Εικόνα 18: Ορισμός σημείων εξαίρεσης από τη διαδικασία σταθεροποίησης και ταύτιση εικονικών με πραγματικές συντεταγμένες

Το τελευταίο βήμα πριν την εξαγωγή δεδομένων τροχιών αφορά την μετατροπή των σημείων του βίντεο σε πραγματικές συντεταγμένες, θέτοντας συγκεκριμένες συντεταγμένες στα σταθερά πλέον σημεία του βίντεο. Ουσιαστικά, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η βαθμονόμηση του βίντεο ώστε να γίνει η αποτύπωση των τροχιών, αποστάσεων και ταχυτήτων με βάση τα σημεία που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα της βαθμονόμησης.

4.4.4. Περιγραφή Λογισμικού Ανάλυσης Βίντεο και Εξαγωγής Τροχιών

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 αφού εντοπιστεί το κάθε όχημα αποτυπώνεται η τροχιά του στο επεξεργασμένο βίντεο. Ταυτόχρονα, μέσω της βαθμονόμησης υπολογίζονται σημαντικές

πληροφορίες για το εκάστοτε όχημα όπως η στιγμιαία του ταχύτητα (πρώτη παράγωγος της θέσης ως προς το χρόνο), η εγκάρσια και διαμήκης επιτάχυνση (δεύτερη παράγωγος της θέσης ως προς το χρόνο), η χρονική διάρκεια ανίχνευσης του οχήματος κ.α. Επιπλέον, εφόσον οριστούν στην περιοχή μελέτης συγκεκριμένες διατομές, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα χρήσης εικονικών φωρατών για την εξαγωγή μακροσκοπικών μεγεθών, όπως τον πραγματικό κυκλοφοριακό φόρτο (κατά τη διάρκεια της καταγραφής), την αναγωγή του φόρτου σε χρονικό παράθυρο μισής ώρας αλλά και τη μέση ταχύτητα των οχημάτων.



Εικόνα 19: Στιγμιότυπο από το Λογισμικό DataFromSky (DataFromSky, 2016)

4.5. Περιγραφή Βάσης Δεδομένων

Τα εργαλεία που περιγράφονται παραπάνω δίνουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μιας λεπτομερούς και αναλυτικής βάσης δεδομένων, ενώ η μεθοδολογία που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο απαιτεί τη διαδικασία λήψης δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στην ίδια προσπάθεια προσπέρασης για να αποτυπωθεί η δυναμική αλλαγή του φαινομένου στο χρόνο. Ως εκ τούτου, η κάθε προσπάθεια προσπέρασης θα αποτελείται από τέσσερις (4) ξεχωριστές υποενότητες.

4.5.1. Γενικά Στοιχεία

Αρχικά, περιγράφονται γενικά στοιχεία που αφορούν τη συγκεκριμένη προσπάθεια προσπέρασης από το μοτοσυκλετιστή. Οι μεταβλητές που αποτυπώνονται είναι:

Πίνακας 5: Γενικά στοιχεία κατά την Προσπέραση

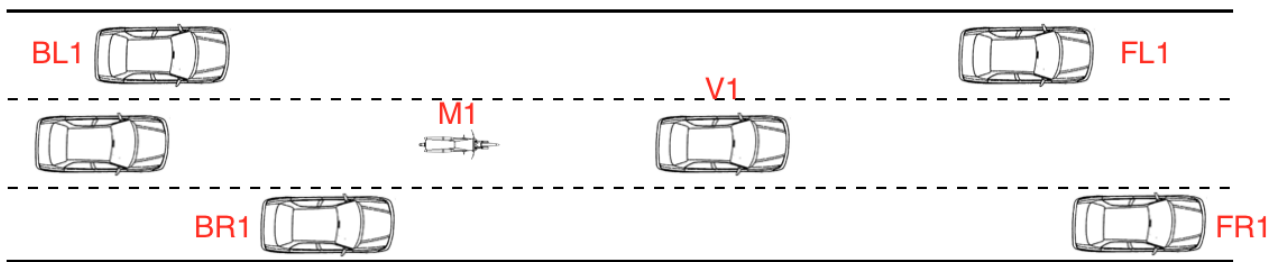
Μεταβλητή	Επεξήγηση	Τιμές
typeM	Τύπος ΜΔ	0: Σκούτερ, 1: Μοτοσυκλέτα
typeVeh	Τύπος οχήματος που προσπερνάται	1: ΙΧ, 2: Σκούτερ, 3: Μοτοσυκλέτα, 4: Βαρύ Όχημα
typeOver	Είδος Προσπέρασης	0: Χωρίς Πλάγιο Ελιγμό, 1: Με Πλάγιο Ελιγμό
laneM	Λωρίδα στην οποία κινείται το ΜΔ	0: Δεξιά, 1: Μεσαία, 2: Αριστερή
laneV	Λωρίδα στην οποία κινείται το όχημα που προσπερνάται	0: Δεξιά, 1: Μεσαία, 2: Αριστερή
laneSame	Είναι τα δύο οχήματα στη ίδια λωρίδα;	LaneM - LaneV
passenger	Υπάρχει δεύτερος αναβάτης στο δίκυκλο;	0: Όχι, 1: Ναι
platoon	Έχει διαμορφωθεί φάλαγγα δικύκλων;	0: Όχι, 1: Ναι
helmet	Ο οδηγός του ΜΔ φοράει κράνος;	0: Όχι, 1: Ναι

4.5.2. Αρχή Προσπέρασης (Φάση 1)

Στη δεύτερη υποενότητα της βάσης δεδομένων συμπληρώνονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες αναλύσεις και αφορούν την αρχή της προσπέρασης. Συγκεκριμένα οι μεταβλητές που αποτυπώνονται αφορούν α) ταχύτητες και επιταχύνσεις οχημάτων (Πίνακας 6 και Εικόνα 20) και β) αποστάσεις και χωρικούς διαχωρισμούς (Πίνακας 7 και Εικόνα 21):

Πίνακας 6: Μεταβλητές Ταχυτήτων & Επιταχύνσεων

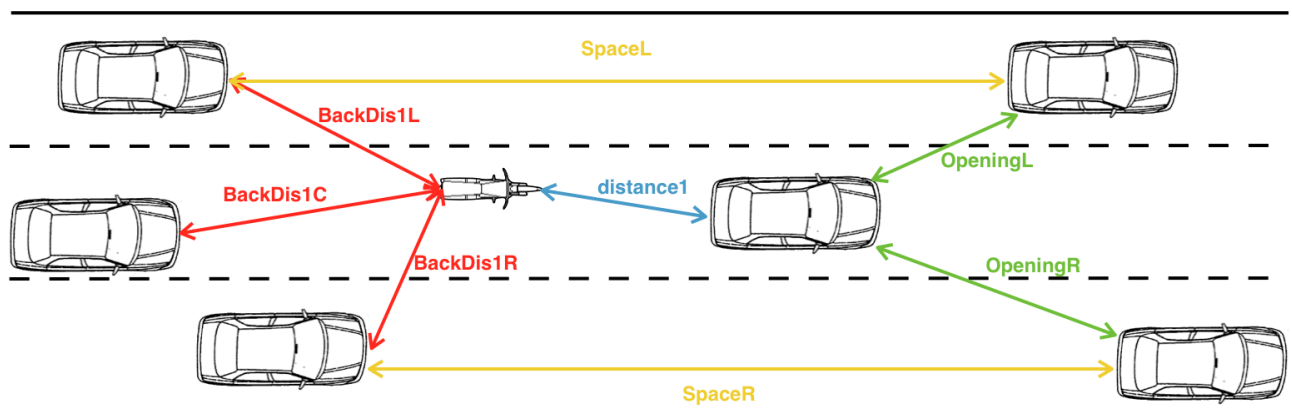
Μεταβλητή	Επεξήγηση	Τιμές
speedM1	Ταχύτητα του ΜΔ	km/h
accelM1	Συνολική Επιτάχυνση του ΜΔ	m/s/s
speedV1	Ταχύτητα του Οχήματος που προσπερνάται	km/h
accelV1	Επιτάχυνση του Οχήματος που προσπερνάται	m/s/s
speedFL1	Ταχύτητα του Οχήματος Μπροστά (Αριστερά)	km/h
accelFL1	Επιτάχυνση του Οχήματος Μπροστά (Αριστερά)	m/s/s
speedFR1	Ταχύτητα του Οχήματος Μπροστά (Δεξιά)	km/h
accelFR1	Επιτάχυνση του Οχήματος Μπροστά (Δεξιά)	m/s/s
speedBL1	Ταχύτητα του Οχήματος Πίσω (Αριστερά)	km/h
accelBL1	Επιτάχυνση του Οχήματος Πίσω (Αριστερά)	m/s/s
speedBR1	Ταχύτητα του Οχήματος Πίσω (Δεξιά)	km/h
accelBR1	Επιτάχυνση του Οχήματος Πίσω (Δεξιά)	m/s/s



Εικόνα 20: Κωδικοποίηση Ταχυτήτων και Επιταχύνσεων (Α' Φάση)

Πίνακας 7: Μεταβλητές Αποστάσεων & Χωρικών Διαχωρισμών

Μεταβλητή	Επεξήγηση	Τιμές
distance1	Απόσταση μεταξύ του ΜΔ και του Οχήματος που προσπερνάται	m
OpeningL	Άνοιγμα (Αριστερά)	m
OpeningR	Άνοιγμα (Δεξιά)	m
SpaceL	Διαθέσιμη Διαμήκης Απόσταση πλάγως του Οχήματος που προσπερνάται (Αριστερά)	m
SpaceR	Διαθέσιμη Διαμήκης Απόσταση πλάγως του Οχήματος που προσπερνάται (Δεξιά)	m
LateralL1	Διαθέσιμη Διαμήκης απόσταση πλάγως του οχήματος που προσπερνάται (Αριστερά)	m
LateralR1	Διαθέσιμη Διαμήκης απόσταση πλάγως του οχήματος που προσπερνάται (Δεξιά)	m
BackDis1L	Απόσταση μεταξύ του ΜΔ και του οχήματος πίσω (Αριστερά)	m
BackDis1C	Απόσταση μεταξύ του ΜΔ και του οχήματος πίσω (Κέντρο)	m
BackDis1R	Απόσταση μεταξύ του ΜΔ και του οχήματος πίσω (Δεξιά)	m
OverPhase1	Ολοκλήρωσε το ΜΔ την πρώτη φάση της προσπέρασης;	0: Όχι, 1: Ναι



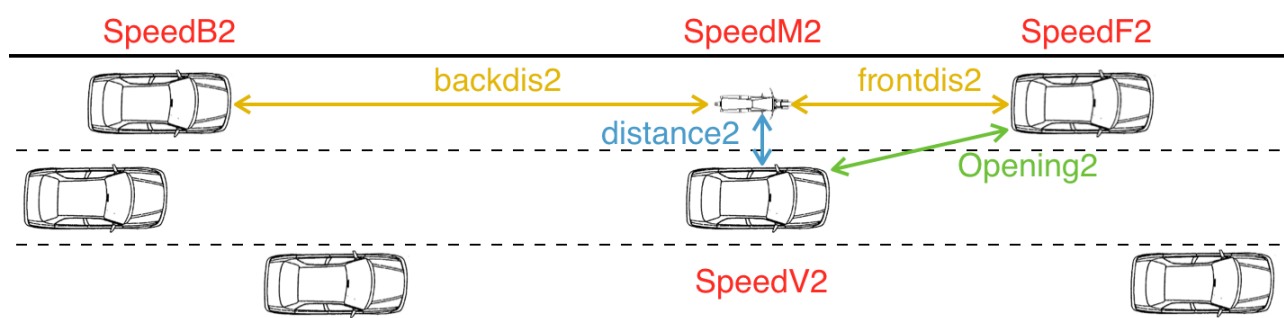
Εικόνα 21: Κωδικοποίηση Αποστάσεων & Χωρικών Διαχωρισμών (Α' Φάση)

4.5.3. Ολοκλήρωση Προσπέρασης (Φάση 2)

Στην τρίτη υποενότητα της βάσης δεδομένων συμπληρώνονται όλες οι μεταβλητές που αφορούν τη δεύτερη φάση της προσπέρασης, δηλαδή τη μετάβαση από τη Φάση 2 στη Φάση 3 όπως φαίνεται στην Εικόνα 22. Συγκεκριμένα, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8) οι μεταβλητές που αποτυπώνονται είναι:

Πίνακας 8: Μεταβλητές που αφορούν τη μετάβαση από τη Φάση 2 στη Φάση 3

Μεταβλητή	Επεξήγηση	Τιμές
relativePos	Σχετική θέση του ΜΔ ως προς το όχημα που προσπερνάται	0: Δεξιά, 1: Αριστερά
speedM2	Ταχύτητα του ΜΔ	km/h
accelM2	Συνολική επιτάχυνση του ΜΔ	m/s/s
speedV2	Ταχύτητα του Οχήματος που προσπερνάται	km/h
accelV2	Επιτάχυνση του Οχήματος που προσπερνάται	m/s/s
distance2	(Εγκάρσια) Απόσταση του ΜΔ με το Όχημα που προσπερνάται	m
opening2	Άνοιγμα (Σχετική Θέση)	m
speedF2	Ταχύτητα του Οχήματος Μπροστά (Σχετική Θέση)	km/h
accelF2	Επιτάχυνση του Οχήματος Μπροστά (Σχετική Θέση)	m/s/s
frontdis2	Απόσταση μεταξύ του ΜΔ και του Οχήματος Μπροστά (Σχετική Θέση)	m
speedB2	Ταχύτητα του Οχήματος Πίσω (Σχετική Θέση)	km/h
accelB2	Επιτάχυνση του Οχήματος Πίσω (Σχετική Θέση)	m/s/s
backDis2	Απόσταση μεταξύ του ΜΔ και του Οχήματος Πίσω (Σχετική Θέση)	m
overPhase2	Ολοκλήρωσε το ΜΔ τη δεύτερη φάση της προσπέρασης?	0: Όχι, 1: Ναι



Εικόνα 22: Κωδικοποίηση Ταχυτήτων και Αποστάσεων (Β' Φάση)

4.5.4. Συμπληρωματικές Μεταβλητές

Εκτός από τις μεταβλητές που μετριοούνται άμεσα, κάποιες άλλες δημιουργούνται από αυτές. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9), δημιουργούνται διαφορές ταχύτητας, εμβαδά και χρόνοι μέχρι την πρόσκρουση.

Πίνακας 9: Συμπληρωματικές Μεταβλητές που προκύπτουν από τις προηγούμενες

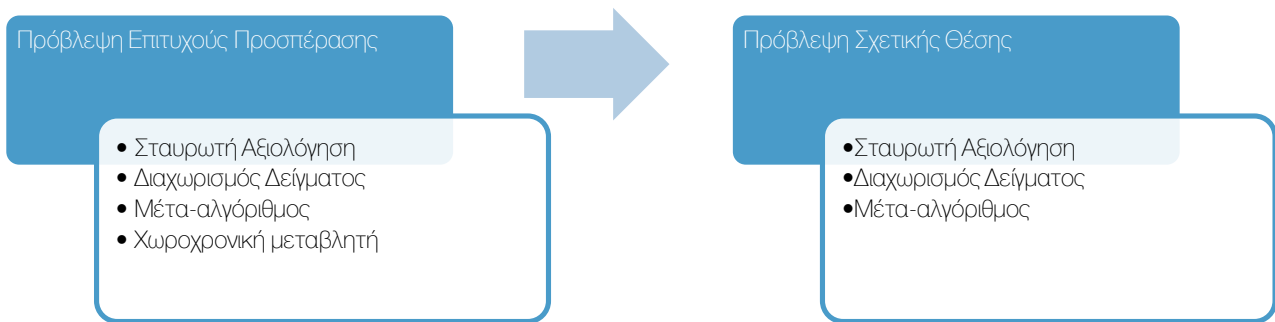
Μεταβλητή	Επεξήγηση	Τιμές
BestOpening	Μεγαλύτερο άνοιγμα μεταξύ δεξιού και αριστερού	m
Opening_Effect	Είναι το άνοιγμα μεγαλύτερο από 12 μέτρα;	0: Όχι, 1: Ναι
SpeedDiff_P1	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Προπ. Οχήματος	km/h
SpeedDiff_FR_P1	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Οχήματος Μπροστά (Δεξιά)	km/h
SpeedDiff_FL_P1	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Οχήματος Μπροστά (Αριστερά)	km/h
SpeedDiff_BR_P1	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Οχήματος Πίσω (Δεξιά)	km/h
SpeedDiff_BL_P1	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Οχήματος Πίσω (Αριστερά)	km/h
SpeedDiff_P2	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Προπ. Οχήματος (Φάση 2)	km/h
SpeedDiff_F_P2	Διαφορά ταχύτητας ΜΔ και Οχήματος Μπροστά (Σχετική Θέση)	km/h
AreaL	Διαθέσιμη Περιοχή πλαγίως του Οχήματος που προσπερνάται	m ²
	(Αριστερά)	
AreaR	Διαθέσιμη Περιοχή πλαγίως του Οχήματος που προσπερνάται	m ²
	(Δεξιά)	
TTC_BR	Χρόνος μέχρι την πρόσκρουση με το όχημα που έρχεται από	s
	πίσω (Δεξιά)	
TTC_BL	Χρόνος μέχρι την πρόσκρουση με το όχημα που έρχεται από	s
	πίσω (Αριστερά)	
Back_Veh	Είναι ο χρόνος μέχρι την πρόσκρουση με το όχημα που έρχεται	0: Όχι, 1: Ναι
	από πίσω μικρότερος από 5 δευτερόλεπτα;	
PredictedOpeningDifference	Διαφορά ανοίγματος μεταξύ Φάσης 1 και Φάσης 2	m
FinalOvertake	Ολοκλήρωσε τελικά το ΜΔ και τις δύο φάσεις;	0: Όχι, 1: Ναι

Επίσης, από τις παραπάνω μεταβλητές θα πρέπει να εξεταστεί χωριστά η PredictedOpeningDifference. Η συγκεκριμένη μεταβλητή δημιουργήθηκε για να περιγράψει την πιθανή δυνατότητα πρόβλεψης των οδηγών για αύξηση ή μείωση του ανοίγματος που έχει διαθέσιμο το δίκυκλο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η μεταβλητή δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας μιας και αφορά διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κατά την διερεύνηση όμως του φαινομένου, παρατηρήθηκε το φαινόμενο κάποιοι μοτοσυκλετιστές να επιλέγουν να προσπεράσουν σε συνθήκες που το διαθέσιμο άνοιγμα δεν ήταν επαρκές για προσπέραση, όμως τη χρονική στιγμή που έφταναν στο στάδιο της ολοκλήρωσης της προσπέρασης, το διαθέσιμο άνοιγμα ήταν κατάλληλο. Ως εκ τούτου, γίνεται η υπόθεση ότι οι οδηγοί έχουν τη δυνατότητα, βασισμένοι στην εμπειρία τους και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν (όπως διαθέσιμο άνοιγμα, τοποθέτηση και ταχύτητες οχημάτων κ.α.), να προβλέψουν την αύξηση ή μείωση του ανοίγματος, γεγονός που αποτυπώνεται στην παραπάνω μεταβλητή για να εισαχθεί στα πρότυπα που αναλύονται στη συνέχεια.

5. Προτυποποίηση Διαδικασίας Προσπέρασης

5.1. Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αφορά στη δημιουργία δύο προτύπων πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς του μοτοσυκλετιστή κατά την προσπέραση (Διάγραμμα 4). Το πρώτο αφορά στην πρόβλεψη της έκβασης της προσπέρασης ή όχι του προπορευόμενου οχήματος ενώ το δεύτερο στην τροχιά την οποία θα ακολουθήσει μέχρι να ολοκληρωθεί αυτή η προσπέραση.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα ροής Προτυποποίησης Διαδικασίας Προσπέρασης

Τα διάφορα πρότυπα που δημιουργήθηκαν αξιολογούνται σε σχέση με την επιτυχή πρόβλεψη (Κλάση 1) ή όχι (Κλάση 0) της προσπέρασης χρησιμοποιώντας τα παρακάτω μεγέθη:

$$\text{Ευαισθησία (True Positive Rate)} = \frac{\text{Αριθμός Ορθών Ταξινομήσεων Κλάσης 1}}{\text{Συνολικός Αριθμός Περιπτώσεων Κλάσης 1}} = \frac{TP}{P} \quad (1)$$

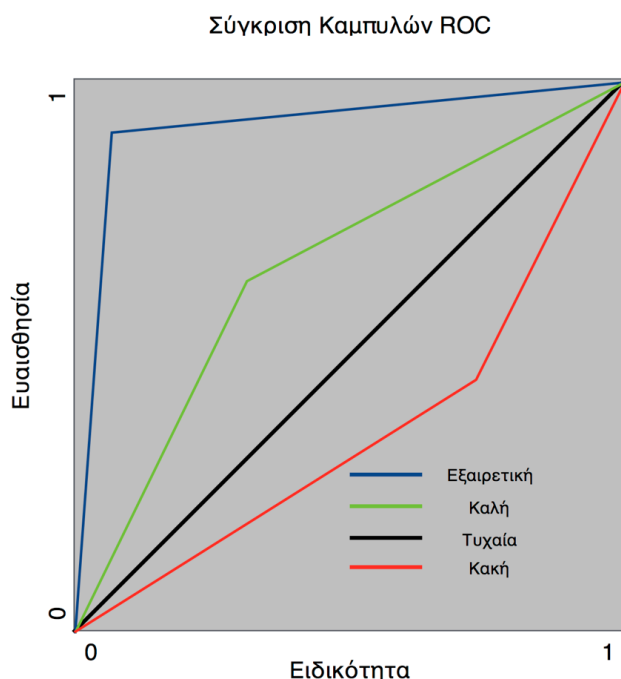
$$\text{Ειδικότητα (False Positive Rate)} = \frac{\text{Αριθμός Λάθος Ταξινομήσεων Κλάσης 1}}{\text{Συνολικός Αριθμός Περιπτώσεων Κλάσης 0}} = \frac{FP}{N} \quad (2)$$

$$\text{Ακρίβεια (Precision)} = \frac{\text{Αριθμός Ορθών Ταξινομήσεων Κλάσης 1}}{\text{Συνολικός Αριθμός Ταξινομήσεων Κλάσης 1}} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$F - \text{Measure} = 2 \times \frac{1}{\frac{1}{\text{Ακρίβεια}} + \frac{1}{\text{Ευαισθησία}}} = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (4)$$

Ένα «ιδανικό» πρότυπο που θα μπορούσε να προβλέψει κάθε κατάσταση προσπέρασης ή μη προσπέρασης, θα παρουσίαζε Ευαισθησία ίση με 1 και Ειδικότητα ίση με 0. Όμως επειδή κάτι τέτοιο είναι σπάνιο να συμβεί, χρησιμοποιείται επιπλέον στατιστικά εργαλεία που περιγράφουν τη διαγνωστική ακρίβεια του προτύπου μέσω της σχέσης διαφορετικών μεγεθών. Για παράδειγμα, το F-Measure είναι ένα μέτρο που λαμβάνει υπόψη την ακρίβεια και την ευαισθησία του προτύπου. Ως αρμονικό μέσο των δύο μεγεθών είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, αφού συνδυάζει τα δύο μεγέθη και για να πάρει υψηλή τιμή απαιτεί υψηλή τιμή ακρίβειας και ευαισθησίας.

Ένας άλλος ενδιαφέρον συνδυασμός μεγεθών για την αποτελεσματικότητα ενός προτύπου είναι εκείνος της Ευαισθησίας και της Ειδικότητας. Συγκεκριμένα, η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών, καθώς αυτά μεταβάλλονται μεταξύ διαφορετικών προτύπων, παριστάνονται από την Καμπύλη Λειτουργικών Χαρακτηριστικών Δέκτη (Receiver Operating Characteristic Curve – ROC Curve) (Bradley, 1997). Η καμπύλη ROC ορίζεται σε ένα μοναδιαίο τετράγωνο $[0,1] \times [0,1]$, όπου στον έναν άξονα αποτυπώνεται η τιμή της Ευαισθησίας ενώ στον δεύτερο η τιμή της Ειδικότητας. Η διαγώνιος του τετραγώνου αναπαριστά τη διαδικασία τυχαίας πρόβλεψης σε ένα πρότυπο. Ως εκ τούτου, τα σημεία κάτω από τη διαγώνιο αναπαριστούν μία «κακή» ταξινόμηση σε αντίθεση με τα στοιχεία που βρίσκονται πάνω από αυτή. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη ROC (Area Under the ROC curve - AUROC) αποτελεί ένα δείκτη καλής προσαρμογής του προτύπου, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του εμβαδού κάτω από την καμπύλη, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβειά του (Εικόνα 23).



Εικόνα 23: Σύγκριση Καμπυλών ROC

Συνήθως μία τιμή πάνω από 0.90 χαρακτηρίζεται εξαιρετική, πάνω από 0.80 ως καλή, πάνω από 0.70 ως δεκτή, ενώ παρακάτω τα αποτελέσματα θα πρέπει να επαναεξεταστούν. Παρόλ' αυτά, θα πρέπει να τονιστεί ότι αν και το εμβαδόν είναι ιδιαίτερα χρήσιμο μέγεθος θα πρέπει πάντα να συσχετίζεται με τα υπόλοιπα μεγέθη αξιολόγησης.

5.2. Πρόβλεψη επιτυχούς προσπάθειας

Το πρώτο πρότυπο έχει ως σκοπό να περιγράψει τη διαδικασία λήψης της απόφασης του μοτοσυκλετιστή για προσπάθεια ή όχι του προπορευόμενου οχήματος. Το πρόβλημα που

διατυπώθηκε και εξηγήθηκε στις προηγούμενες ενότητες είναι ένα κλασσικό πρόβλημα κατηγοριοποίησης, όπου μία ομάδα μεταβλητών χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί ένα αποτέλεσμα. Η διαδικασία της επιλογής των μεταβλητών που θα εισέλθουν στο πρότυπο είναι μια ιδιαίτερα σημαντική σημασία για την απόδοση του Δέντρου Απόφασης. Συνολικά, εικοσιένα (21) μεταβλητές εισήλθαν στο πρότυπο ως ανεξάρτητες μεταβλητές ενώ η δυαδική μεταβλητή που επιλέχθηκε δείχνει το αν το δίκυκλο προσπέρασε τελικά (Κλάση 1) ή όχι (Κλάση 0) το προπορευόμενο δίκυκλο. Οι υπόλοιπες μεταβλητές αφορούν στον τύπο των οχημάτων, τις λωρίδες κίνησής τους, χωρικούς παράγοντες, ταχύτητες, διαφορές ταχύτητας και τον χρόνο μέχρι την πρόσκρουση (TTC) από το όχημα πίσω από το αντικείμενο δίκυκλο.

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10), τελικά παρουσιάζονται 4 πρότυπα που δημιουργήθηκαν σταδιακά κάνοντας χρήση λογισμικού Μηχανικής Μάθησης ανοιχτού κώδικα (Hall et al., 2009). Ο αλγόριθμος C4.5 εφαρμόστηκε με παράγοντα εμπιστοσύνης 0.25 (confidence factor) για το «κλάδεμα» (pruning), ενώ ο ελάχιστος αριθμός περιπτώσεων ανά φύλλο ήταν ίσος με 2 (Quinlan, 1993). Τα δύο πρώτα πρότυπα δημιουργούνται βάσει αυτού του αλγορίθμου. Το Πρότυπο 1 αξιολογείται με σταυρωτή αξιολόγηση (cross validation) μετά από 10 επαναλήψεις ενώ το Πρότυπο 2 χωρίζοντας το δείγμα προς εκπαίδευση και προς δοκιμή με αναλογία 2:1.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του διαχωρισμού του δείγματος σε δείγμα εκπαίδευσης και δείγμα δοκιμής είναι ότι μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την ποιότητα ενός προτύπου πρόβλεψης σε δεδομένα που το πρότυπο δεν έχει εκπαιδευτεί. Όταν λέμε ότι θα θέλαμε να αξιολογήσουμε ένα πρότυπο, εννοούμε ότι θα θέλαμε να γνωρίζουμε τι θα συμβεί αν εφαρμόσουμε το συγκεκριμένο πρότυπο σε μελλοντικά δεδομένα για να κάνουμε προβλέψεις, δηλαδή θα θέλαμε να γνωρίζουμε αν οι προβλέψεις μας είναι κοντά στα πραγματικά δεδομένα που θα δούμε, πόσο μεγάλα είναι τα σφάλματα και αν παρουσιάζονται συγκεκριμένοι τύποι σφάλματος. Παρόλο που τις περισσότερες φορές δεν μπορούμε να αποκτήσουμε πρόσβαση σε μελλοντικά δεδομένα, μπορούμε να διατηρήσουμε ένα μέρος των διαθέσιμων δεδομένων εκτός εκπαίδευσης του προτύπου και στη συνέχεια να τα αντιμετωπίσουμε ως δεδομένα από το μέλλον. Όπως φαίνεται, το Πρότυπο 2 παρουσιάζει ελάχιστα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το πρώτο.

Πίνακας 10: Συγκριτική Ανάλυση των προτύπων για Προσπέραση

	Πρότυπο 1 (Σταυρωτή Αξιολόγηση)	Πρότυπο 2 (Διαχωρισμός Δείγματος 66%)	Πρότυπο 3 (AdaBoostM1)	Πρότυπο 4 (Opening Difference)
TP Rate	0.829	0.871	0.850	0.918
FP Rate	0.275	0.182	0.257	0.063
Precision	0.828	0.875	0.847	0.929
F-Measure	0.829	0.872	0.848	0.921
AUROC	0.818	0.902	0.876	0.954

Με τη χρήση του μέτα-αλγορίθμου Adaboost (βλ. Α.2.2 «Κλάδεμα» και Ενίσχυση) έχοντας ως βασικό αλγόριθμο τον C4.5, το όριο για «κλάδεμα» ίσο με 100 και χωρίς χρήση επαναδειγματοληψίας (resampling) μετά από 3 επαναλήψεις, όπως φαίνεται στο Πρότυπο 3, το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη ROC είναι 87.6% που αξιολογείται σαν «καλό» για την πρόβλεψη της απόφασης του μοτοσυκλετιστή για προσπέραση. Για πολλαπλά τρεξίματα του μέτα-αλγορίθμου με διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων κάθε φορά (ο αριθμός των δέντρων που δημιουργούνται για να περιγράψουν τη βάση δεδομένων), βρέθηκε ότι μετά από τρεις (3) επαναλήψεις ο δείκτης F-Measure μεγιστοποιούνταν χωρίς να υπάρχουν προβλήματα υπερπροσαρμογής των δεδομένων (overfitting). Συγκεκριμένα, μετά από τις τρεις (3) επαναλήψεις ο δείκτης F-Measure πέφτει και έπειτα συνεχίζει να ανεβαίνει ξανά, δείγμα προβλήματος υπερπροσαρμογής των δεδομένων. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι αν και τα μεγέθη αξιολόγησης δεν βελτιώθηκαν συνολικά, το Πρότυπο 3 παρουσιάζει βελτιωμένους δείκτες στην πρόβλεψη επιτυχών προσπεράσεων (Κλάση 1) σε σχέση με τα προηγούμενα δύο. Αυτό συμβαίνει διότι ο μέτα-αλγόριθμος δημιουργεί πολλαπλούς ταξινομητές και χρησιμοποιεί συνδυασμό αυτών με διαφορετικά βάρη για να πραγματοποιήσει την τελική πρόβλεψη.

Αυτό που είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι ότι η εισαγωγή της χωρικής μεταβλητής PredictedOpeningDifference που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι αν ο οδηγός γνωρίζει ότι το διαθέσιμο άνοιγμα για την προσπέραση πρόκειται να αυξηθεί τότε είναι πολύ πιθανότερο να ξεκινήσει τη διαδικασία προσπέρασης, σε αντίθεση με την περίπτωση που όταν προβλέπεται μείωσή του, δεν επιχειρείται προσπέραση. Αν και η συγκεκριμένη μεταβλητή δεν μπορεί να μετρηθεί αφού υπολογίζεται με την αφαίρεση αποστάσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, το εύρημα αυτό υποστηρίζει την ιδέα του ελέγχου και της πρόβλεψης κυκλοφοριακών συνθηκών, ειδικά σε ένα περιβάλλον Έξυπνων Συστημάτων και Συνδεδεμένων οχημάτων. Η σημασία του συγκεκριμένου ευρήματος εξετάζεται περισσότερο σε επόμενη ενότητα.

Βάσει των παραπάνω, εξηγείται το Δέντρο Απόφασης που δημιουργήθηκε από το Πρότυπο 2, το οποίο παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Το συγκεκριμένο Δέντρο Απόφασης αποτυπώνεται στην Εικόνα 24 και μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω μορφή ψευδοκώδικα:

Αλγόριθμος 1: Ψευδοκώδικας του Δέντρου Απόφασης για την Πρόβλεψη Προσπέρασης

αν η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων είναι ≤ 7.22 km/h τότε

αν το δίκυκλο προσπερνάει αυτοκίνητο τότε

αν η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων είναι ≤ 6.52 m τότε

αν το διαθέσιμο άνοιγμα είναι > 5 m τότε

αν η ταχύτητα του δικύκλου είναι ≤ 56.81 km/h τότε **Προσπέρασε**

αλλιώς

αν το αριστερό άνοιγμα είναι ≤ 7.88 m τότε

αν η διαφορά ταχύτητας με το όχημα στα μπροστά αριστερά είναι ≤ 32.92 τότε **Προσπέρασε**

αλλιώς **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς

αν η απόσταση από το όχημα πίσω δεξιά είναι ≤ 39.29 m τότε **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς **Προσπέρασε**

αλλιώς **Μην Προσπεράσεις**

αν το δίκυκλο προσπερνάει σκούτερ τότε **Προσπέρασε**

αν το δίκυκλο προσπερνάει μοτοσυκλέτα τότε **Μην Προσπεράσεις**

αν το δίκυκλο προσπερνάει βαρύ όχημα τότε **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς

αν η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων είναι > 7.22 km/h τότε

αν η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων είναι ≤ 11.94 km/h τότε

αν η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων είναι ≤ 7.08 m τότε **Προσπέρασε**

αλλιώς

αν ο χρόνος μέχρι την πρόσκρουση με το πίσω δεξιά όχημα είναι ≤ 8.14 s τότε **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς

αν το δίκυκλο κινείται στη δεξιά λωρίδα τότε

αν η διαφορά ταχύτητας με το όχημα μπροστά αριστερά είναι ≤ 7.21 km/h τότε **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς **Προσπέρασε**

αλλιώς το δίκυκλο κινείται στη μεσαία λωρίδα τότε

αν υπάρχει πίσω από το δίκυκλο κάποιο όχημα τότε **Μην Προσπεράσεις**

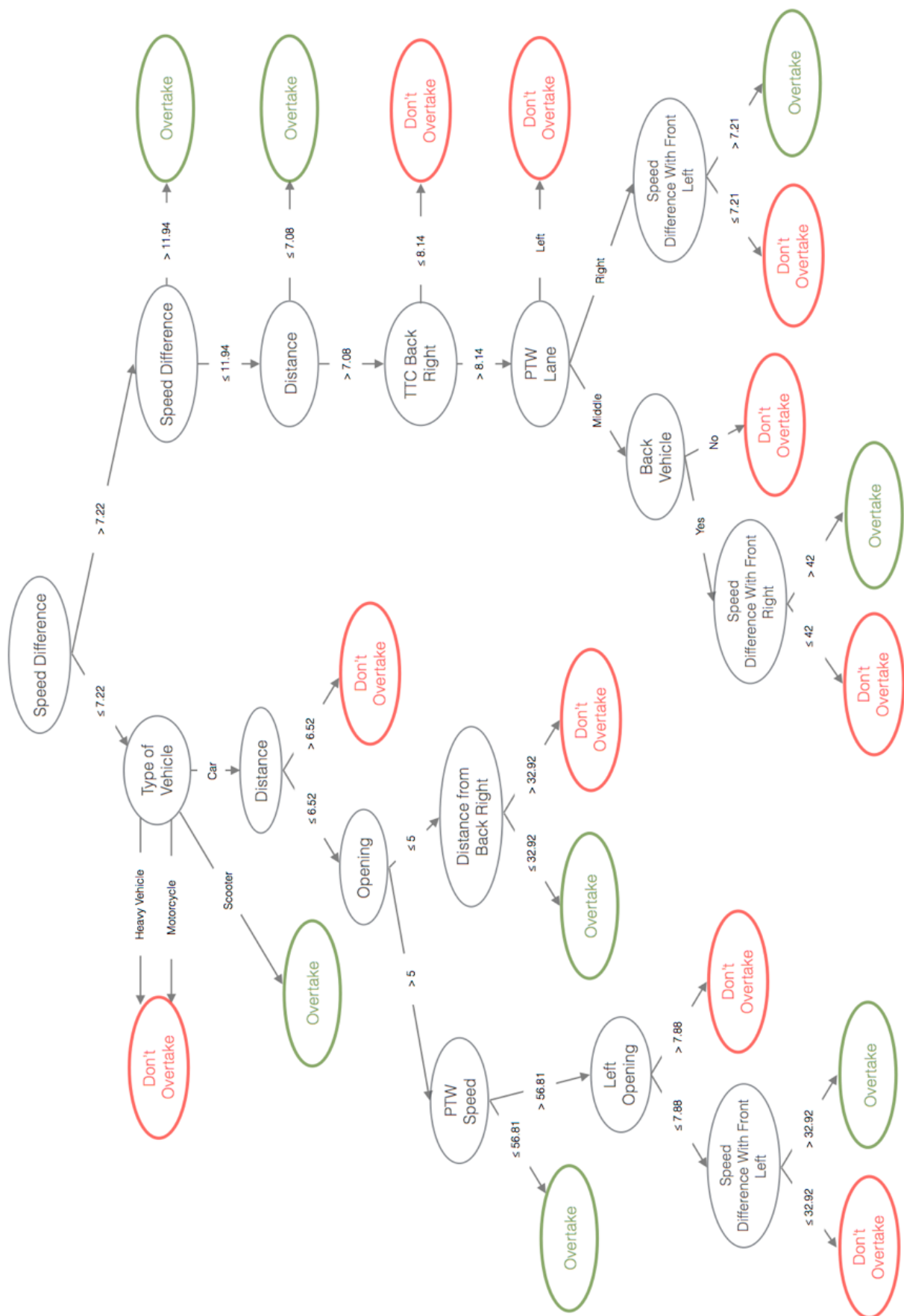
αλλιώς

αν η διαφορά ταχύτητας με το μπροστά δεξιά όχημα είναι ≤ 42 km/h τότε **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς **Προσπέρασε**

αλλιώς αν το δίκυκλο κινείται στην αριστερή λωρίδα τότε **Μην Προσπεράσεις**

αλλιώς **Προσπέρασε**



Εικόνα 24: Αποτύπωση του Δέντρου Απόφασης

Όπως παρατηρείται, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων είναι η πιο σημαντική μεταβλητή, αφού είναι η πρώτη παράμετρος που εξετάζει ο μοτοσυκλετιστής ενώ οι χωρικοί παράγοντες παρατηρούνται σε επόμενα κλαδιά του δέντρου. Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση όπου η διαφορά ταχύτητας των δύο οχημάτων είναι μικρότερη του ορίου των 7.22 km/h όπου ο τύπος του οχήματος που προσπερνάται παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο. Σε περίπτωση που το προπορευόμενο όχημα είναι είτε βαρύ όχημα είτε μοτοσυκλέτα μεγάλου κυβισμού, τότε ο μοτοσυκλετιστής θα πρέπει να μην προσπεράσει, αφού πιθανώς η διάρκεια της προσπέρασης να διαρκέσει περισσότερο από κανονικό, είτε λόγω του μεγάλου μεγέθους που έχει το βαρύ όχημα είτε των χαρακτηριστικών των μοτοσυκλετών μεγάλου κυβισμού. Αντίθετα, φαίνεται ότι ο μοτοσυκλετιστής θα πρέπει να προσπεράσει ένα δίκυκλο μικρό κυβισμού, αφού δύσκολα εκείνο θα αποτρέψει την προσπέρασή του με κάποιο τρόπο.

Στην περίπτωση που το προπορευόμενο όχημα είναι αυτοκίνητο και η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων παραμένει χαμηλότερη από το όριο των 7.22 km/h που υπολογίστηκε, υπεισέρχονται οι χωρικοί παράγοντες ως εκείνοι που αναλύονται και στη συνέχεια παίζουν σημαντικό ρόλο. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η τιμή της απόστασης των δύο οχημάτων και το διαθέσιμο άνοιγμα που έχει ο μοτοσυκλετιστής, ώστε να προσπεράσει με ασφάλεια το προπορευόμενο όχημα διατηρώντας αποστάσεις κατά την προσπέραση. Το παραπάνω εύρημα ενισχύεται από το γεγονός ότι, αφού γίνει ο έλεγχος για τον ασφαλή χωρικό διαχωρισμό των οχημάτων και του διαθέσιμου ανοίγματος, θα πρέπει ο μοτοσυκλετιστής να εξετάσει ξανά την ταχύτητά του, ώστε να προσπεράσει με μικρότερη ταχύτητα σε περίπτωση που η απόσταση και το άνοιγμα δεν επαρκεί για να αποφευχθεί μία απότομη προσπέραση σε «κοντινές» αποστάσεις και μικρά ανοίγματα. Ταυτόχρονα, σε επόμενο κλαδί του δέντρου φαίνεται και η επιρροή του οχήματος που βρίσκεται πίσω δεξιά από το δίκυκλο, που παίζει ρόλο στην απόφαση του μοτοσυκλετιστή. Το συγκεκριμένο εύρημα μπορεί να συνδεθεί με την ασφάλεια που θέλει να αισθάνεται ο μοτοσυκλετιστής καθώς προσπερνάει σε περίπτωση που αποφασίσει για οποιοδήποτε λόγο να μην ολοκληρώσει την προσπέραση και να επανέλθει στη λωρίδα του.

Σε περίπτωση που η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων είναι μεγαλύτερη από το όριο των 7.22 km/h, τότε παρατηρείται ότι υπάρχει ένα εύρος ταχυτήτων όπου εξετάζονται κι άλλες παράμετροι πέραν της διαφοράς ταχύτητας. Συγκεκριμένα, από 7.22km/h έως 11.94km/h η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων είναι η επόμενη κρίσιμη παράμετρος, αφού για μικρότερες αποστάσεις, το πρότυπο προβλέπει προσπέραση αφού με αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθεί κάποια σύγκρουση μεταξύ των δύο οχημάτων. Έπειτα, η χρονική απόσταση από το πίσω δεξιά όχημα

παρατηρείται ως σημαντική, αφού μικρές τιμές στη συγκεκριμένη παράμετρο, θα μπορούσαν να φέρουν σε δυσμενή θέση τον οδηγό σε περίπτωση ακύρωσης της προσπέρασης.

Στη συνέχεια, λαμβάνεται υπόψη η λωρίδα που κινείται το όχημα με τα ευρήματα να υποδεικνύουν σημαντική επίδραση των οχημάτων γύρω από το δίκυκλο. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι αν το δίκυκλο κινείται στη δεξιά λωρίδα, τότε εξετάζεται η ταχύτητα που επικρατεί στη μεσαία λωρίδα μέσω της παραμέτρου της διαφοράς ταχύτητας με το όχημα μπροστά κι αριστερά). Προκύπτει, ότι αν στη λωρίδα εξ αριστερών του δικύκλου επικρατούν σχετικά υψηλές ταχύτητες, τότε το δίκυκλο δεν θα πρέπει, όπως αναμένεται, να εκτελέσει κάποιον ελιγμό προσπέρασης για την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων σε περίπτωση που δεν μπορέσει να εισαχθεί ομαλά στη συγκεκριμένη λωρίδα. Ομοίως, αν το όχημα κινείται στη μεσαία λωρίδα τότε αν για τα οχήματα που κινούνται πίσω από αυτό με TTC μικρότερο των 5 δευτερολέπτων, το δίκυκλο δεν θα εκτελέσει κάποιον ελιγμό προσπέρασης. Παρομοίως, αν οι ταχύτητες που επικρατούν στη λωρίδα δεξιά αυτού είναι υψηλές τότε δεν εκτελείται κάποιος ελιγμός προσπέρασης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση που το όχημα κινείται στην αριστερή λωρίδα, αφού τότε το πρότυπο προβλέπει ότι δεν θα προσπεράσει εκ των προτέρων από δεξιά, κάτι όμως που εξετάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο επόμενο πρότυπο.

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι αν η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων είναι μεγαλύτερη από τα 11.94km/h τότε το πρότυπο προβλέπει προσπέραση, χωρίς να εξετάζονται άλλες παράμετροι. Αυτό είναι εύρημα το οποίο έρχεται σε ταύτιση με προηγούμενη έρευνα στο θέμα της προσπέρασης των μοτοσυκλετιστών (Barmounakis et al., 2016b) όπου είχε διατυπωθεί ότι μία διαφορά ταχύτητας των 15km/h αρκεί για να ολοκληρωθεί το 85% των προσπαθειών για προσπέραση. Αν κανείς λάβει υπόψη του ότι στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα γραμμικής παλινδρόμησης, είναι φανερό το πλεονέκτημα της μεθόδου των Δέντρων Αποφάσεων αφού μπορούν να περιγράψουν την επιρροή των άλλων παραγόντων σε μεγαλύτερο βάθος όπως περιγράφεται χαρακτηριστικά και σε προηγούμενη παράγραφο (Πρόβλεψη Οδηγικής Συμπεριφοράς).

5.3. Πρόβλεψη της σχετικής θέσης της μοτοσυκλέτας

Το δεύτερο πρότυπο εξετάζει το πως ο μοτοσυκλετιστής έχει σκοπό να προσπεράσει το προπορευόμενο όχημα όταν αυτός αποφασίσει να προσπεράσει ή όχι. Συγκεκριμένα, ως εξαρτημένη μεταβλητή επιλέγεται το αν ο μοτοσυκλετιστής θα προσπεράσει από αριστερά ή δεξιά του οχήματος, δεδομένου του ότι αποφάσισε προηγουμένως να προσπεράσει το προπορευόμενο όχημα. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις προτυποποίησης πραγματοποιούνται, όπως και στο προηγούμενο πρότυπο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Συγκριτική Ανάλυση των προτύπων για επιλογή σχετικής θέσης της μοτοσυκλέτας

	Πρότυπο 1 (Σταυρωτή Αξιολόγηση)	Πρότυπο 2 (Διαχωρισμός Δείγματος 66%)	Πρότυπο 3 (AdaBoostM1)
TP Rate	0.896	0.918	0.936
FP Rate	0.137	0.118	0.077
Precision	0.895	0.918	0.937
F-Measure	0.895	0.918	0.937
AUROC	0.836	0.836	0.866

Όπως φαίνεται, και τα δύο πρότυπα έχουν καλή προβλεψιμότητα στον τρόπο με τον οποίο το ΜΔ θα κινηθεί σε σχέση με το προπορευόμενο όχημα. Ειδικά όσον αφορά το Πρότυπο 3, το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη ROC είναι 86.6%, το οποίο χαρακτηρίζει ως «καλό» το πρότυπο στην πρόβλεψή του. Επιπλέον, φαίνεται ότι με την εφαρμογή του μέτα-αλγορίθμου στα προηγούμενα πρότυπα όλοι οι χαρακτηριστικοί δείκτες βελτιώνονται. Στην Εικόνα 25 αποτυπώνεται σε δενδρική μορφή το βασικό δέντρο απόφασης του προτύπου που διαμορφώνεται από τον μέτα-αλγόριθμο ενώ παρακάτω εκφράζεται και σε μορφή ψευδοκώδικα.

Παρατηρείται ότι οι τοποθετήσεις των οχημάτων και εν συνεχεία οι χωρικοί παράγοντες παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στην απόφαση του μοτοσυκλετιστή για το αν θα προσπεράσει από αριστερά ή δεξιά. Όπως φαίνεται, αν τα δύο οχήματα στην αρχή του ελιγμού της προσπέρασης δεν είναι στην ίδια λωρίδα, τότε αν το δίκυκλο είναι πίσω αριστερά από το προπορευόμενο όχημα, θα πρέπει να προσπεράσει από αριστερά, ενώ αν αντίστοιχα είναι πίσω δεξιά, θα πρέπει να προσπεράσει από δεξιά. Αν και κάτι τέτοιο φαίνεται προφανές, θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπήρχε ένας μικρός αριθμός περιπτώσεων στο δείγμα όπου κάτι τέτοιο δε συνέβη, Ως εκ τούτου, ο αλγόριθμος δεν φάνηκε να επηρεάζεται από το μικρό αυτό δείγμα και η αρχική τοποθέτηση των οχημάτων εφόσον βρίσκονται σε διαφορετικές λωρίδες αρκεί για να κάνει την πρόβλεψη.

Στην περίπτωση όμως που το δίκυκλο είναι στην ίδια λωρίδα με το προπορευόμενο όχημα τότε παρατηρείται ότι οι χωρικοί παράγοντες παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην απόφαση για

το αν θα προσπεράσει από αριστερά ή από δεξιά. Αρχικά φαίνεται ότι αν η διαθέσιμη απόσταση εκ δεξιών του προπορευόμενου οχήματος είναι μεγαλύτερη από 6.37 μέτρα, τότε το όχημα θα πρέπει να προσπεράσει από δεξιά. Σε αντίθετη περίπτωση, γίνεται έλεγχος στην απόσταση εξ αριστερών του οχήματος όπου αν είναι μικρότερη από 2 μέτρα, τότε το δίκυκλο θα πρέπει να προσπεράσει από δεξιά. Αν δεν ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες, στη συνέχεια, λαμβάνεται υπόψη η τοποθέτηση των οχημάτων, όπου η περίπτωση που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι όταν ο μοτοσυκλετιστής εξετάζει το διαθέσιμο εμβαδόν εκ δεξιών του προπορευόμενου οχήματος. Το συγκεκριμένο εύρημα υποδεικνύει ότι ένας μοτοσυκλετιστής αρχικά κοιτάζει να ελαχιστοποιήσει τους ελιγμούς του (αφού λαμβάνει υπόψη την τοποθέτηση των οχημάτων), έπειτα να προσπεράσει τα προπορευόμενα οχήματα έχοντας αρκετή απόσταση από αυτά (αφού λαμβάνει υπόψη του εγκάρσιες αποστάσεις) και τέλος να κινηθεί σε σημεία όπου έχει αρκετό διαθέσιμο χώρο (αφού λαμβάνει υπόψη του το εμβαδόν). Η συγκεκριμένη σειρά προτίμησης παρατηρείται επίσης όταν το δίκυκλο επιλέγει να προσπεράσει ένα όχημα και τελικά κατά τη διάρκεια του ελιγμού επιλέγει να κινηθεί παράλληλα προς το όχημα, πολλές φορές μοιραζόμενο την ίδια λωρίδα με άλλα οχήματα σε ιδιαίτερα κοντινή απόσταση, δηλαδή ο μοτοσυκλετιστής επιλέγει την προσπέραση σε κοντινή απόσταση έναντι του διαθέσιμου χώρου για περαιτέρω ελιγμούς.

Αλγόριθμος 2: Ψευδοκώδικας του Δέντρου Απόφασης για προσπέραση από τη Δεξιά ή την Αριστερή Πλευρά

αν το δίκυκλο δεν είναι στην ίδια λωρίδα με το όχημα, αλλά δεξιά του τότε **Πήγαινε Δεξιά**

αλλιώς αν το δίκυκλο δεν είναι στην ίδια λωρίδα με το όχημα, αλλά αριστερά του τότε **Πήγαινε Αριστερά**

αλλιώς αν τα δύο οχήματα είναι στην ίδια λωρίδα τότε

αν η εγκάρσια απόσταση από τα δεξιά του οχήματος είναι $\leq 6.37m$ τότε

αν η εγκάρσια απόσταση από τα αριστερά του οχήματος είναι $\leq 2.00m$ τότε

αν το δίκυκλο είναι στη δεξιά λωρίδα τότε **Πήγαινε Δεξιά**

αλλιώς το δίκυκλο είναι στη μεσαία λωρίδα τότε

αν ο διαθέσιμος χώρος στα δεξιά του οχήματος είναι $\leq 67.85m^2$ τότε **Πήγαινε Αριστερά**

αλλιώς **Πήγαινε Δεξιά**

αν το δίκυκλο είναι στην αριστερή λωρίδα τότε **Πήγαινε Δεξιά**

αλλιώς **Πήγαινε Αριστερά**

αλλιώς **Πήγαινε Δεξιά**

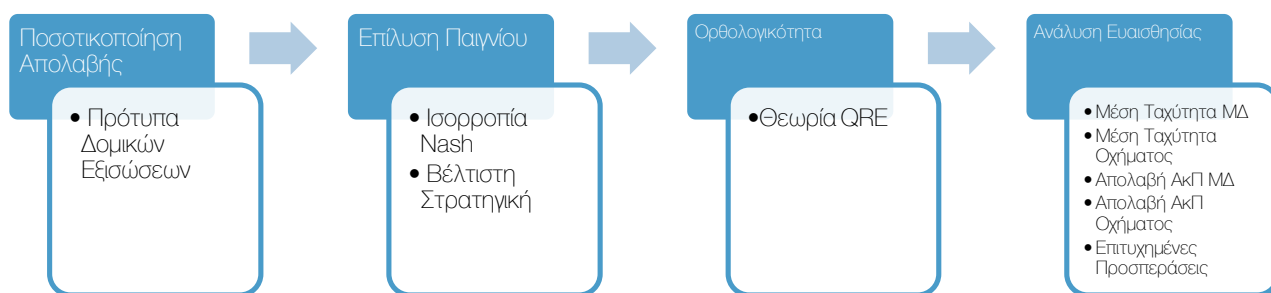


Εικόνα 25: Δέντρο απόφασης για Αριστερά ή Δεξιά.

6. Συνεργασία Μεταξύ Οδηγών

6.1. Εισαγωγή

Όπως διατυπώθηκε στα κρίσιμα ζητήματα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, πέρα από τα πρότυπα που περιγράφουν την οδηγική συμπεριφορά του μοτοσυκλετιστή ως προς το αν θα προσπεράσει και τη θέση του ως προς το όχημα που προσπερνάται, προκύπτει η ανάγκη προτυποποίησης της αλληλεπίδρασής του με τα υπόλοιπα οχήματα στην οδό (Διάγραμμα 5). Συγκεκριμένα, το δίκυκλο και το προπορευόμενο όχημα θεωρούνται δύο ορθολογικοί παίκτες που συμμετέχουν σε ένα ανταγωνιστικό παίγνιο με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απολαβής τους. Κάνοντας χρήση Προτύπων Δομικών Εξισώσεων, ορίζεται ένα νέο μέγεθος ως απολαβή των παικτών που ονομάζουμε «Άνεση Κατά την Προσπέραση» και περιγράφει την επιθυμία των οδηγών για άνετη, γρήγορη και ασφαλή μετακίνηση. Θέτοντας συγκεκριμένα όρια για τον ορισμό των συνθηκών συνεργασίας οι οδηγοί χωρίζονται σε συνεργάσιμους ή μη. Με τα παραπάνω δεδομένα, εξετάζεται η ύπαρξη ισορροπίας Nash και της βέλτιστης λύσης του παιγνίου. Έπειτα, κάνοντας χρήση της θεωρίας του Quantal Response Equilibrium (QRE), εξετάζονται τα πιθανά αίτια που οι οδηγοί δεν επιλέγουν πάντα την καλύτερη στρατηγική για αυτούς, με έμφαση στην αμφισβήτηση της ορθολογικότητάς τους. Τέλος, για την αναλυτικότερη διερεύνηση των συνθηκών συνεργασίας και το πως αυτές επιδρούν στα χαρακτηριστικά κίνησης των οχημάτων, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας και εξήγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτά.



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα ροής Προτυποποίησης Συνεργασίας

6.2. Ποσοτικοποίηση της «Άνεσης κατά την Προσπέραση»

Όπως περιγράφεται στο μεθοδολογικό υπόβαθρο της διατριβής, δημιουργούνται δύο διαφορετικά πρότυπα για την ποσοτικοποίηση της λανθάνουσας μεταβλητής που ορίστηκε ως «Άνεση κατά την Προσπέραση» (ΑκΠ). Συγκεκριμένα, το ένα αφορά στην ΑκΠ που αντιλαμβάνεται

ο μοτοσυκλετιστής κατά την προσπέραση, ενώ το δεύτερο στην ΑκΠ που αντιλαμβάνεται ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος.

Για την περίπτωση του ΜΔ, τρεις διαφορετικές μεταβλητές ορίζονται ως δείκτες στο πρότυπο SEM:

- η ταχύτητα του δικύκλου, που εκφράζει την επιθυμία του οδηγού του ΜΔ να οδηγήσει γρηγορότερα
- ο χωρικός διαχωρισμός μεταξύ των δύο οχημάτων, που εκφράζει την επιθυμία του οδηγού να αποφευχθεί κάποια σύγκρουση με το προπορευόμενο όχημα
- το άνοιγμα κατάντη που έχει διαθέσιμο ο μοτοσυκλετιστής για να ολοκληρώσει την προσπέραση

Για το προπορευόμενο όχημα οι δείκτες για το πρότυπο είναι:

- η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων, που εκφράζει την επιθυμία του Παικτη 2 να μην προσπερνάται με υπερβολικές ταχύτητες
- ο χωρικός διαχωρισμός από το προπορευόμενο όχημα, που εκφράζει ταυτόχρονα το άνοιγμα που έχει διαθέσιμο ο μοτοσυκλετιστής για να προσπεράσει
- Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητάς του, που εκφράζει την επιθυμία του οδηγού να μην μεταβάλλει τον τρόπο οδήγησής του για να ολοκληρωθεί η προσπέραση

Ο Πίνακας 12 δείχνει τους δείκτες καλής προσαρμογής των δύο προτύπων που τελικά επιλέγονται (Washington et al., 2010).

Πίνακας 12: Δείκτες Καλής Προσαρμογής των δύο Προτύπων για την Ποσοτικοποίηση της Άνεσης κατά την Προσπέραση για τα δύο οχήματα

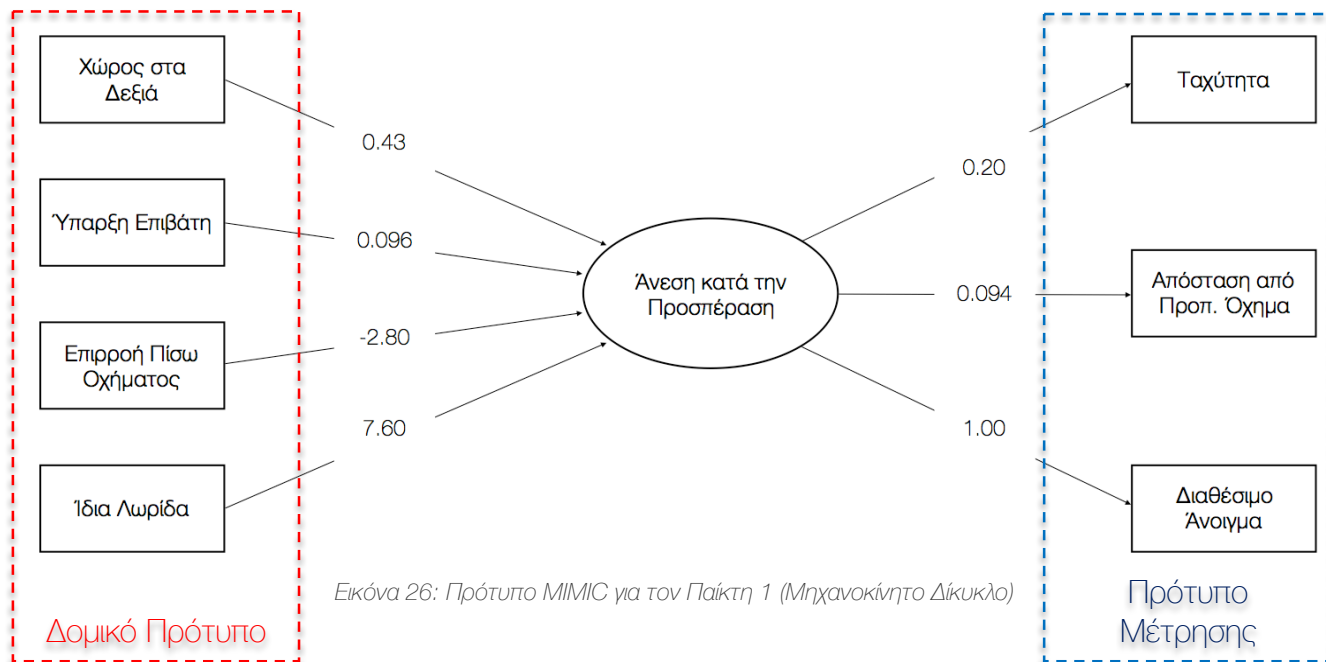
Fit statistic	Δείκτες για το Πρότυπο 1	Δείκτες για το Πρότυπο 2	Κριτήρια Αποδοχής
Likelihood ratio			
$\chi^2_{ms}(7)$	14,097	10,524	
$\chi^2(p > \chi^2)$ - Saturated	0,079	0,104	-
$\chi^2_{bs}(18)$	85,265	123,956	
$\chi^2(p > \chi^2)$ - Baseline	0,000	0,000	-
Population error			
RMSEA	0,054	0,042	< 0,05
90% CI, lower bound	0,000	0,000	< 0,05
upper bound	0,100	0,083	< 0,10
pclose	0,384	0,573	> 0,05
Information criteria			

AIC	8863,020	11953,221	-
BIC	8909,158	12002,070	-
Baseline comparison			
CFI	0,913	0,960	> 0,90
TLI	0,837	0,919	< 3,00
Size of residuals			
SRMR	0,037	0,026	<0,10
CD	0,547	0,623	-

Η ΑκΠ για το μηχανοκίνητο δίκυκλο υπολογίζεται κάνοντας χρήση του προτύπου που περιγράφεται στον Πίνακας 13 και παρουσιάζεται οπτικά στην Εικόνα 26. Όπως φαίνεται, ο διαθέσιμος χώρος στα δεξιά όπως κινείται το δίκυκλο αλλά και η τοποθέτηση των οχημάτων στην οδό επηρεάζουν σημαντικά την ΑκΠ του μοτοσυκλετιστή κατά την προσπέραση. Επίσης, αν και η ύπαρξη δεύτερου αναβάτη ή όχι στο δίκυκλο και η επιρροή του οχήματος που το πλησιάζει από πίσω δεν προέκυψε στατιστικά σημαντική, επιλέχθηκε να παραμείνουν στο πρότυπο αφού οι υπόλοιποι δείκτες βελτιώνονταν αισθητά. Παρόλα αυτά, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επεξηγηματικότητά του όσον αφορά το δομικό του μέρος. Όσον αφορά το πρότυπο μέτρησης, παρατηρείται ότι και οι τρεις μεταβλητές είναι στατιστικά σημαντικές ενώ το άνοιγμα που έχει διαθέσιμο ο μοτοσυκλετιστής παρουσιάζει την μεγαλύτερη επιρροή σε σχέση με τις άλλες δύο παραμέτρους.

Πίνακας 13: Πρότυπο MIMIC για τον Παίκτη 1 (Μηχανοκίνητο Δίκυκλο)

	Συντελεστής	Τυπ. Σφάλμα	z	p > z
Δομικό Πρότυπο				
CaO				
Χώρος από Δεξιά	0.433624	0.059117	7.33	0
Ύπαρξη Επιβάτη	0.095812	9.745284	0.01	0.992
Ίδια Λωρίδα	7.561032	1.996078	3.79	0
Επιρροή Πίσω Οχήματος	-2.81467	4.258247	-0.66	0.509
Πρότυπο Μέτρησης				
Διαθέσιμο Άνοιγμα				
ΑκΠ	1	(constrained)		
σταθερά	4.526533	3.010037	1.5	0.133
Ταχύτητα				
ΑκΠ	0.197194	0.087457	2.25	0.024
σταθερά	70.83506	1.772941	39.95	0
Απόσταση από Προπ.Όχημα				
ΑκΠ	0.093598	0.029785	3.14	0.002
σταθερά	6.522463	0.614703	10.61	0
LR test of model vs. saturated:		Prob > χ^2 = 0.0793		



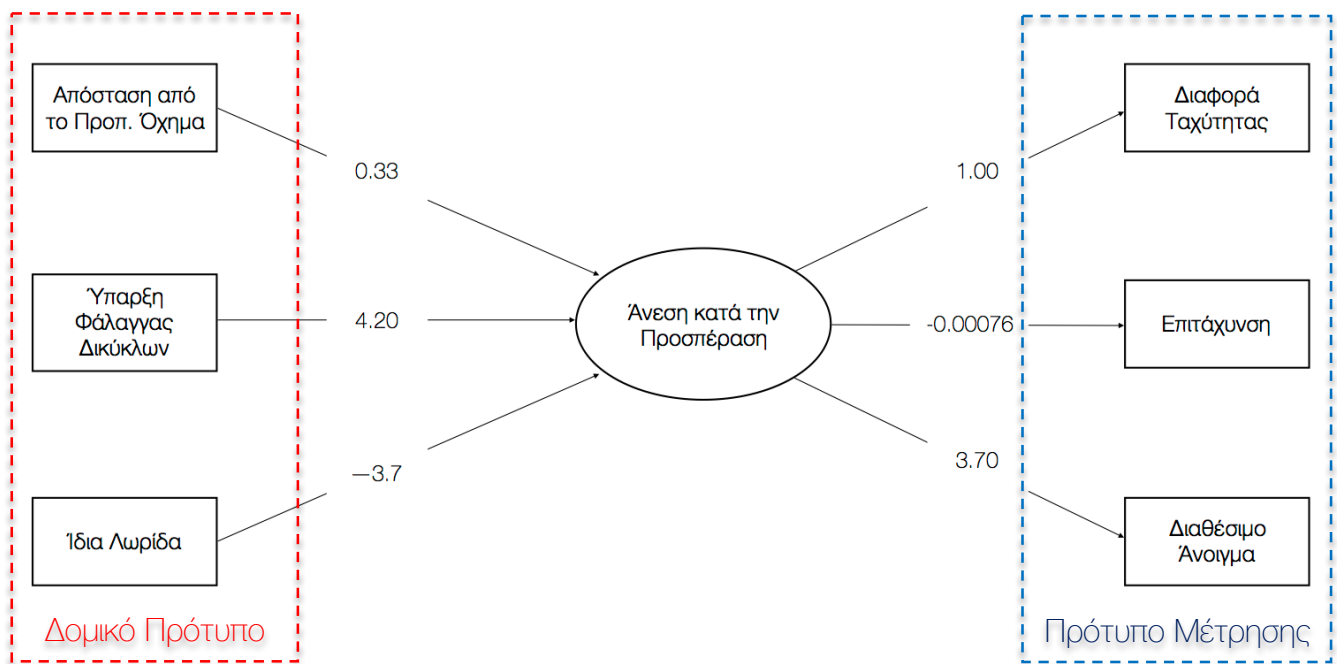
Η ΑκΠ για το προπορευόμενο όχημα υπολογίζεται κάνοντας χρήση του προτύπου που περιγράφεται στον Πίνακα 14 και παρουσιάζεται οπτικά στην Εικόνα 27. Όπως φαίνεται, η τοποθέτηση των οχημάτων στην οδό, η απόσταση που διατηρεί το δίκυκλο πριν την προσπέραση και η ύπαρξη ή όχι φάλαγγας δικύκλων επηρεάζουν σημαντικά την ΑκΠ για τον οδηγό του προπορευόμενου οχήματος. Επιπλέον, όσον αφορά τους δείκτες στο πρότυπο μέτρησης, παρατηρείται ότι η διαφορά ταχύτητας με το δίκυκλο και το άνοιγμα το οποίο έχει διαθέσιμο για προσπέραση επηρεάζουν ιδιαίτερα σημαντικά την αριθμητική τιμή της ΑκΠ. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι αν και η επιτάχυνση του οχήματος δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική, και άρα δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στην επεξηγηματικότητα του προτύπου, παρέμεινε ως δείκτης στο πρότυπο μέτρησης αφού οι δείκτες καλής προσαρμογής του προτύπου παρουσίαζαν καλύτερα αποτελέσματα από κάθε άλλο πρότυπο ενώ παράλληλα δεν επηρέαζε αρνητικά οποιοδήποτε άλλο δείκτη.

Πίνακας 14: Πρότυπο MIMIC για τον Παίκτη 2 (Προπορευόμενο Όχημα)

	Συντελεστής	Τυπ. Σφάλμα	z	p > z
Δομικό Πρότυπο				
CaO				
Απόσταση από Προπ. Όχημα	0.332468	0.088302	3.77	0
Υπαρξη Φάλαγγας Δικύκλων	-3.68198	1.507823	-2.44	0.015
Ίδια Λωρίδα	4.172238	0.697502	5.98	0
Πρότυπο Μέτρησης				
Διαφορά Ταχύτητας ΑκΠ	1	(constrained)		

σταθερά	13.17031	0.960458	13.71	0
Επιτάχυνση				
ΑκΠ	-0.00076	0.00709	-0.11	0.914
σταθερά	0.069841	0.033211	2.1	0.035
Διαθέσιμο Άνοιγμα				
ΑκΠ	3.709896	0.71599	5.18	0
σταθερά	24.75912	2.656587	9.32	0

LR test of model vs. saturated: Prob > χ^2 = 0.1042



Εικόνα 27: Πρότυπο MIMIC για τον Πάικτη 2 (Προπορευόμενο Όχημα)

Κάνοντας χρήση των αποτελεσμάτων από τα δύο αυτά πρότυπα MIMIC, υπολογίζεται η αριθμητική τιμή της ΑκΠ για κάθε οδηγό ανά προσπάθεια προσπέρασης. Έπειτα, όλες οι τιμές κανονικοποιούνται με εύρος 0-1, έτσι ώστε η «χειρότερη» περίπτωση να περιγράφεται από την ελάχιστη τιμή 0 ενώ η «καλύτερη» περίπτωση να περιγράφεται με ΑκΠ ίση με 1. Η μέση τιμή για την ΑκΠ για το ΜΔ είναι ίση με 0,4345 (± 0.19) ενώ για τον οδηγό του προπορευόμενου οχήματος είναι 0,5056 (± 0.18). Επιπλέον, διενεργήθηκαν t-test και F-test για να εξεταστεί η στατιστική σημαντικότητα μεταξύ των δύο μεγεθών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μέσοι όροι των δύο μεγεθών διαφέρουν σημαντικά ($t = -5.5837$, $df = 862.34$, $p\text{-value} = 3.155e-08$) ενώ οι διακυμάνσεις τους όπως αναμενόταν δεν διαφέρουν σημαντικά ($F = 1.0917$, $df = 432$, $p\text{-value} = 0.3622$).

Για να γίνει καλύτερη περιγραφή του νοήματος της αριθμητικής τιμής της ΑκΠ περιγράφονται παρακάτω δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις προσπέρασης και οι αντίστοιχες τιμές για τον κάθε οδηγό. Σε μία προσπάθεια προσπέρασης όπου ο οδηγός του δικύκλου φοράει

κράνος, δεν υπάρχει δεύτερο επιβάτης, κινείται στην ίδια λωρίδα με το προπορευόμενο όχημα με ταχύτητα 90km/h σε απόσταση 6 μέτρα, έχει διαθέσιμο χώρο στα δεξιά του και το διαθέσιμο άνοιγμά του είναι πάνω από 30 μέτρα έχει ΑκΠ ίση με 0.80. Για την ίδια περίπτωση, όπου δεν υπάρχει φάλαγγα δικύκλων, η διαφορά ταχύτητας είναι ίση με 25 km/h και το όχημα επιταχύνει με ρυθμό 0.1 m/s/s, η τιμή της ΑκΠ για τον οδηγό του προπορευόμενου οχήματος είναι ίση με 0.67.

6.3. Παίγνια για την Προτυποποίηση της Λήψης Απόφασης κατά την Προσπέραση

Για να εφαρμοστεί το παίγνιο υπό τις συνθήκες συνεργασίας που περιγράφονται στην Ενότητα 3, θα πρέπει να εισαχθούν σε αυτό οι απολαβές για τον κάθε παίκτη. Αρχικά, η κάθε προσπάθεια προσπέρασης ομαδοποιείται ανάλογα με τη στρατηγική που επέλεξε ο κάθε παίκτης.

Επειδή όπως αναφέρθηκε η θεώρηση της συνεργασίας μεταξύ των οδηγών δεν είναι σαφώς ορισμένη στη βιβλιογραφία, στη συγκεκριμένη διατριβή οι συνθήκες συνεργασίας ορίζονται με βάση τις διαθέσιμες μετρημένες μεταβλητές που προέκυψαν και με το σκεπτικό της αποφυγής επικίνδυνων καταστάσεων αλλά και τη διατήρηση της κανονικότητας στην οδήγησης.

Για το συγκεκριμένο παίγνιο οι συνθήκες συνεργασίας που ορίζονται ώστε το δίκυκλο να χαρακτηρίζεται ως μη συνεργάσιμο είναι οι εξής:

- Προσπαθεί να προσπεράσει ενώ ακολουθεί το προπορευόμενο όχημα στην ίδια λωρίδα και σε μικρή απόσταση. Βάσει στατιστικών ευρημάτων, η ελάχιστη απόσταση ορίζεται στα 4.95 μέτρα (Nguyen and Hanaoka, 2013). Θεωρείται ότι αν ένας μοτοσυκλετιστής ακολουθεί το όχημα σε μικρότερη απόσταση, επηρεάζει τον οδηγό του προπορευόμενου οχήματος λόγω μικρών χωρικών διαχωρισμών και μη δυνατότητα έκτακτων απότομων ελιγμών ή αλλαγής ταχύτητας.
- Προσπαθεί να προσπεράσει το προπορευόμενο όχημα από δεξιά. Όπως διαπιστώθηκε στο προηγούμενο πρότυπο, ο μοτοσυκλετιστής οφείλει να προσπερνάει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων από αριστερά εκτός κι αν οι συνθήκες δεν είναι κατάλληλες και μια προσπέραση από δεξιά είναι προτιμότερη. Παρόλ' αυτά, κάτι τέτοιο δεν συνίσταται ως η βέλτιστη επιλογή αφού για παράδειγμα, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, ο μοτοσυκλετιστής θα μπορούσε να μην ξεκινήσει τον ελιγμό προσπέρασης από δεξιά, αλλά να περιμένει να βελτιωθούν οι συνθήκες για να ολοκληρωθεί η προσπέραση με ελιγμό από αριστερά.
- Ο μοτοσυκλετιστής δεν φοράει κράνος, ως ένα είδος μη ορθολογικότητας, αφού ένας οδηγός που δεν βάζει σε προτεραιότητα την ασφάλειά του, δύσκολα θα επιλέξει να συνεργαστεί για το κάποιο κοινό καλό.

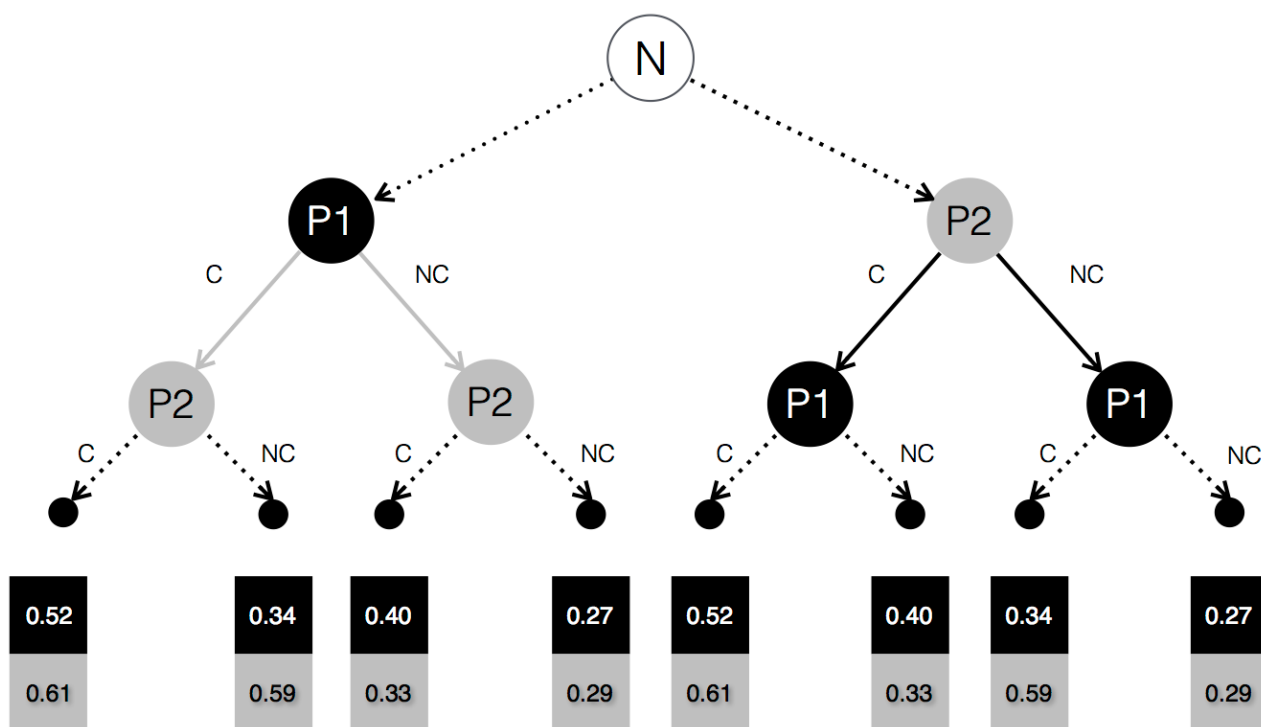
Για το προπορευόμενο όχημα οι συνθήκες που ορίζονται και το χαρακτηρίζουν ως μη συνεργάσιμο είναι οι εξής:

- Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3 αλλά σε προηγούμενες έρευνες (Barmounakis et al., 2017, 2015, 2014), το διαθέσιμο άνοιγμα που αφήνει ο οδηγός του οχήματος στο μοτοσυκλετιστή είναι ιδιαίτερης σημασίας για το αποτέλεσμα της προσπέρασης. Παρόλ' αυτά, το ελάχιστο μήκος που απαιτείται δεν έχει ποσοτικοποιηθεί έως τώρα στη βιβλιογραφία, λόγω των περιορισμών που έχουν αναφερθεί. Ως εκ τούτου, επεκτείνεται η χρήση της απόστασης ασφαλείας 4.95 μέτρων που αναφέρεται στην (Nguyen and Hanaoka, 2013) με τις κατάλληλες θεωρήσεις και παραδοχές. Συγκεκριμένα, το δίκυκλο θα πρέπει να διατηρεί απόσταση ασφαλείας 4.95 και από το όχημα που προσπερνάται αλλά και από το προπορευόμενο αυτού, δηλαδή θα πρέπει να υπάρχει ένα κενό τουλάχιστον ίσο με 9.90 μέτρα. Ταυτόχρονα, αν προστεθεί το μέσο μήκος ενός ΜΔ που είναι ίσο με 2.00 μέτρα (Neufert et al., 2012), τότε η διαθέσιμη απόσταση για το δίκυκλο θα πρέπει να μην είναι μικρότερη από 11.90 μέτρα.
- Η διαφορά των ταχυτήτων των δύο οχημάτων είναι μικρότερη από 7.22 km/h. Η συγκεκριμένη τιμή, προέκυψε ως το βασικό όριο από τα Δέντρα Αποφάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για να καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό την έκβαση της προσπέρασης.
- Το προπορευόμενο όχημα δεν επιταχύνει αφού κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διάρκεια της προσπέρασης, κατάσταση μη επιθυμητή από τους δύο οδηγούς.

Ως εκ τούτου, δημιουργούνται τέσσερις ομάδες προσπεράσεων.

- Και οι δύο οδηγοί συνεργάζονται (C,C)
- Κανένας οδηγός δεν συνεργάζεται (NC,NC)
- Το δίκυκλο δεν συνεργάζεται ενώ το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται (NC,C)
- Το δίκυκλο συνεργάζεται ενώ το προπορευόμενο όχημα δεν συνεργάζεται (C,NC)

Κάνοντας χρήση της μέσης τιμής του μεγέθους της ΑκΠ ως απολαβή για κάθε σετ στρατηγικών δημιουργείται η δενδρική μορφή παιγνίου που φαίνεται στην Εικόνα 28. Η μέση τιμή της ΑκΠ όταν και οι δύο παίκτες συνεργάζονται είναι ίση με 0.52 για τον Παίκτη 1 (P_1) και 0.61 για τον Παίκτη 2 (P_2). Το μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύει τον Παίκτη 1 και το γκρι τον Παίκτη 2.



Εικόνα 28: Το παίγνιο που διαμορφώνεται σε δενδρική μορφή με τις αντίστοιχες απολαβές

Όπως φαίνεται, μετά την Επαναλαμβανόμενη Απαλοιφή Κυριαρχούμενων Στρατηγικών (A.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων) η κυρίαρχη στρατηγική προκύπτει όταν και τα δύο οχήματα συνεργάζονται. Ταυτόχρονα, αυτό το σετ στρατηγικών αποτελεί και την Ισορροπία Nash για το συγκεκριμένο παίγνιο. Παρόλ' αυτά, όπως προκύπτει από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, ο οδηγός του δικύκλου επιλέγει να συνεργαστεί στο 64.9% των περιπτώσεων ενώ ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος στο 73%. Η ερώτηση λοιπόν που προκύπτει είναι γιατί κάποιος οδηγός να ακολουθήσει μία διαφορετική στρατηγική από την κυρίαρχη, ένα ακόμη παράδοξο που έρχεται να προστεθεί στα ήδη καταγεγραμμένα στη διεθνή βιβλιογραφία (Axelrod, 1984).

Κάποιος θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι το προπορευόμενο όχημα δεν θα συνεργαστεί με το δίκυκλο, δηλαδή δεν θα του αφήσει το απαραίτητο άνοιγμα για να προσπεράσει, αφού δεν ενδιαφέρεται για την απολαβή που θα λάβει μιας και τελικώς δεν είναι εκείνος ο οποίος εκτελεί τον ελιγμό. Ομοίως, ο οδηγός του δικύκλου μπορεί να ακολουθήσει μία μη συνεργατική στρατηγική ώστε με την πίεση που ασκεί στον οδηγό του προπορευόμενου οχήματος να εκμαιεύσει την προσπέραση, ενδιαφερόμενος για το βραχυπρόθεσμο του όφελος.

Στον Πίνακα 15 αποτυπώνεται ο αριθμός των προσπεράσεων που κατεγράφησαν, όπως επίσης ο αριθμός και το ποσοστό επιτυχημένων προσπαθειών για προσπέραση.

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας επιτυχημένων προσπεράσεων ανά ομάδα στρατηγικών

Σετ Επιλεγμένων Στρατηγικών	Αριθμός Προσπαθειών για Προσπέραση	Επιτυχημένες Προσπεράσεις	Ποσοστό Επιτυχημένων Προσπεράσεων
(NC, NC)	54	30	56%
(NC, C)	98	73	74%
(C, NC)	63	25	40%
(C, C)	218	178	82%

Είναι φανερό ότι ένας οδηγός μπορεί να επιλέξει να μην είναι συνεργάσιμος, αλλά να ολοκληρώσει την προσπέραση. Παρόλ' αυτά, όπως παρατηρείται, όταν ο οδηγός του δικύκλου επιλέξει μία συνεργατική στρατηγική, τότε είναι πιο πιθανό για ολοκληρώσει την προσπέραση απ' ότι αν επιλέξει μία μη-συνεργατική στρατηγική. Όπως αναμενόταν, ιδιαίτερα χαμηλά ποσοστά παρατηρούνται όταν το δίκυκλο συνεργάζεται, ενώ το προπορευόμενο όχημα ακολουθεί μια μη συνεργατική στρατηγική. Αυτό συμβαίνει διότι ο ελιγμός της προσπέρασης χαρακτηρίζεται ως υψηλού ρίσκου και οι συνεσταλμένοι οδηγοί δεν θα τον επιχειρήσουν αν ο άλλος οδηγός δεν συνεργάζεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν το δίκυκλο συνεργαστεί και το άλλο όχημα όχι (NC-C), τότε παρουσιάζεται υψηλό ποσοστό προσπεράσεων. Αυτό το εύρημα δείχνει ότι οι οδηγοί των ΜΔ ενδέχεται να επιλέξουν μία πιο επιθετική συμπεριφορά κατά την προσπέραση, πιθανώς επειδή ακόμη κι αν ρισκάρουν κατά τη διάρκεια αυτής, ενδιαφέρονται για το βραχυπρόθεσμο όφελος, που τελικά είναι η ολοκλήρωσή της.

Παράλληλα, όπως φαίνεται στον Πίνακας 16 η μέση ταχύτητα για το προπορευόμενο όχημα (Παίκτης 2) παραμένει στα ίδια επίπεδα, εκτός την περίπτωση που το ΜΔ (Παίκτης 1) δεν συνεργάζεται. Για το ΜΔ η μέση ταχύτητα του είναι κατά ΜΟ μεγαλύτερη όταν ο αντίπαλος παίκτης συνεργάζεται. Παρόλ' αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή για το δίκυκλο παρουσιάζεται όταν και τα δύο οχήματα συνεργάζονται.

Πίνακας 16: Μέσες Ταχύτητες Οχημάτων ανά ομάδα στρατηγικών

Σετ Επιλεγμένων Στρατηγικών	Μέση Ταχύτητα Παίκτη 1	Μέση Ταχύτητα Παίκτη 2
(NC, NC)	69.2	60.6
(NC, C)	75.3	60.4
(C, NC)	70.5	56.8
(C, C)	79.4	60.5

Επιπλέον, ένας οδηγός δικύκλου ίσως επιλέξει τη μη συνεργατική στρατηγική, επειδή απολαμβάνει την επικίνδυνη οδήγηση, τα κλειστά περάσματα, τις απότομες επιταχύνσεις και την

αδρεναλίνη σε αντίθεση με τον οδηγό που θα επιλέξει την ασφάλεια και τις υψηλές ταχύτητες. Παρόμοια ευρήματα έχουν διατυπωθεί και σε έρευνα που επικεντρώνεται στην αντίληψη του οδηγικού ρίσκου (Dionne et al., 2007), όπου οι συγγραφείς καταλήγουν ότι οι οδηγοί είναι πιο προσεκτικοί όταν έχουν μία βελτιωμένη αντίληψη του ρίσκου σε αντίθεση με εκείνους που το υποεκτιμούν και τείνουν να ρισκάρουν περισσότερο. Αντίστοιχη συμπεριφορά επιλογής επικίνδυνης οδηγικής συμπεριφοράς έχει επίσης συναντηθεί στις (Andersson and Lundborg, 2007; Rubinfeld and Rodgers, 1992).

Αυτό που είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι ότι τις περισσότερες φορές τουλάχιστον ένας παίκτης επιλέγει να συνεργαστεί με τον άλλον, αφού στο 50% των περιπτώσεων και οι δύο συνεργάστηκαν ενώ στο 70% των περιπτώσεων συνεργάστηκε τουλάχιστον ένας από τους δύο παίκτες. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αν και οι δύο παίκτες συνήθως επιζητούν το μακροπρόθεσμο όφελός τους, ενδέχεται να παρουσιάσουν εναλλαγές στην οδηγική συμπεριφορά τους. Σε αυτό το εύρημα έχει δοθεί έμφαση και σε άλλες ερευνητικές προσπάθειες που μελέτησαν μικροσκοπικά φαινόμενα (Laval, 2011; Orfanou et al., 2012; Papacharalampous and Vlahogianni, 2014).

Από την οπτική γωνία της Θεωρίας Παιγνίων, η βιβλιογραφία διατυπώνει ότι «πολύ συχνά η θεωρία παιγνίων προβλέπει μια συμπεριφορά που μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη φυσιολογική και μη λογική» (Papadimitriou and Yannakakis, 1994). Όπως αποδεικνύεται, ανεξάρτητα από την ισορροπία του συγκεκριμένου παιγνίου που προβλέπει συνεργασία μεταξύ των δύο παικτών, τα στοιχεία από τα πραγματικά δεδομένα δείχνουν ότι οι οδηγοί ενδέχεται να παρουσιάζουν μία εγωιστική και αντικοινωνική συμπεριφορά. Ως εκ τούτου, αντί να επιλέξουν τη βέλτιστη για εκείνους στρατηγική, επιλέγουν μία μη συνεργατική στρατηγική στοχεύοντας στα προσωπικά βραχυπρόθεσμα οφέλη τους.

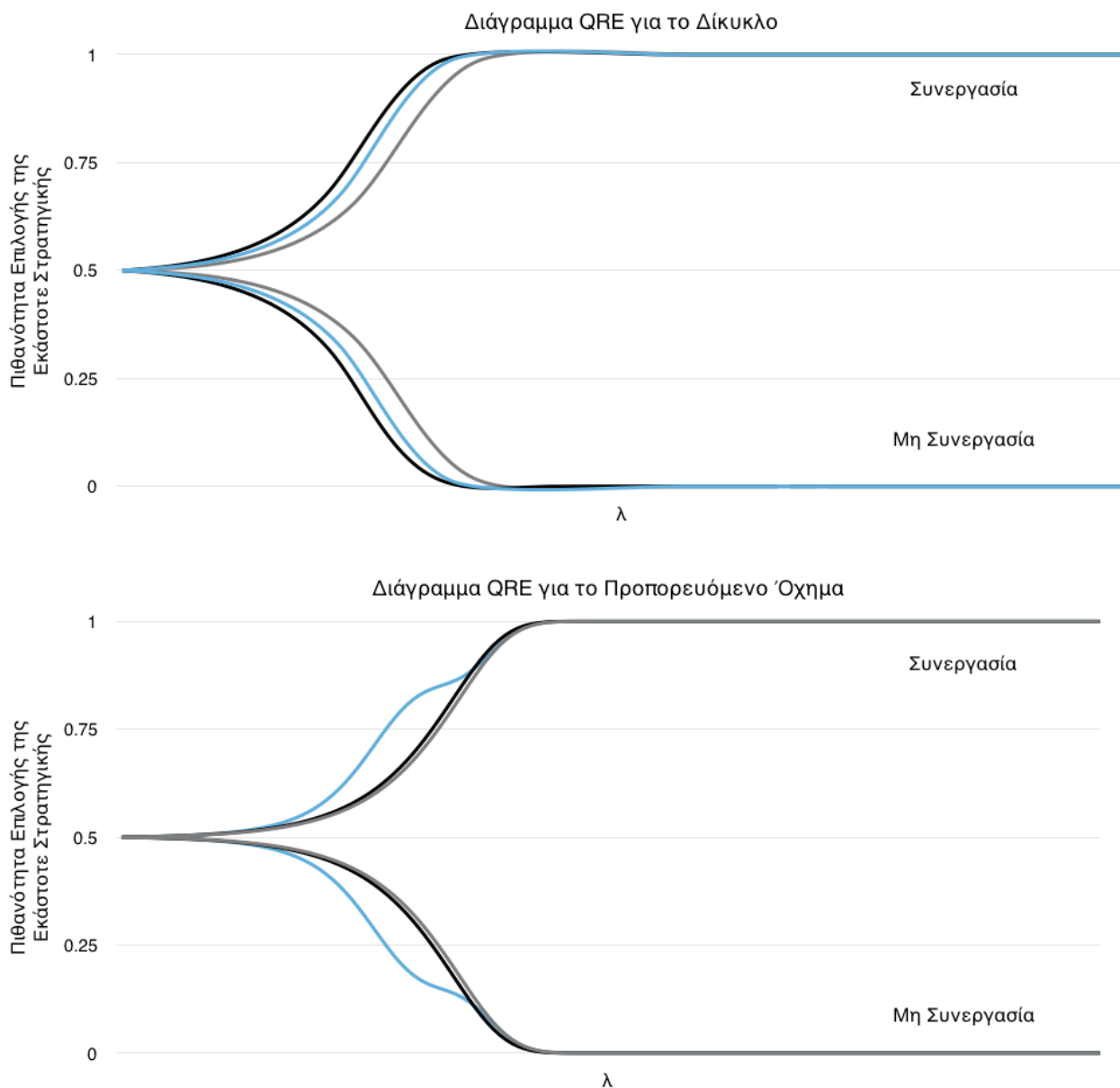
6.4. Ανάλυση ορθολογικότητας επιλογών των παικτών

Οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ της επιλογής στρατηγικής σε κάποιες περιπτώσεις και της κυρίαρχης στρατηγικής του παιγνίου που παρουσιάστηκε προηγουμένων μπορούν να εξηγηθούν αν λάβει κανείς υπόψη του τη θεωρία της περιορισμένης ορθολογικότητας των παικτών που συμμετέχουν σε ένα παίγνιο (Simon, 2000). Σε αυτό το πλαίσιο, για να εξηγηθούν οι επιλογές των οδηγών των δικύκλων κατά την προσπέραση, όπως επίσης και οι αλληλεπιδράσεις τους με την υπόλοιπη κυκλοφορία, θα πρέπει να δοθεί έμφαση στη διαδικασία λήψης της απόφασης και στην ποιότητα του αποτελέσματος. Σε ένα παίγνιο προσπέρασης δεν είναι γνωστές ποιες άλλες ιδιότητες και δυνατότητες χρησιμοποιεί ο οδηγός για να πάρει την απόφασή του, όπως για

παράδειγμα να έχει την απαραίτητη γνώση για το φαινόμενο, να επεξεργαστεί τις πιθανές επιπτώσεις από την επιλογή του, πόσο μάλλον για να μεγιστοποιήσει την προσωπική του απολαβή. Παρόμοια συμπεράσματα παρουσιάζονται και σε σχετική έρευνα για τη χρήση εξοπλισμού ασφαλείας (Blomquist, 1991). Ως εκ τούτου, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να διερευνηθούν η δυναμική αλλαγή στην οδηγική συμπεριφορά των παικτών, παρέχοντας μία σαφέστερη εικόνα στον ορισμό της ορθολογικότητάς τους. Για παράδειγμα, θα πρέπει να διερευνηθεί αν η υπόθεση των ανεξάρτητων αποφάσεων είναι σωστή και αν ο οδηγός έχει μακρά ή βραχεία μνήμη που επικαλείται πριν αποφασίσει να προσπεράσει.

Με βάση τη θεωρία του QRE που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (3.6. Έλεγχος Συνθηκών Συνεργασίας) η παράμετρος λ μπορεί να δώσει σημαντικές ενδείξεις στον τρόπο με τον οποίο ο εκάστοτε οδηγός επιλέγει τη στρατηγική του (McKelvey and Palfrey, 1995). Στην περίπτωση της προσπέρασης των μοτοσυκλετιστών υποδεικνύεται ότι η λ σχετίζεται με την εκπαίδευση και την εμπειρία τους, δηλαδή αφενός το κατά πόσο οι παίκτες αντιλαμβάνονται τι είναι καλύτερη απολαβή για αυτούς, αφετέρου το πόσες φορές έχουν παίξει το ίδιο παίγνιο. Ως εκ τούτου, μικρές τιμές της τιμής λ δείχνουν μεγαλύτερα ποσοστά της περίπτωσης της «κρυφής απολαβής», του λάθους των παικτών και το φραγμό στην ορθολογικότητά τους. Αντίθετα, μεγάλες τιμές του λ θα μπορούσαν να εξηγηθούν σαν καταστάσεις όπου ο παίκτης είναι πλήρως ορθολογικός, έχει παίξει το παίγνιο αρκετές φορές ώστε να γνωρίζει τι είναι σωστό και τι λάθος και τι θα του προσδώσει τη μεγαλύτερη δυνατή απολαβή. Η λεπτομερής ανάλυση της παραμέτρου λ θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού για παράδειγμα η δυνατότητα ελέγχου και επέμβασης στην τιμή της λ θα μπορούσε να αποτελέσει το θεμέλιο λίθο για το σχεδιασμό ενός Έξυπνου Συστήματος υποβοήθειας στη διαδικασία της προσπέρασης.

Κάνοντας χρήση της προηγούμενης βάσης δεδομένων και του αλγορίθμου που περιγράφεται στην (Turocy, 2009), οι δύο παίκτες εκπαιδεύονται στο να επιλέγουν τη βέλτιστη στρατηγική τους μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων του παιγνίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 29 (McKelvey, Richard D., McLennan, Andrew M., Turocy, 2016), όπου με μπλε χρώμα σημειώνεται όταν το εκάστοτε όχημα παίζει πρώτο, ενώ με τις αποχρώσεις του μαύρου όταν παίζει δεύτερο. Όσον αφορά στη διαδικασία εκπαίδευσης του δικύκλου να επιλέξει τη βέλτιστη στρατηγική, φαίνεται ότι όταν αυτό εκπαιδεύεται πιο γρήγορα προς την καλύτερη στρατηγική όταν «παίζει» δεύτερο και το άλλο όχημα έχει επιλέξει συνεργασία. Οι υπόλοιπες καμπύλες δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, γεγονός που δείχνει ότι ο μοτοσυκλετιστής εκπαιδεύεται με παρόμοιο ρυθμό στο να επιλέγει τη συνεργατική λύση.



Εικόνα 29: Διαγράμματα QRE για το δίκυκλο και το προπορευόμενο όχημα

Αντίθετα, στο προπορευόμενο όχημα ξεχωρίζει η περίπτωση που παίζει πρώτο, αφού η καμπύλη της πιθανότητας είναι ιδιαίτερα απότομη προς τη συνεργατική λύση. Η μικρή κάμψη που παρατηρείται οφείλεται στις δοκιμές του QRE όπου ο παίκτης ανά τακτά χρονικά διαστήματα δοκιμάζει κάποια διαφορετική στρατηγική πέραν της βέλτιστης, όμως όπως φαίνεται επιστρέφει στη λύση της συνεργασίας. Όταν το προπορευόμενο όχημα παίζει δεύτερο, τότε φαίνεται ότι ο ρυθμός εκπαίδευσης προς τη συνεργασία δεν διαφέρει σημαντικά.

6.5. Έλεγχος Στρατηγικών για την καθοδήγηση των Οδηγών

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω αναλύσεις, οι οδηγοί δεν είναι πάντα σε θέση να γνωρίζουν τη βέλτιστη στρατηγική για αυτούς. Ακόμα όμως κι αν τη γνωρίζουν, δεν είναι σίγουρο ότι θα την επιλέξουν και με ποια κριτήρια. Η διαδικασία λήψης της απόφασής τους γίνεται ακόμη δυσκολότερη όταν κάποιος δεν γνωρίζει τη στρατηγική που ακολουθεί ο «αντίπαλός» του αφού μπορεί να προκληθεί μεγαλύτερη αβεβαιότητα για την τελική του απολαβή. Από το παίγνιο που διαμορφώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτει ότι η πλειοψηφία των οδηγών επιλέγει τη συνεργασία ως στρατηγική αφού μέσω αυτής απορρέουν μεγαλύτερες απολαβές όσον αφορά το προσωπικό όφελος του κάθε οδηγού.

Σε ένα όμως κυκλοφοριακό περιβάλλον όπου τα οχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους και με την υποδομή, οι δυνατότητες που ανοίγονται για τη διαχείριση της κυκλοφορίας είναι τεράστιες. Για παράδειγμα, ο διαχειριστής ενός οδικού δικτύου θα μπορεί να μεταβάλλει δυναμικά τις συνθήκες συνεργασίας αλλά και τον τρόπο με τον οποίο ορίζονται αυτές με μακροσκοπικά κριτήρια που ελέγχονται από τον ίδιο. Οι μεταβολές, θα μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες (αυξάνοντας/μειώνοντας τη μέση ταχύτητα των οχημάτων), σε αριθμό προσπεράσεων (προωθώντας ή μη τις προσπεράσεις των μοτοσυκλετιστών) ή/και δημιουργώντας ένα πιο ασφαλές περιβάλλον για τα δίκυκλα και τα οχήματα που τα περιβάλλουν (αυξάνοντας ή μη την Άνεση κατά την Προσπέραση που αισθάνονται). Το πόσο αυστηρές ή μη είναι οι συνθήκες που ορίζει κάποιος για τη συνεργασία μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά τα παραπάνω μεγέθη.

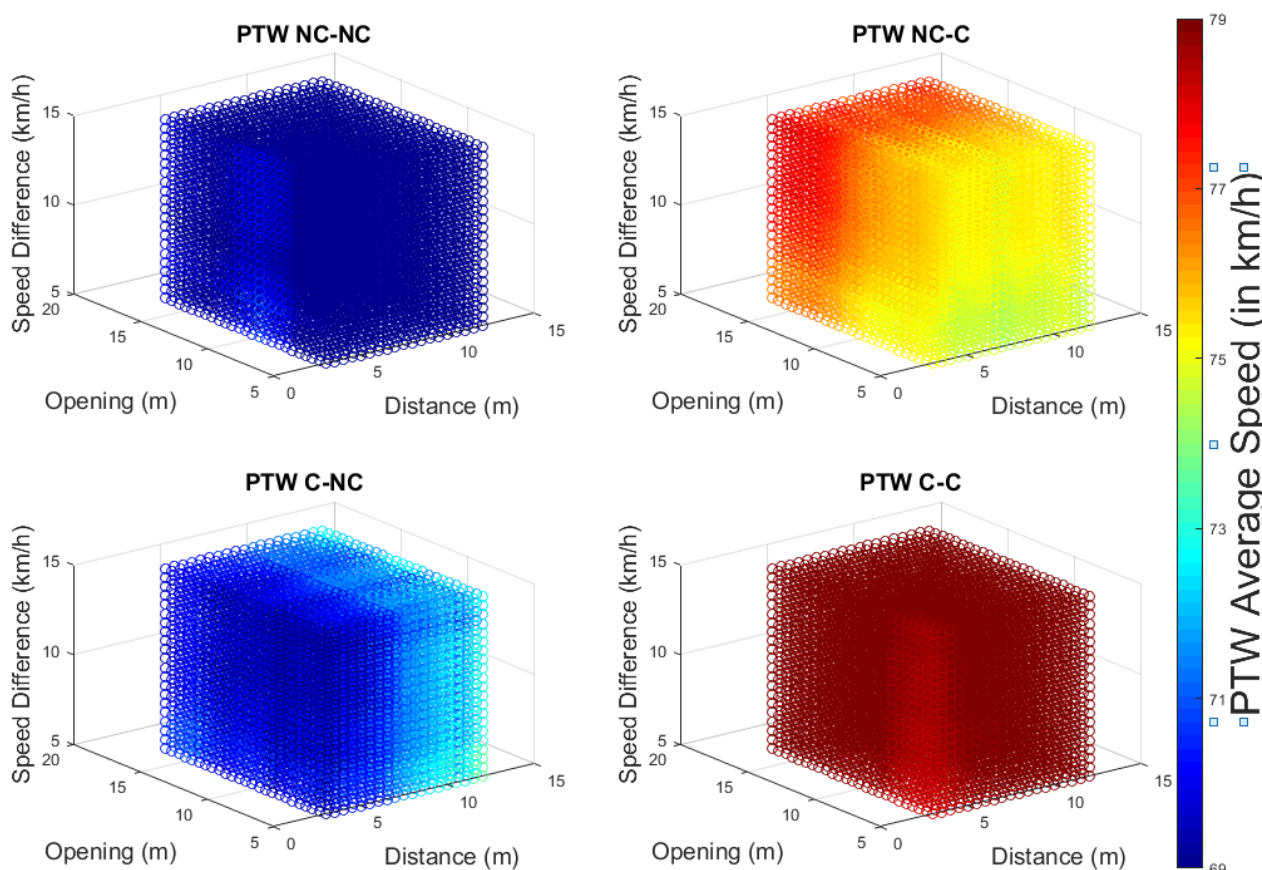
Για την περαιτέρω διερεύνηση της συγκεκριμένης υπόθεσης γίνεται μία Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis) στις συνθήκες συνεργασίας που ορίστηκαν στο προηγούμενο παίγνιο. Συγκεκριμένα, το παίγνιο που εξετάστηκε προηγουμένως με συγκεκριμένα ποσοτικοποιημένα αριθμητικά όρια, επαναλαμβάνεται έχοντας διαφορετικά όρια σε κάθε περίπτωση στις αριθμητικές τιμές των συνθηκών συνεργασίας που ορίζονται. Οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζονται είναι:

- Η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων (distance), που παίρνουν τιμές από 3m έως 12m με βήμα 50cm
- Το άνοιγμα που έχει διαθέσιμο ο μοτοσυκλετιστής (opening), που παίρνει τιμές από 5m έως 17m με βήμα 50cm
- Η διαφορά ταχυτήτων μεταξύ των δύο οχημάτων (speedThreshold), που παίρνει τιμές από 5 km/h έως 15km/h με βήμα 0.50 km/h.

Έπειτα, για κάθε διαφορετική τριάδα συνθηκών, διαμορφώνεται ένα ίδιας μορφής παίγνιο με το αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως, ενώ για κάθε ένα από τα 9.975 διαφορετικά παίγνια υπολογίζονται απολαβές κάνοντας χρήση των μέσων ταχυτήτων, βάσει του μεγέθους Άνεση κατά την Προσπέραση και του ποσοστού επιτυχημένων προσπεράσεων ανά ομάδα στρατηγικών. Για την καλύτερη αξιολόγησή τους, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα 4 διαστάσεων, όπου στον άξονα x αποτυπώνεται το όριο στη μεταβλητή distance, στον άξονα y το όριο της μεταβλητής opening και στο z το όριο της μεταβλητής speed difference. Τέλος, η τέταρτη διάσταση αποτυπώνει το εκάστοτε εξεταζόμενο μέγεθος σε ενιαία χρωματική κλίμακα, για να αποτυπωθούν καλύτερα οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών σετ στρατηγικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία στον τρισδιάστατο χώρο δεν είναι γεμισμένα με χρώμα, όμως τονίζεται μονάχα η περιφέρειά τους για να μπορέσουν να αποκαλυφθούν πιθανές διαφορετικές αποχρώσεις στο εσωτερικό του ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου που δημιουργείται.

6.5.1. Διερεύνηση Μέσης Ταχύτητας ΜΔ ανά σετ στρατηγικών

Στο Διάγραμμα 6 το αριστερό μέρος του έχει μπλε και έντονα μπλε αποχρώσεις ενώ το δεξί κίτρινες και έντονα κόκκινες αποχρώσεις. Η χρωματική κλίμακα στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιπροσωπεύει τη μέση ταχύτητα του ΜΔ και όπως φαίνεται, στις περιπτώσεις που και τα δύο οχήματα συνεργάζονται μεταξύ τους, η μέση ταχύτητά του είναι πάντα μεγαλύτερη από την περίπτωση που δεν συνεργάζεται κανένα από τα δύο οχήματα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μία αύξηση στη μέση ταχύτητα του δικύκλου κατά 10km/h που ισοδυναμεί με 16.6% σε σχέση με τις συνθήκες μη συνεργασίας. Ουσιαστικά, το συμπαγές χρώμα των δύο ορθογώνιων παραλληλεπιπέδων στη διαγώνιο, είναι μία σημαντική ένδειξη για το πως η μη εγωιστική συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες ταχύτητες, ανεξαρτήτως του πόσο αυστηρός ή όχι είναι κάποιος με τις συνθήκες συνεργασίας που ορίζονται.



Διάγραμμα 6: Μέση Ταχύτητα ΜΔ ανά ομάδα στρατηγικών

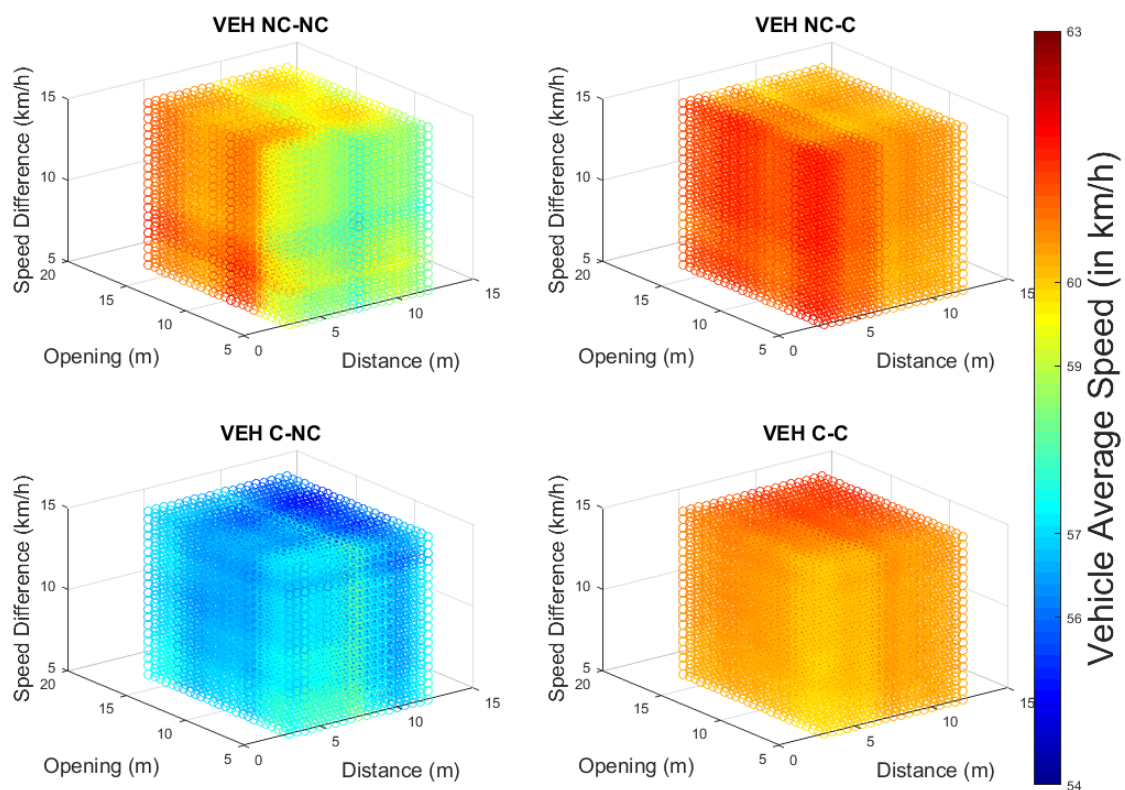
Επίσης, παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις όπου το προπορευόμενο όχημα δεν συνεργάζεται με το ΜΔ, οι ταχύτητες του δεύτερου είναι χαμηλότερες σε σχέση με όταν το πρώτο συνεργάζεται. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι όταν το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται τότε η μέση τιμή της ταχύτητας τού δικύκλου παρουσιάζει αύξηση τουλάχιστον 6 km/h που ισοδυναμεί με 10% σε σχέση με τις συνθήκες μη συνεργασίας. Όπως αναμενόταν, η μέση ταχύτητα του ΜΔ αυξάνεται όσο μεγαλώνουν τα όρια συνεργασίας, εκτός την περίπτωση που και οι δύο οδηγοί δεν συνεργάζονται όπου αποτυπώνονται χαμηλές ταχύτητες ανεξαρτήτως των ορίων ταχύτητας.

Αυτό που προκαλεί επίσης ενδιαφέρον είναι οι περιπτώσεις όπου το δίκυκλο δεν συνεργάζεται σε αντίθεση με το προπορευόμενο όχημα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι σε μειωμένες τιμές του διαθέσιμου ανοίγματος, οι ταχύτητες αυξάνονται ακόμη και για μεγαλύτερες τιμές της απόστασης με το προπορευόμενο όχημα, γεγονός που αποτυπώνει την επιθετική οδήγηση που μπορεί να ακολουθήσει ο μοτοσυκλετιστής. Επιπλέον, στην περίπτωση που το δίκυκλο συνεργάζεται, ενώ το προπορευόμενο όχημα ακολουθεί μια μη συνεργατική συμπεριφορά, παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές της απόστασης μεταξύ των δύο οχημάτων οι ταχύτητες είναι παρόμοιες με αυτές που αναπτύσσονται σε καταστάσεις συνεργασίας. Αυτό δείχνει ότι όταν το

δίκυκλο κρατάει αποστάσεις από ένα όχημα που δε συνεργάζεται, τότε μπορεί να έχει υψηλές ταχύτητες.

6.5.2. Διερεύνηση Μέσης Ταχύτητας Προπορευόμενου οχήματος

Στα διαγράμματα που φαίνονται στο Διάγραμμα 7 διαμορφώνονται οι εναλλαγές στη μέση ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος αναλόγως την ομάδα στρατηγικών που επιλέγεται και από τους δύο παίκτες. Αρχικά φαίνεται ότι όταν το προπορευόμενο όχημα δε συνεργάζεται, τότε έχει χαμηλότερες ταχύτητες σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, αφού τα δύο αριστερά διαγράμματα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν πράσινες και μπλε αποχρώσεις. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου εκείνο επιλέγει να μη συνεργαστεί και το δίκυκλο συνεργάζεται, φαίνεται ότι έχει χαμηλότερες ταχύτητες από κάθε άλλη περίπτωση (έντονα μπλε αποχρώσεις καθόλη την έκταση του σετ C-NC). Συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση, η μείωση της μέσης ταχύτητάς του σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου εκείνο συνεργάζεται μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 6 km/h που ισοδυναμεί με 10%. Αντίθετα, όταν το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται με το ΜΔ, η μέση ταχύτητά του είναι αυξημένη ενώ το εύρος των ταχυτήτων είναι από 60km/h έως 63km/h.



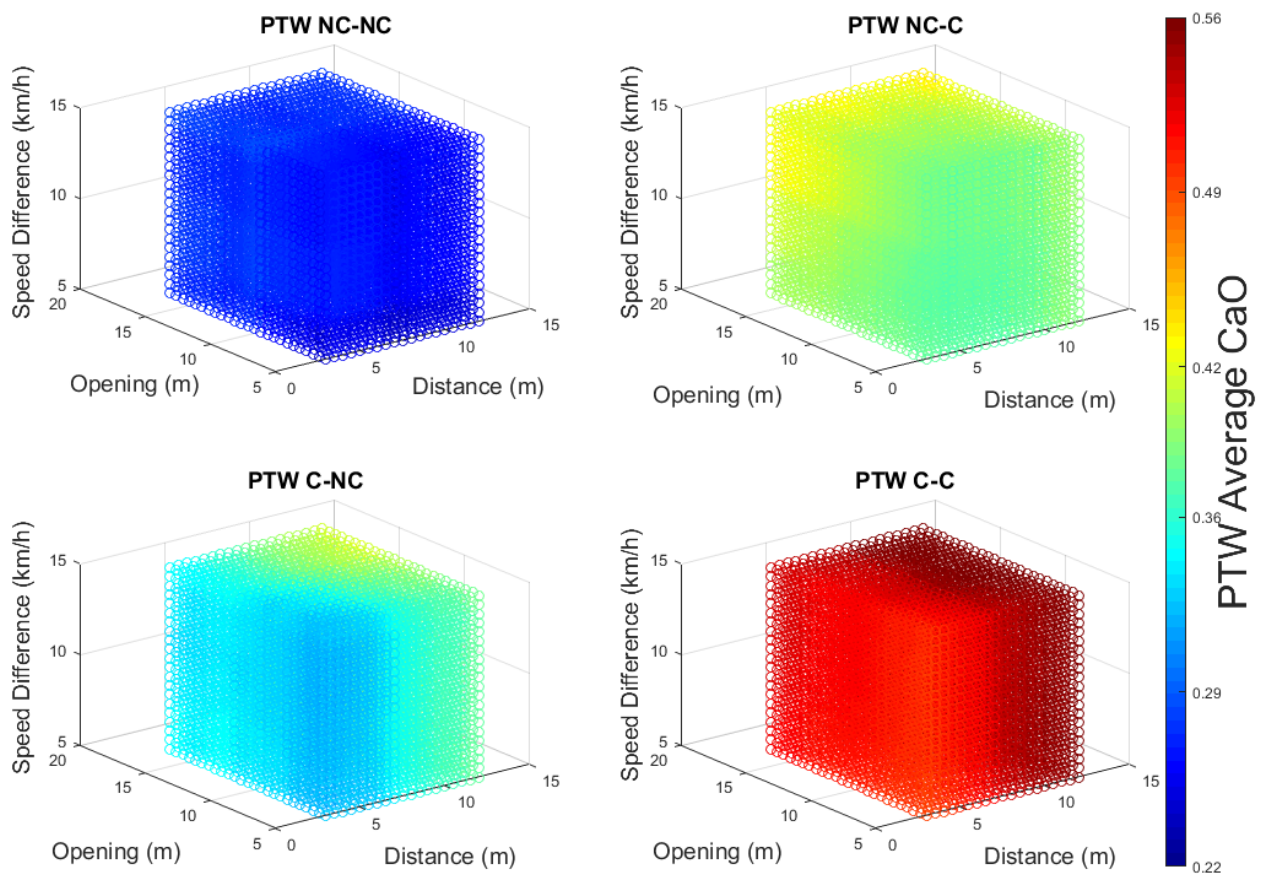
Διάγραμμα 7: Μέση ταχύτητα προπορευόμενου οχήματος ανά ομάδα στρατηγικών

6.5.3. Διερεύνηση Απολαβής «Άνεσης κατά την Προσπέραση» για το Δίκυκλο

Στο Διάγραμμα 8 εμφανίζονται οι διαφορές στην απολαβή του παίκτη με βάση το μέγεθος της «Άνεσης κατά την Προσπέραση» ανά ομάδα στρατηγικών. Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ότι στις περιπτώσεις που οι δύο οδηγοί ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά, παρουσιάζονται οι δύο ακραίες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, αποτυπώνονται οι υψηλότερες τιμές απολαβής για το δίκυκλο όταν τα δύο οχήματα συνεργάζονται μεταξύ τους (έντονα κόκκινες αποχρώσεις), ενώ οι χαμηλότερες όταν κανένα από τα δύο δεν συνεργάζονται (έντονα μπλε αποχρώσεις). Μάλιστα, παρατηρείται ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μεταξύ κοινής συνεργασίας έναντι της κοινής μη-συνεργασίας υπάρχει αύξηση της τάξης του 154%.

Επιπλέον, φαίνεται ότι όταν το δίκυκλο συνεργάζεται ενώ το προπορευόμενο όχημα ακολουθεί μια μη-συνεργατική στρατηγική, οι τιμές της απολαβής για το δίκυκλο είναι οριακά χαμηλότερες από την αντίστροφη κατάσταση (γαλάζιες και πράσινες αποχρώσεις στην περίπτωση C-NC σε σχέση με τις πράσινες και κίτρινες αποχρώσεις της ομάδας NC-C). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος της άνεσης κατά την προσπέραση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ταχύτητες των οχημάτων αλλά και από το διαθέσιμο άνοιγμα που έχει ο μοτοσυκλετιστής στη διάθεσή του.

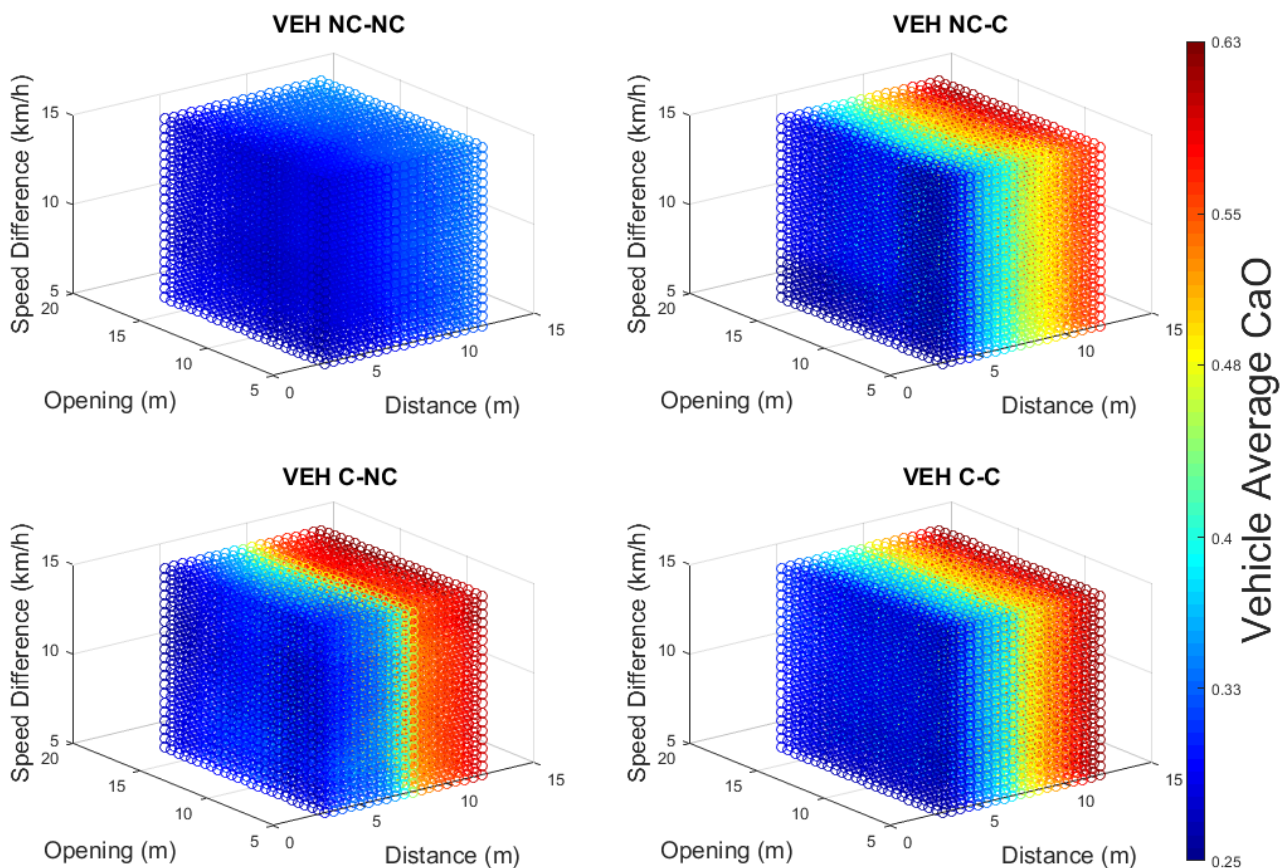
Ουσιαστικά, σε μία περίπτωση όπου το ΜΔ συνεργάζεται, ενώ το προπορευόμενο όχημα όχι, το διαθέσιμο άνοιγμα αποδεικνύεται πιο σημαντικός παράγοντας από αυτόν της απόστασης των δύο οχημάτων στην άνεση την οποία αισθάνεται ο μοτοσυκλετιστής, αφού το πρώτο δεν μπορεί να επηρεαστεί από την οδήγησή του σε αντίθεση με το δεύτερο. Ως εκ τούτου, αν και οδηγός του ΜΔ μπορεί να αυξήσει την απόσταση από το προπορευόμενο όχημα εφόσον το επιθυμεί, δεν μπορεί να κάνει το ίδιο και με το άνοιγμα που όπως έχει αποδειχθεί είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας όχι μόνο για το μέγεθος της «Άνεσης κατά την Προσπέραση» αλλά και για την έκβαση της προσπέρασης.



Διάγραμμα 8: Απολαβές δικύκλου βάσει του μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση»

6.5.4. Διερεύνηση Απολαβής «Άνεσης κατά την Προσπέραση» για το Προπορευόμενο Όχημα

Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζονται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες περιπτώσεις σε σχέση με τις απολαβές του προπορευόμενου οχήματος. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στα 3 από τα 4 διαγράμματα, όπου τουλάχιστον ένα όχημα συνεργάζεται, η δυναμική αλλαγή στην απολαβή του προπορευόμενου οχήματος παρουσιάζει το ίδιο μοτίβο αφού η «Άνεση κατά την Προσπέραση» για το προπορευόμενο όχημα αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο οχημάτων. Όπως φαίνεται δηλαδή η απόσταση των δύο οχημάτων, που συμπεριλήφθηκε στο δομικό πρότυπο κατά τον ορισμό της «Άνεσης κατά την Προσπέραση», αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την άνεση που αισθάνεται ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος, αφού η πίεση που μπορεί να αισθάνεται από το ΜΔ που τον ακολουθεί σε μικρή απόσταση έχει επίδραση και στα υπόλοιπα μεγέθη που διαμορφώνουν την αριθμητική τιμή της «Άνεσης κατά την Προσπέραση».



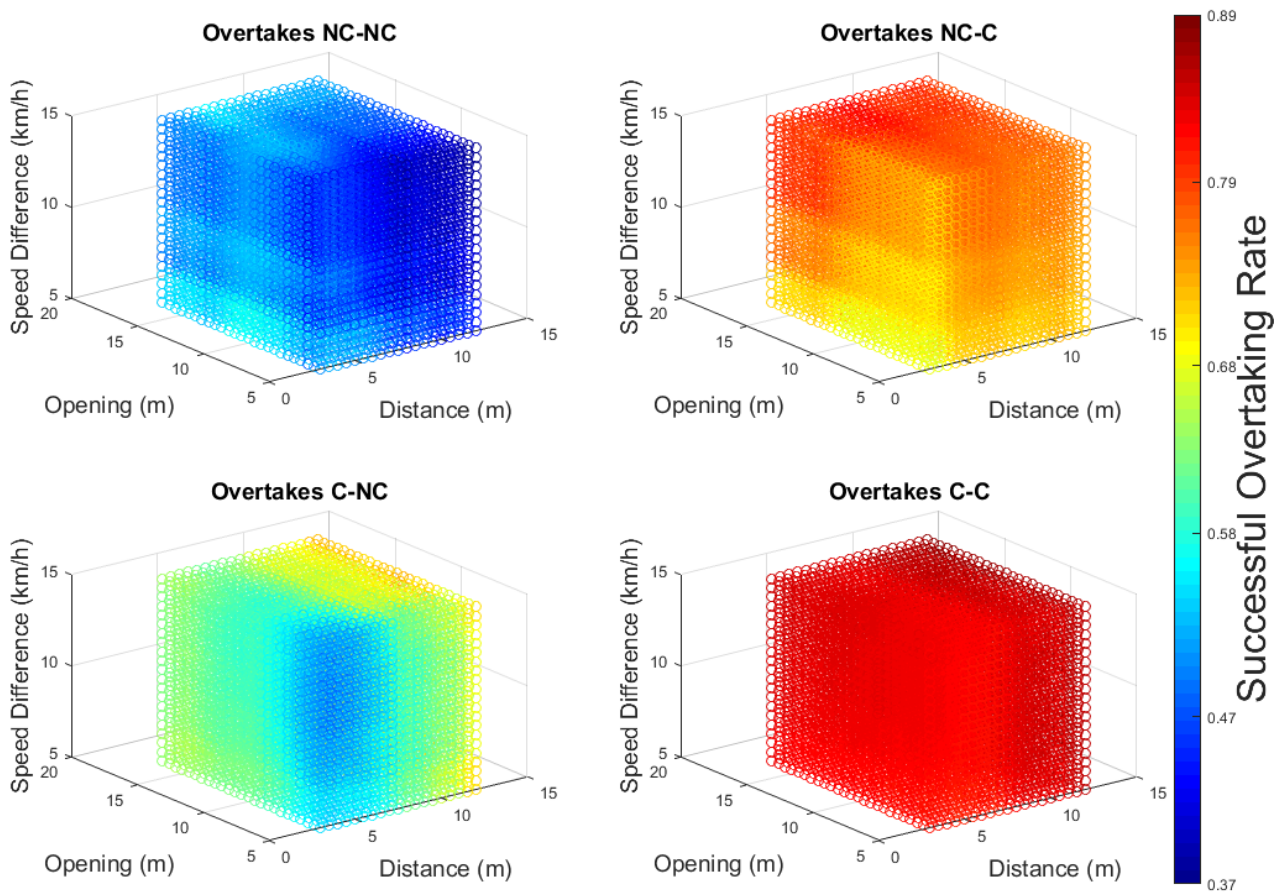
Διάγραμμα 9: Απολαβές οχήματος βάσει του μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση»

Αντίθετα, στην περίπτωση που και τα δύο οχήματα δεν συνεργάζονται η απολαβή του οχήματος παρουσιάζει τις μικρότερες της τιμές (αποκλειστικά μπλε αποχρώσεις στην κατάσταση NC-NC).

6.5.5. Διερεύνηση Ποσοστού Επιτυχημένων Προσπεράσεων

Το Διάγραμμα 10 διαφέρει από τα προηγούμενα αφού δεν παρουσιάζεται η μέση τιμή κάποιου μεγέθους αλλά το ποσοστό των επιτυχημένων προσπεράσεων ως προς τον συνολικό αριθμό των προσπαθειών για προσπέραση ανά ομάδα στρατηγικών. Διακρίνεται ότι οι περιπτώσεις που οι δύο οδηγοί επιλέγουν την ίδια στρατηγική παρουσιάζουν και τις ακραίες τιμές στα ποσοστά επιτυχημένων προσπεράσεων. Συγκεκριμένα, το χαμηλότερο ποσοστό (μπλε και γαλάζιες αποχρώσεις στο διάγραμμα NC-NC) παρατηρείται όταν οι δύο οδηγοί επιλέγουν τη μη συνεργασία ενώ τα υψηλότερα (κόκκινες και έντονα κόκκινες αποχρώσεις) όταν και οι δύο οδηγοί συνεργάζονται μεταξύ τους. Η διαφορά από τη μη συνεργασία στη συνεργασία παρουσιάζει μία αύξηση μέχρι 240%. Αυτό που προκύπτει από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι η σημασία των παραγόντων που έχουν επιλεχθεί στις συνθήκες συνεργασίας στην έκβαση της προσπέρασης. Όπως φαίνεται ο

ρόλος τους είναι καθοριστικός, αφού ακόμη και με μικρές τιμές στα όρια συνεργασίας, το ποσοστό των επιτυχημένων προσπεράσεων είναι ιδιαίτερα υψηλό (κόκκινο στο μπροστινό μέρος του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου), ενώ καθώς οι τιμές μεγαλώνουν το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων αυξάνεται (έντονο κόκκινο στο πίσω μέρος του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου).



Διάγραμμα 10: Ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων ανά ομάδα στρατηγικών

Επιπλέον, όπως αναμενόταν, όταν ο οδηγός του ΜΔ ακολουθεί μία μη συνεργατική/επιθετική οδήγηση ενώ το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται (NC-C), το ποσοστό των προσπεράσεων είναι αυξημένο σε σχέση με όταν συμβαίνει το αντίστροφο (ομάδα C-NC). Στη δεύτερη μάλιστα περίπτωση παρουσιάζεται μία σταδιακή αύξηση του επιτυχημένου αριθμού προσπεράσεων με την ανάλογη αύξηση στις οριακές τιμές συνεργασίας.

6.5.6. Σύνοψη Αποτελεσμάτων για διαφορετικά Όρια Συνεργασίας

Συνολικά, για τα διαφορετικά παίγνια που διαμορφώθηκαν πέντε διαφορετικά διαγράμματα αποτύπωσαν τις μέσες ταχύτητες για το ΜΔ και το προπορευόμενο όχημα, την μέση τιμή του

μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση» και το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων ανά ομάδα στρατηγικών.

Για το ΜΔ προκύπτει ότι:

- Η μέση ταχύτητά του παρουσιάζει την υψηλότερή της τιμή σε καταστάσεις συνεργασίας και των δύο οχημάτων, ενώ στην αντίθετη περίπτωση παρουσιάζεται μείωση έως και 12.6%.
- Η μέση «Άνεση κατά την Προσπέραση» που χαρακτηρίζει τις καταστάσεις συνεργασίας και των δύο οχημάτων παρουσιάζει την υψηλότερή της τιμή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει μείωση έως και 60%.
- Και για τα δύο μεγέθη, όταν το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται ενώ το ΜΔ όχι (NC-C), οι απολαβές είναι καλύτερες σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση (C-NC).
- Το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή του σε καταστάσεις συνεργασίας και των δύο οχημάτων, ενώ στην αντίθετη περίπτωση παρουσιάζεται μείωση έως και 58%.
- Το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων είναι αυξημένο κατά περίπου 10% όταν το ΜΔ ακολουθεί μια μη συνεργατική συμπεριφορά ενώ το προπορευόμενο όχημα όχι (NC-C) σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση (C-NC).

Για το προπορευόμενο όχημα προκύπτει ότι:

- Η μέση ταχύτητά του όπως και η μέση «Άνεση κατά την Προσπέραση» επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του οδηγού του ΜΔ, αφού μπορεί να μειωθεί μέχρι και 10%.
- Ανεξαρτήτως τη στρατηγική του ΜΔ, το προπορευόμενο όχημα έχει περισσότερες πιθανότητες για μεγαλύτερη μέση ταχύτητα όταν συνεργάζεται.
- Η μέση «Άνεση κατά την Προσπέραση» εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση που τον ακολουθεί το ΜΔ. Εξαιρείται η περίπτωση που και οι δύο οδηγοί επιλέγουν τη μη-συνεργασία όπου η τιμή της «Άνεσης κατά την Προσπέραση» παίρνει τις χαμηλότερες τιμές.
- Όταν το όχημα συνεργάζεται, παρατηρείται αυξημένο ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων.

Τέλος θα πρέπει να τονισθεί ότι αναδεικνύεται ότι με τον κατάλληλο έλεγχο κάποιον σημαντικών παραμέτρων στη ροή της κυκλοφορίας, όπως οι χωρικοί διαχωρισμοί των οχημάτων

και οι ταχύτητές τους, είναι δυνατή η ρύθμιση του κυκλοφοριακού φόρτου ιδιαίτερα όσον αφορά στον αριθμό των ΜΔ που διέρχονται από μία συγκεκριμένη διατομή της οδού. Όπως φάνηκε από το ανάλυση του ποσοστού επιτυχημένων προσπεράσεων, ο έλεγχος των συνθηκών συνεργασίας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των προσπεράσεων των ΜΔ αλλά και της μέσης ταχύτητάς τους. Το συγκεκριμένο εύρημα θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό όσον αφορά τη σύνδεση μικροσκοπικών και μακροσκοπικών κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στην αρχή.

Ο τρόπος με τον οποίο θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή τα παραπάνω συμπεράσματα θα συζητηθούν στην επόμενη ενότητα όπου συνοψίζονται, συνδέονται και συζητούνται περαιτέρω τα ευρήματα της ανάλυσης ευαισθησίας σε συνδυασμό με τα ευρήματα από τις προηγούμενες ενότητες της παρούσας διατριβής.

7. Συμπεράσματα & Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

7.1. Γενικά

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολήθηκε με θέματα που αφορούν στην προσπέραση των ΜΔ, με έμφαση στη διαδικασία λήψης των αποφάσεων των οδηγών κατά την προσπέραση οχημάτων από μηχανοκίνητα δίκυκλα και στις αλληλεπιδράσεις τους με την υπόλοιπη κυκλοφορία.

Αρχικά, έγινε μία αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση σε θέματα ITS και κυκλοφορίας ΜΔ, όπου συζητήθηκαν θέματα που αφορούν τις έρευνες που έχουν γίνει από το παρελθόν έως τώρα. Κάποια από τα πρώτα συμπεράσματα που προέκυψαν αφορούσαν τη σημασία της συλλογής πραγματικών δεδομένων από την κυκλοφορία για την καλύτερη κατανόηση φαινομένων που αφορούν τα ΜΔ, αφού η πλειοψηφία των ερευνών μέχρι στιγμής στηρίζονταν σε μελέτες προσομοίωσης. Παρόλ' αυτά, διαπιστώνεται συχνά η ανάγκη για πραγματικά δεδομένα από τροχιές ΜΔ, ιδιαίτερα αν λάβει κανείς υπόψη του τη ραγδαία αύξηση που έχει ο αριθμός τους σε Ευρωπαϊκούς και μη δρόμους, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες.

Με την παραπάνω διαπίστωση, προέκυψε η ανάγκη για χρήση προχωρημένων τεχνικών βιντεοσκόπησης των τροχιών οχημάτων με τρόπο που να μπορεί να συλλεχθεί μεγάλος όγκος δεδομένων αλλά ταυτόχρονα χωρίς να επεμβαίνει κανείς στον τρόπο συμπεριφοράς των οδηγών. Ως εκ τούτου, η παρούσα διατριβή προτείνει μία πρωτοποριακή προσέγγιση που συμπεριλαμβάνει τη χρήση Μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων για την καταγραφή της για τη συλλογή δεδομένων που ήταν απαραίτητα για την περαιτέρω ανάλυση.

Ένα επιπλέον σημαντικό εύρημα ήταν η ανάγκη για την εξέταση του φαινομένου της προσπέρασης των ΜΔ υπό διαφορετική σκοπιά σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα στην οδό. Κατά συνέπεια, στο συγκεκριμένο φαινόμενο έγινε μία δυναμική προσέγγιση όπου ο ελιγμός της προσπέρασης διαχωρίζεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, από τη στιγμή που ο μοτοσυκλετιστής αποφασίζει να προσπεράσει το προπορευόν όχημα και έπειτα από τη στιγμή αποφασίζει να ολοκληρώσει την προσπέραση ενώ βρίσκεται παράλληλα με το άλλο όχημα.

Ακόμα, σε συνδυασμό με τη λεπτομερή βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε, διαμορφώθηκαν οι προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση ανεπτυγμένων τεχνικών Μηχανικής Μάθησης. Κάνοντας χρήση της τεχνικής των Δέντρων Αποφάσεων και μέτα-αλγορίθμων δημιουργήθηκαν δύο πρότυπα, αρχικά για την πρόβλεψη της απόφασης του μοτοσυκλετιστή για να εκτελέσει ή όχι τον ελιγμό προσπέρασης και δεύτερον για τη σχετική θέση με το

προπορευόμενο όχημα κατά την προσπέραση, δηλαδή για το αν θα το προσπεράσει από αριστερά ή δεξιά.

Στη συνέχεια, υπό το πρίσμα της Θεωρίας Παιγνίων, έγινε η προτυποποίηση της αλληλεπίδρασης των ΜΔ με τα υπόλοιπα οχήματα σε συνθήκες συνεργασίας, όπου αναλύθηκαν θέματα της διατύπωσης του παιγνίου, της απολαβής που δέχονται οι δύο παίκτες και της ορθολογικότητάς τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Τέλος, έγινε ανάλυση ευαισθησίας στις συνθήκες συνεργασίας που ορίζουν το παίγνιο για να διερευνηθεί το αντίκτυπό τους στην εναλλαγή των βέλτιστων στρατηγικών ανά περίπτωση.

7.2. Σύνοψη Αποτελεσμάτων Ανάλυσης

Πίνακας 17: Σύνοψη Αποτελεσμάτων Προτύπων Πρόβλεψης Προσπέρασης

Προτυποποίηση Διαδικασίας Προσπέρασης
Πρόβλεψη επιτυχούς προσπέρασης
- Υψηλά ποσοστά ορθής πρόβλεψης - Ανάδειξη σημαντικών παραγόντων που λαμβάνει ο μοτοσυκλετιστής κατά την προσπέραση - Η διαφορά ταχύτητας των 12km/h παίζει καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της προσπέρασης - Άλλες σημαντικές παράμετροι: <i>τύπος οχήματος που προσπερνάται, διαθέσιμο άνοιγμα, απόσταση από προπορευόμενο όχημα, απόσταση οχημάτων που κινούνται πίσω από το ΜΔ, τοποθέτηση οχημάτων</i>
Πρόβλεψη της σχετικής θέσης της μοτοσυκλέτας
- Όταν το ΜΔ ξεκινάει την προσπέραση από αριστερά/δεξιά, δεν αλλάζει σχετική θέση - Τα ΜΔ προσπερνούν από δεξιά, μονάχα αν οι συνθήκες από αριστερά δεν το επιτρέπουν - Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι ένας μοτοσυκλετιστής κοιτάζει να ελαχιστοποιήσει τους ελιγμούς του, έπειτα να προσπεράσει τα προπορευόμενα οχήματα με ασφαλή απόσταση και τέλος να κινηθεί σε σημεία με διαθέσιμο χώρο

Τα αποτελέσματα από τη δύο πρότυπα πρόβλεψης συνοψίζονται στον Πίνακα 17. Τα δύο πρότυπα πρόβλεψης που δημιουργήθηκαν έχουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά ορθής πρόβλεψης, γεγονός που μπορεί να τα καταστήσει κατάλληλα στο σχεδιασμό σύγχρονων έξυπνων συστημάτων. Το πρότυπο πρόβλεψης επιτυχούς προσπέρασης ανέδειξε τους σημαντικούς παράγοντες που λαμβάνει υπόψη του ο μοτοσυκλετιστής κατά την προσπέραση και τη διαδικασία λήψης της απόφασής του για ολοκλήρωση της προσπέρασης. Παρατηρήθηκε ότι η διαφορά ταχύτητας παίζει πρωτεύοντα ρόλο για την ολοκλήρωση της προσπέρασης με την τιμή των 12km/h να αποτελεί συννοριακή συνθήκη, αφού το πρότυπο προέβλεπε πως οποιαδήποτε προσπέραση ξεκινούσε με διαφορά ταχύτητας μεγαλύτερη από 12 km/h, τελικά θα ήταν επιτυχής. Στη συνέχεια,

παρατηρήθηκε το δεύτερο όριο των 7km/h στην διαφορά ταχυτήτων των δύο οχημάτων, όπου, αν ο μοτοσυκλετιστής ξεκινήσει την προσπάθεια προσπέρασής του με μικρότερη διαφορά από αυτή, εξετάζεται ο τύπος του προπορευόμενου οχήματος, όπου βαρέα οχήματα και μοτοσυκλέτες μεγάλου κυβισμού δεν ευνοούν την ολοκλήρωση της προσπέρασης σε αντίθεση με τα ΜΔ μικρού κυβισμού. Στην περίπτωση που το προπορευόμενο όχημα είναι ΙΧ, περίπτωση που είναι και η πιο συνήθης, ο μοτοσυκλετιστής εξετάζει χωρικές παραμέτρους. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι το διαθέσιμο άνοιγμα για προσπέραση και η απόσταση που διατηρείται από το προπορευόμενο όχημα, ενώ και η επιρροή των οχημάτων που κινείται πίσω από το ΜΔ έχουν σημαντικό ρόλο στην απόφασή του. Σε άλλες περιπτώσεις, η τοποθέτηση των οχημάτων παίζει εξίσου αξιοσημείωτο ρόλο. Στην περίπτωση που το ΜΔ κινείται στη μεσαία λωρίδα, τότε η βασική παράμετρος που εξετάζεται είναι η επιρροή των οχημάτων που το πλησιάζουν από πίσω. Στις άλλες δύο περιπτώσεις, δηλαδή όταν το ΜΔ κινείται είτε στη δεξιά, είτε στην αριστερή λωρίδα, εξετάζεται η ταχύτητα στη γειτονική λωρίδα με σκοπό την ομαλή είσοδο του ΜΔ σε αυτή.

Όπως αναδεικνύεται από το πρότυπο για την πρόβλεψη της σχετικής θέσης της μοτοσυκλέτας, παρατηρήθηκε ότι αν το ΜΔ ξεκινάει την προσπέρασή του είτε από δεξιά είτε από αριστερά, τότε δεν θα πρέπει να αλλάξει τη θέση του σε σχέση με το όχημα που προσπερνάται. Αν ξεκινάει την προσπέρασή του από την ίδια λωρίδα, τότε η τάση των μοτοσυκλετιστών είναι η προσπέραση να γίνεται από αριστερά. Σε περίπτωση όμως που οι συνθήκες δεν το επιτρέπουν τότε συγκεκριμένες παράμετροι καθορίζουν το αν είναι καλύτερο να προσπεράσει από δεξιά. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι ένας μοτοσυκλετιστής αρχικά κοιτάζει να ελαχιστοποιήσει τους ελιγμούς του (αφού λάβει υπόψη την τοποθέτηση των γειτονικών οχημάτων), έπειτα να προσπεράσει τα προπορευόμενα οχήματα έχοντας αρκετή απόσταση από αυτά (αφού λαμβάνει υπόψη του τις εγκάρσιες αποστάσεις) και τέλος να κινηθεί σε σημεία όπου έχει αρκετό διαθέσιμο χώρο (αφού λαμβάνει υπόψη του το εμβαδόν).

Όσον αφορά στην προτυποποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο ομάδων οχημάτων με βάση τη Θεωρία Παιγνίων, παρατηρήθηκε ότι η κυρίαρχη στρατηγική προκύπτει όταν και τα δύο οχήματα συνεργάζονται. Αυτό το σετ στρατηγικών αποτελεί και την Ισορροπία Nash για το συγκεκριμένο παίγνιο. Αν και σύμφωνα με τη Θεωρία Παιγνίων ένας πλήρως ορθολογικός παίκτης θα έπρεπε να επιλέγει πάντοτε τη βέλτιστη στρατηγική, αποδείχτηκε ότι κάτι δεν συμβαίνει πάντα. Συγκεκριμένα, ο οδηγός του δικύκλου επιλέγει να συνεργαστεί στο 64.9% των περιπτώσεων ενώ ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος στο 73%. Αυτό που είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι ότι τις περισσότερες φορές τουλάχιστον ένας παίκτης επιλέγει να συνεργαστεί με τον άλλον, αφού στο 50% των περιπτώσεων και οι δύο συνεργάστηκαν, ενώ στο 70% των περιπτώσεων

συνεργάστηκε τουλάχιστον ένας από τους δύο παίκτες. Επίσης, παρατηρήθηκε το μέγιστο ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων όταν και οι δύο παίκτες συνεργάζονται, ενώ το χαμηλότερο στην περίπτωση που συνεργάζεται το ΜΔ ενώ το προπορευόμενο όχημα όχι.

Πίνακας 18: Σύνοψη Αποτελεσμάτων Θεωρίας Παιγνίων

Προτυποποίηση βάσει της Θεωρίας Παιγνίων	
• Κυρίαρχη Στρατηγική και για τους δύο παίκτες η Συνεργασία • Το ΜΔ συνεργάζεται στο 65% των περιπτώσεων ενώ το προπορευόμενο όχημα στο 73% • Στο 50% των περιπτώσεων και οι δύο παίκτες συνεργάστηκαν ενώ στο 70% τουλάχιστον ένας • Μέγιστο ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων κατά την κατάσταση συνεργασίας • Οι παίκτες εκπαιδεύονται στο να επιλέγουν συνεργασία	
Ανάλυση Ευαισθησίας στις συνθήκες Συνεργασίας • Η μέση ταχύτητα του ΜΔ μειώνεται έως και 12.6% σε καταστάσεις μη συνεργασίας • Το μέγεθος ΑκΠ μειώνεται έως και 60% σε καταστάσεις μη συνεργασίας • Το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων μειώνεται έως και 60% σε καταστάσεις μη συνεργασίας • Σε καταστάσεις μη συνεργασίας το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων αυξάνεται κατά 10% όταν το ΜΔ δε συνεργάζεται και το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται, σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση • Η μέση ταχύτητά του προπορευόμενου οχήματος, όπως και η μέση ΑκΠ επηρεάζεται από το ΜΔ • Η μέση ΑκΠ εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση που διατηρεί το ΜΔ • Όταν το προπορευόμενο όχημα επιλέξει μία συνεργατική στρατηγική αυξημένο ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων για το ΜΔ	

Για την εξήγηση των διαφορών που παρουσιάζονται μεταξύ της επιλογής στρατηγικής σε κάποιες περιπτώσεις και της κυρίαρχης στρατηγικής του παιγνίου που παρουσιάστηκε έγινε χρήση της θεωρίας του QRE, που δύναται να ποσοτικοποιήσει τη διαδικασία εκπαίδευσης του οδηγού του δικύκλου στο να επιλέξει τη βέλτιστη στρατηγική. Παρατηρείται ότι η εκπαίδευσή του είναι πιο αποδοτική όταν επιλέγει δεύτερο τη στρατηγική του και το προπορευόμενο όχημα έχει προηγουμένως επιλέξει συνεργασία. Αντίθετα, στο προπορευόμενο όχημα ξεχωρίζει η περίπτωση που παίζει πρώτο, αφού εκπαιδεύεται πιο γρήγορα προς τη συνεργατική λύση.

Έπειτα, με την επίλυση των διαφορετικών παιγνίων που διαμορφώθηκαν μέσω της ανάλυσης της συνεργασίας, ήταν δυνατή η παρατήρηση του πλεονεκτήματος της συνεργασίας μεταξύ ΜΔ και του οχήματος που προσπερνάται. Συγκεκριμένα, για το ΜΔ προέκυψε ότι η μέση ταχύτητά του παρουσιάζει την υψηλότερή της τιμή σε καταστάσεις συνεργασίας και των δύο οχημάτων, ενώ στην αντίθετη περίπτωση παρουσιάζεται μείωση έως και 12.6%. Ομοίως, το μέγεθος «Άνεση κατά την Προσπέραση» κατά τις καταστάσεις συνεργασίας και των δύο οχημάτων παρουσιάζει την υψηλότερή του τιμή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει μείωση έως και 60%.

Ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα για την εξήγηση των μη συνεργατικών στρατηγικών που επιλέγουν συχνά τα δίκυκλα ήταν το γεγονός ότι και για τα δύο μεγέθη, όταν το προπορευόμενο όχημα συνεργάζεται ενώ το ΜΔ όχι (NC-C), οι απολαβές είναι καλύτερες σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση (C-NC). Παράλληλα, το ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων είναι αυξημένο κατά περίπου 10% όταν το ΜΔ ακολουθεί μια μη συνεργατική συμπεριφορά ενώ το προπορευόμενο όχημα όχι (NC-C) σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση (C-NC). Τέλος, παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή του σε καταστάσεις συνεργασίας και των δύο οχημάτων, ενώ στην αντίθετη περίπτωση παρουσιάζεται μείωση έως και 58%.

Για το προπορευόμενο όχημα προκύπτει ότι η μέση ταχύτητά του, όπως και η μέση «Άνεση κατά την Προσπέραση», επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του οδηγού του ΜΔ, αφού μπορεί να μειωθεί στη μέση ταχύτητα μέχρι και 10%. Ανεξαρτήτως τη στρατηγική του ΜΔ, το προπορευόμενο όχημα έχει περισσότερες πιθανότητες για μεγαλύτερη μέση ταχύτητα όταν συνεργάζεται. Επίσης προέκυψε ότι η μέση «Άνεση κατά την Προσπέραση» εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση που διατηρεί το ΜΔ με αυτό. Η περίπτωση που και οι δύο οδηγοί επιλέγουν τη μη-συνεργασία να εξαιρείται, αφού η τιμή του μεγέθους «Άνεση κατά την Προσπέραση» παίρνει τις χαμηλότερες τιμές. Τέλος, παρατηρείται αυξημένο ποσοστό επιτυχημένων προσπεράσεων για το ΜΔ, όταν το προπορευόμενο όχημα επιλέξει μία συνεργατική στρατηγική.

7.3. Συμπεράσματα & Συνεισφορά Διδακτορικής Διατριβής

7.3.1. Γενικά Συμπεράσματα

Με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στη χρήση Μη Επανδρωμένων Εναέριων Συστημάτων (UAS) για την κυκλοφορία, διαπιστώθηκε η σημαντική συμβολή που μπορούν να παρέχουν ως μέρος της υποδομής των Έξυπνων Συστημάτων για τις Μεταφορές. Κάνοντας χρήση ενός UAS, για την εξαγωγή των κινηματικών χαρακτηριστικών των δικύκλων, διερευνήθηκαν και αποτυπώθηκαν αναλυτικά τα βήματα που απαιτούνται για τη μετατροπή βίντεο από UAS σε δεδομένα αξιοποιήσιμα για τις ανάγκες κυκλοφοριακών ερευνών. Προέκυψαν σημαντικά ευρήματα που συμβαδίζουν με την έως τώρα βιβλιογραφία επί του θέματος, δηλαδή την ανάπτυξη αλγορίθμων για τη σταθεροποίηση του βίντεο σε πραγματικό χρόνο και την πιο άμεση μετατροπή της οπτικής πληροφορίας σε αξιόπιστη και αξιοποιήσιμη μορφή δεδομένων για συγκοινωνιακούς σκοπούς. Η συλλογή δεδομένων από UAS ήταν καθοριστικής σημασίας για την παρούσα διδακτορική διατριβή αφού η αναλυτική βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε έδωσε τη δυνατότητα για ενδελεχή διερεύνηση του φαινομένου της προσπέρασης των ΜΔ. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων με 433 προσπάθειες προσπέρασης με 53 μεταβλητές για κάθε περίπτωση που

μπορούν να περιγράψουν την τοποθέτηση στην οδό των οχημάτων που συμμετέχουν στο φαινόμενο, τις ταχύτητές τους, τις αποστάσεις μεταξύ τους και άλλους καθοριστικούς παράγοντες.

Όπως αποδείχτηκε, οι τεχνικές μηχανικής μάθησης είναι ισχυρά εργαλεία όσον αφορά στον εντοπισμό σημαντικών μεταβλητών και στην προτυποποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Υποδεικνύεται ότι υπάρχει μία αμφίδρομη σχέση μεταξύ της ποιότητας των δεδομένων που εισάγονται στα πρότυπα μηχανικής μάθησης για την υψηλή απόδοσή τους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα UAS μπορούν να συνδράμουν σημαντικά στη δημιουργία λεπτομερών βάσεων δεδομένων και που μετέπειτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη, κατανόηση και προτυποποίηση πολύπλοκων φαινομένων. Με την πρόσφατη εξέλιξη των συγκεκριμένων συσκευών και την τεχνολογική πρόοδο στην απόκτηση και διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, φαίνεται ότι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω είναι ένα δυνατό εργαλείο για την υποδομή των έξυπνων συστημάτων μεταφοράς.

Σε σχέση με τη μεθοδολογία που επιλέχθηκε θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και τα δέντρα αποφάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή δεν είναι κάποια νέα τεχνική μηχανικής μάθησης, η προσέγγιση της διαδικασίας λήψης της απόφασης σε φαινόμενα προσπέρασης μέσω αυτών αποδεικνύεται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Μέχρι στιγμής, οι κινήσεις των μοτοσυκλετιστών δεν ήταν δυνατόν να αναπαρασταθούν πλήρως, ενώ η προτυποποίηση των ελιγμών τους οποίους εκτελούν στηρίζονταν σε πρότυπα που έχουν βασιστεί σε τροχιές και στοιχεία άλλων τύπων οχημάτων. Αυτό έχει άμεση συνέπεια στο σχεδιασμό έξυπνων συστημάτων που προσανατολίζονται στα ΜΔ αλλά και στην προσομοίωση συνθηκών μικτής κυκλοφορίας οχημάτων, θέματα που έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια.

7.3.2. Συνεισφορά Προτύπων Διαδικασίας Προσπέρασης

Τα πρότυπα που δημιουργούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση στον σχεδιασμό έξυπνων συστημάτων μεταφορών προσανατολισμένα στα δίκυκλα και στη μικτή κυκλοφορία. Όπως διαπιστώθηκε, μία από τις βασικές απαιτήσεις στο σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων για ΜΔ είναι η καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εκείνα κινούνται και η δημιουργία προτύπων που μπορούν να προβλέψουν ικανοποιητικά την οδηγική τους συμπεριφορά. Τα δύο πρότυπα που δημιουργήθηκαν μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη δημιουργία ενός συστήματος που θα προτείνεται στον μοτοσυκλετιστή για προσπέραση ή όχι, υπό την προϋπόθεση ότι τα δύο οχήματα που συμμετέχουν στο φαινόμενο μπορούν να ανταλλάξουν βασικές πληροφορίες μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα, το πρότυπο πρόβλεψης επιτυχούς προσπέρασης βασίζεται σε μεγέθη όπως ταχύτητες, διαφορές ταχυτήτων και χωρικοί διαχωρισμοί, τα οποία είναι εύκολο να μετρηθούν με

σύγχρονα τεχνικά μέσα που ήδη επιλέγονται από τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες και δευτερευόντως από τις βιομηχανίες μοτοσυκλετών (αισθητήρες απόστασης, κάμερες κ.α.). Όπως προκύπτει λοιπόν, η χρήση των σύγχρονων αισθητήρων σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες επικοινωνίας οχημάτων V2V μπορούν να προσδώσουν στους μοτοσυκλετιστές σημαντική πληροφορία πριν και κατά τη διάρκεια του ελιγμού της προσπέρασης. Αυτό το πρότυπο μπορεί να αποτελέσει το πλαίσιο σχεδιασμού ενός βοηθητικού συστήματος που, με τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων, θα προτείνει στο μοτοσυκλετιστή αν οι συνθήκες κατάντη είναι κατάλληλες για ένα ασφαλή και άνετο ελιγμό προσπέρασης. Ταυτόχρονα, την ίδια πληροφορία θα την έχει στη διάθεσή του και το προπορευόμενο όχημα ώστε να ο οδηγός του να γνωρίζει τις προθέσεις του μοτοσυκλετιστή και να αποφεύγονται μη αναμενόμενα συμβάντα, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ασφάλεια και την ομαλότητα στην οδήγηση του δεύτερου. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη πληροφορία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και από τις δύο διαφορετικές ομάδες οχημάτων σε μία οδό με σκοπό την πιο προβλέψιμη κυκλοφορία των οχημάτων, την ομαλοποίηση της κυκλοφοριακής ροής και τελικά στη βελτίωση των συνθηκών οδήγησης σε αυτή. Θα πρέπει να τονιστεί παρόλ' αυτά ότι αν και συνεργασία μεταξύ των δικύκλων και των υπόλοιπων οχημάτων μπορεί να επέλθει κατά τη διάρκεια της προσπέρασης, η εισαγωγή νέων προτύπων και τεχνολογιών είναι μία από τις βασικότερες προϋποθέσεις για να μπορέσει να συμβεί αυτό (Barmounakis et al., 2017).

Ταυτόχρονα, το προτεινόμενο σύστημα έχει προεκτάσεις και στον τομέα της Οδικής Ασφάλειας, αφού όπως διαπιστώθηκε, ένας από τους συνηθέστερους λόγους συμμετοχής ΜΔ σε ατυχήματα είναι ότι τα υπόλοιπα οχήματα στην οδό δεν αντιλαμβάνονται την ύπαρξή τους. Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή προβλεπτική ικανότητα του δεύτερου προτύπου, η ανταλλαγή πληροφοριών κατά την προσπέραση θα μπορούσε να ενισχυθεί και να αντιμετωπιστούν προβλήματα ορατότητας που είναι από τις σημαντικές αιτίες οδικών ατυχημάτων που συμμετέχουν ΜΔ. Διαπιστώνεται ότι πολλά από τα ατυχήματα που συμμετέχουν οι μοτοσυκλετιστές οφείλονται στην μη αντίληψη της παρουσίας τους από τα υπόλοιπα οχήματα (Elslande and Fournier, 2017) ή στην μη σωστή αντίληψη επικίνδυνων καταστάσεων (Di Stasi et al., 2011; Lee and Sheppard, 2016), άρα ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να συμβάλλει δυναμικά και στον τομέα της οδικής ασφάλειας. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη την τοποθέτηση των οχημάτων και τις χωρικές αποστάσεις ανάντη τις οδού, ο μοτοσυκλετιστής θα μπορεί να δεχτεί προτάσεις για το ποια διαδρομή να ακολουθήσει ενώ ταυτόχρονα η ίδια πληροφορία θα μεταδίδεται στους υπόλοιπους χρήστες της οδού που πιθανώς να μην είχαν αντιληφθεί την παρουσία του ΜΔ.

Παράλληλα, όπως φάνηκε από το πρότυπο πρόβλεψης της προσπέρασης, η εισαγωγή της χωρικής μεταβλητής που αφορά στην χρονική μεταβολή του διαθέσιμου ανοίγματος που έχει ο μοτοσυκλετιστής, αύξησε σημαντικά την προβλεψιμότητα των προτύπων. Αν και η συγκεκριμένη μεταβλητή δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί με σύγχρονα τεχνικά μέσα, αφού ορίζεται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο κατά την κυκλοφορία αυτόνομων ή ημιαυτόνομων οχημάτων. Αναδεικνύεται ότι αν ο μοτοσυκλετιστής γνωρίζει ότι το διαθέσιμο άνοιγμα για την προσπέραση πρόκειται να αυξηθεί στο επόμενο χρονικό διάστημα, τότε είναι πολύ πιθανότερο να ξεκινήσει και να ολοκληρώσει τη διαδικασία προσπέρασης, σε αντίθεση με την περίπτωση που δεν επιχειρείται προσπέραση. Αν και η φύση της συγκεκριμένης μεταβλητής είναι προς το παρόν θεωρητική, αφού δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί σε πραγματικό χρόνο λόγω του ορισμού της σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, το εύρημα αυτό υποστηρίζει την ιδέα του ελέγχου και της πρόβλεψης κυκλοφοριακών συνθηκών, ειδικά σε ένα περιβάλλον Έξυπνων Συστημάτων και Συνδεδεμένων οχημάτων.

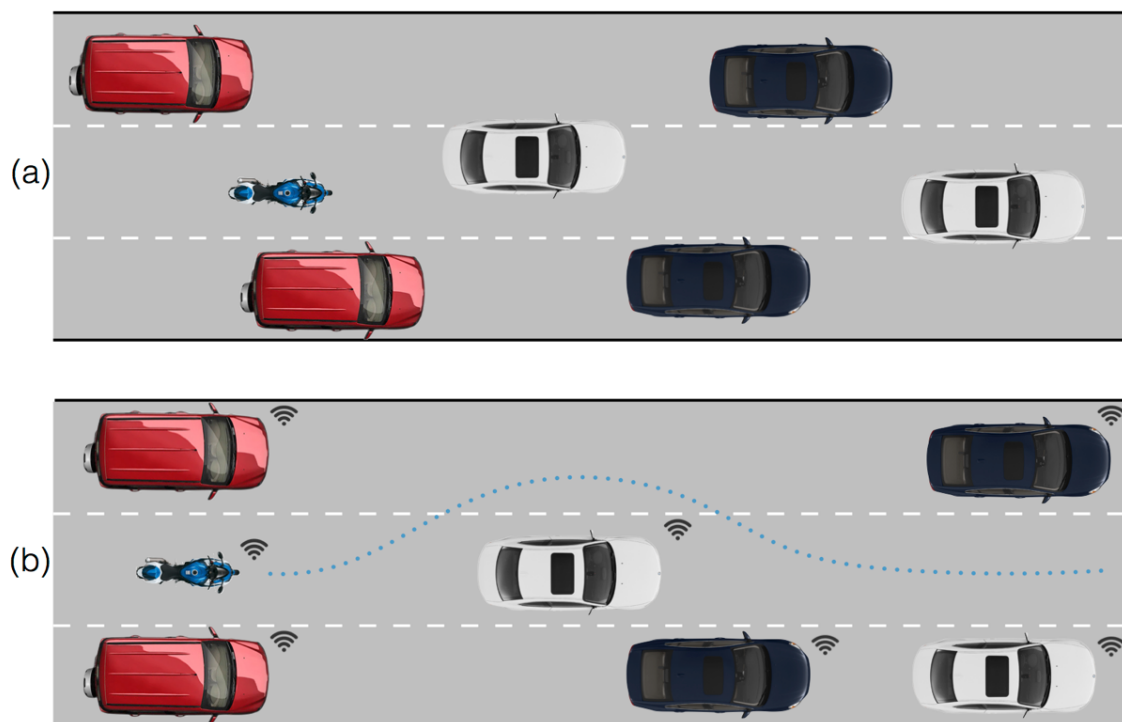
Συγκεκριμένα, σε προηγούμενες έρευνες έχει διαπιστωθεί η θετική επίδραση που έχουν τα συστήματα Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) σε φαινόμενα συγχώνευσης στην κυκλοφορία (van Arem et al., 2006) και στην σταθεροποίηση της κυκλοφοριακής ροής σε μακροσκοπικό επίπεδο (Nikolos et al., 2015). Για την περίπτωση της μικτής κυκλοφορίας, ο έλεγχος των διαμήκων αποστάσεων και της οδηγικής συμπεριφοράς των οδηγών θα γίνεται με σκοπό τη δημιουργία ενός επαρκούς ανοίγματος για τα δίκυκλα, όπου τα μεγαλύτερα οχήματα στην οδό θα αυξάνουν το χωρικό τους διαχωρισμό όταν υπάρχει η δημιουργία διαδρόμων προσπέρασης για τα δίκυκλα ενώ θα μειώνεται όταν υπάρχει ανάγκη για αυξημένη χωρητικότητα. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στην οδήγηση ΜΔ και στην οδήγηση των υπόλοιπων οχημάτων δεν είναι πιθανό στο κοντινό μέλλον να δούμε αυτόνομα ΜΔ, παρά μόνο την εφαρμογή κάποιων συστημάτων υποβοήθησης του αναβάτη. Αντίθετα, στο χώρο των αυτόνομων αυτοκινήτων η πρόοδος που έχει γίνει τα τελευταία χρόνια είναι σημαντική και εκτιμάται ότι θα αποτελούν πραγματικότητα πολύ πιο γρήγορα απ' ό,τι αναμένεται (Fagnant and Kockelman, 2015). Ως εκ τούτου, είναι πολύ πιθανό στο εγγύς μέλλον ανάμεσα στα αυτόνομα οχήματα να κυκλοφορούν ΜΔ με αναβάτες/ανθρώπους, και όχι προγραμματισμένοι υπολογιστές, που θα καλούνται να πάρουν αποφάσεις για την οδηγική συμπεριφορά τους.

7.3.3. Συνεισφορά Προτυποποίησης Αλληλεπίδρασης

Ένα κεφάλαιο απ' όπου μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα είναι η προτυποποίηση της αλληλεπίδρασης των οχημάτων υπό το πρίσμα της Θεωρίας Παιγνίων. Διαπιστώνεται ότι για τη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, η συνεργασία μεταξύ των οχημάτων αποτελεί τη βέλτιστη λύση για τους δύο οδηγούς. Ο έλεγχος της οδηγικής συμπεριφοράς των οδηγών έχει έλθει τα τελευταία χρόνια στο προσκήνιο με το σχεδιασμό και την έρευνα των αυτόνομων και ημιαυτόνομων οχημάτων ακόμη και σε περίπλοκα φαινόμενα όπως αυτό της προσπέρασης (Naranjo and Gonzalez, 2008). Ταυτόχρονα, ένα από τα πιο αναδυόμενα θέματα στο ίδιο πλαίσιο αφορούν την επικοινωνία οχημάτων και της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ τους (Motro et al., 2016) και τη συνεργασία των οδηγών για τη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών (Klein and Ben-Elia, 2016) που συζητήθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Σε συνδυασμό με τα οφέλη της συνεργασίας που ανέδειξε η ανάλυση ευαισθησίας, η προτυποποίηση των αλληλεπιδράσεων κρίνεται ιδιαίτερης σημασίας για τη βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής και το γρηγορότερο, ασφαλέστερο και πιο άνετο φιλτράρισμα της κυκλοφορίας από τα ΜΔ.

Σε ένα έξυπνο σύστημα μεταφορών όπου ένας «διαχειριστής» ορίζει τις συνθήκες συνεργασίας, οι οδηγοί επικοινωνούν μεταξύ τους και με την υποδομή, οι τελευταίοι θα χωρίζονται σε αυτούς που συνεργάζονται ή όχι, απολαμβάνοντας συγκεκριμένη απολαβή. Φυσικά, στο εγγύς μέλλον όπου τα αυτόνομα οχήματα θα αποτελούν πραγματικότητα, η συνεργασία θα μπορεί να θεωρείται μία δεδομένη κατάσταση, αφού η ορθολογικότητα των οδηγών δεν θα αποτελεί εμπόδιο στη επιλογή της βέλτιστης λύσης και τελικά ο διαχειριστής θα μπορεί να «επιβάλλει» τη συνεργασία με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνει τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε επίπεδο δικτύου (H. Liu et al., 2017; Sun et al., 2014). Παρόλ' αυτά, αν και τα αυτόνομα οχήματα ίσως να αποτελούν πραγματικότητα πολύ πιο νωρίς απ' όσο το περιμένουμε, η ανάπτυξη αυτόνομων ΜΔ είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο λόγω των διαφοροποιήσεων που υπάρχουν μεταξύ στην οδήγηση δικύκλων και υπόλοιπων οχημάτων. Ως εκ τούτου, σε ένα στάδιο μετάβασης από τα σημερινά συμβατικά οχήματα σε ένα περιβάλλον με μεγάλο αριθμό ημιαυτόνομων ή/και αυτόνομων οχημάτων, θα πρέπει να βρεθούν κίνητρα και τρόποι ώστε οι οδηγοί να επιλέγουν τη συνεργασία ακόμη και σε ένα «εγωιστικό» περιβάλλον όπως το κυκλοφοριακό. Μιας όμως και η επέμβαση στην ανθρώπινη ιδιοσυγκρασία και ορθολογικότητα είναι ιδιαίτερα δύσκολη, έως και αδύνατη, θα πρέπει να διερευνηθούν οι τρόποι με τους οποίους θα προωθηθεί η συνεργασία σε έναν οδηγό που δεν γνωρίζει (ή θεωρεί αμελητέας σημασίας) ποιο είναι το πραγματικό όφελός του.

Η συγκεκριμένη ιδέα, εκτός από περιπτώσεις βελτίωσης της κυκλοφοριακής ροής και της οδικής ασφάλειας, έχει προταθεί για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όπως φαίνεται στην (Barmounakis, 2016). Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 30α παρουσιάζεται μία πιθανή υφιστάμενη κατάσταση, όπου η τοποθέτηση των οχημάτων είναι τυχαία και οι συνθήκες για προσπέραση του μοτοσυκλετιστή δεν είναι ευνοϊκές, αφού τα ανοίγματα δεν επαρκούν και δεν υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας κάποιου διαδρόμου για το δίκυκλο. Αντίθετα, στην Εικόνα 30β σε ένα περιβάλλον όπου τα οχήματα επικοινωνούν το ένα με το άλλο, τα μεγαλύτερα οχήματα στην οδό έχουν πάρει συγκεκριμένες θέσεις στην οδό, δημιουργώντας κατάλληλες συνθήκες για προσπέραση και άνετη κίνηση του μοτοσυκλετιστή.



Εικόνα 30: Η κατάσταση τώρα (a) και η πιθανή εφαρμογή ενός συστήματος που θα προωθεί την προσπέραση των ΜΔ (b)

Τα CVIS που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα μπορούν να παίξουν ένα καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της συγκεκριμένης κατάστασης. Συγκεκριμένα, σε ένα περιβάλλον όπου οι οδηγοί έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους σχετικά με τις προθέσεις και στρατηγικές τους, με τις απολαβές που τους ενδιαφέρουν και με τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν κατόπιν στην κυκλοφορία, ο συνδυασμός των προτύπων που έχουν αναφερθεί έως τώρα μπορούν να αποτελέσουν το πλαίσιο για το σχεδιασμό ενός έξυπνου βοηθητικού συστήματος. Το συγκεκριμένο σύστημα θα μπορεί να βελτιστοποιεί τη διαδικασία προσπέρασης αλλά παράλληλα, μέσω του κατάλληλου ελέγχου των συνθηκών συνεργασίας, να κατευθύνει τους οδηγούς προς την (εκάστοτε) βέλτιστη στρατηγική. Αν λάβει κανείς υπόψη του την απουσία τέτοιων

συστημάτων για την εφαρμογή τους σε ΜΔ τότε η ανάγκη για καθοδήγηση του μοτοσυκλετιστή γίνεται ακόμη μεγαλύτερη (Barnpounakis et al., 2016a).

Με το συνδυασμό των τα ευρημάτων από τα πρότυπα πρόβλεψης προσπέρασης με εκείνα της προτυποποίησης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των οδηγών είναι δυνατή η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποβοήθησης των μοτοσυκλετιστών. Για παράδειγμα, καθώς ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος θα πληροφορείται ότι ένα μηχανοκίνητο δίκυκλο τον πλησιάζει με σκοπό να τον προσπεράσει. Έπειτα, το προπορευόμενο όχημα, λαμβάνοντας υπόψη μέσω αισθητήρων και άλλων μέσων τις χωρικές και κυκλοφοριακές συνθήκες κατάντη, θα επιστρέφει την πληροφορία για τις κατάλληλες συνθήκες για προσπέραση ή όχι. Σε αυτό το στάδιο, οι οδηγοί θα επιλέγουν για το αν θα συνεργαστούν ή όχι με τον άλλον. Αρχικά, το δίκυκλο θα πρέπει να διατηρήσει ασφαλείς αποστάσεις και να έχει «ενημερώσει» τον οδηγό ότι προτίθεται να προσπεράσει ανεξαρτήτως της δικής του σύστασης, ενώ αντίστοιχα το όχημα θα επιβραδύνει/επιταχύνει με σκοπό τη διατήρηση ενός ασφαλούς ανοίγματος για το μοτοσυκλετιστή. Αφού ολοκληρωθεί η προσπέραση, το προπορευόμενο όχημα θα συνεχίσει την πορεία του ενώ το δίκυκλο θα συνεχίζει να συμμετέχει σε αντίστοιχα παίγνια εφόσον επιθυμεί να προσπεράσει και να κινηθεί γρηγορότερα σε μια οδό.

7.3.4. Συνεισφορά στη διαχείριση κυκλοφορίας

Στην εργασία των Zou and Levinson (2006) αναφέρεται ότι «η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι ένα φαινόμενο που προκαλείται από πολλαπλά άτομα που αλληλεπιδρούν με σκοπό να χρησιμοποιήσουν ένα προσωρινά διαθέσιμο αγαθό (χωρητικότητα) σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα». Όπως όμως διαπιστώθηκε, ο τρόπος με τον οποίο κινούνται τα ΜΔ στην κυκλοφορία δεν έχει αποτυπωθεί σε μεγάλο βαθμό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επίδρασή τους στην κυκλοφοριακή ροή να μη δύναται να ποσοτικοποιηθεί πλήρως. Το γεγονός ότι τα ΜΔ επιλέγονται όλο και περισσότερο από τους μετακινούμενους ως ένας ευέλικτος και γρήγορος τρόπος μετακίνησης μέσα στις πόλεις οξύνει το πρόβλημα, αφού η ανομοιογένεια που δημιουργείται στη ροή κάνει την προτυποποίησή της δυσκολότερη και επομένως την επίλυση των προβλημάτων που συνδέονται με αυτή. Η αστάθεια λοιπόν που δημιουργείται στην κυκλοφοριακή ροή μπορεί να αποκρύπτει ένα σημαντικό παράγοντα στα προβλήματα που δημιουργούνται σε αυτή και που (υπό προϋποθέσεις) μπορούν να οδηγήσουν σε επιδείνωση των κυκλοφοριακών συνθηκών (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Η κυκλική επίδραση των Μηχανοκίνητων Δικύκλων στην Κυκλοφορία

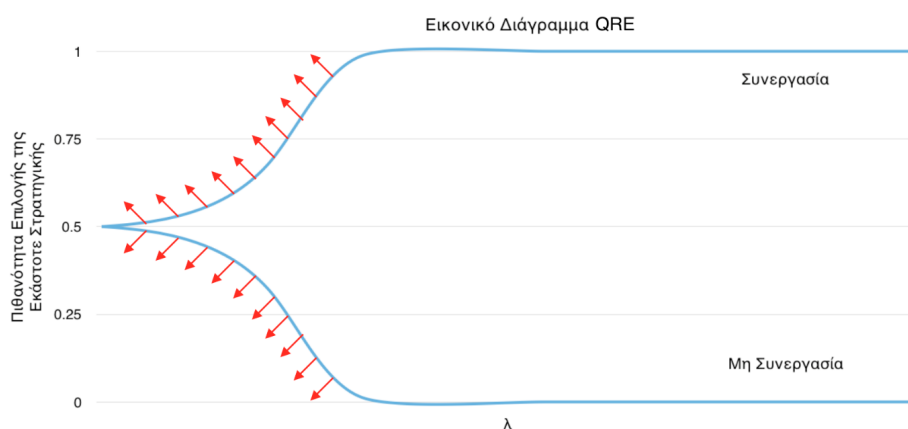
Προηγούμενες προσεγγίσεις των Συγκοινωνιολόγων Μηχανικών στα προβλήματα της κυκλοφοριακής συμφόρησης είχαν ως κεντρικό τους άξονα την ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών και μεγάλα έργα υποδομών, με την επέκταση, διατήρηση ή βελτίωσή τους. Παρόλ' αυτά, προβλήματα κόστους και χωροταξίας κάνουν πολλές φορές τέτοιες λύσεις να μοιάζουν αδύνατες και άλλες φορές υπερβολικές ή αχρείαστες. Η πρόσφατη έλευση της δυνατότητας ανάλυσης τεράστιου όγκου δεδομένων (Big Data) και των νέων τεχνολογιών (ασύρματη τεχνολογία, GPS, υπηρεσίες τοποθεσίας, υπηρεσίες Cloud) μπορούν όχι μόνο να βελτιώσουν την κυκλοφορία αλλά και να καταστήσουν δυνατή την ανάπτυξη νέων συστημάτων υποβοήθησης οδηγών. Έξυπνα συστήματα μεταφορών που απευθύνονται στο χρήστη και αυτόνομες ή ημιαυτόνομες V2V επικοινωνίες μπορούν να παρέχουν μία βιώσιμη πλατφόρμα για να ελέγξουν τη μικροσκοπική συμπεριφορά του οδηγού με στόχο να μειώσουν τους παράγοντες αποσταθεροποίησης της κυκλοφορίας και να αυξήσουν την κινητικότητα σε οδικά αστικά δίκτυα. Αυτά τα συστήματα θεωρούνται από πολλούς ότι θα ανοίξουν το δρόμο για το σχεδιασμό νέων στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας προς μία κατεύθυνση όπου η ρύθμιση των μικροσκοπικών παραμέτρων θα βελτιώνουν μακροσκοπικά τις συνθήκες του δικτύου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις έντονες διαφορές μεταξύ των ΜΔ και των άλλων οχημάτων, κάποιος θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι οι παρατηρούμενες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ΜΔ και των υπόλοιπων οχημάτων, είναι μια αντανάκλαση των συγκεκριμένων στρατηγικών που ακολουθούν οι οδηγοί σε σχέση με τους υπόλοιπους. Με τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση αυτής της κατάστασης, δηλαδή την μετατροπή των ατομικών συμπεριφορών σε συνεργατικές στρατηγικές, θα μπορούσαν να προκύψουν ευνοϊκές συνθήκες για την κυκλοφορία όχι μόνο μικροσκοπικά, αλλά και για μεγάλη κλίμακας κυκλοφοριακά δίκτυα (Klein and Ben-Elia, 2016; Miller,

2013). Ο ρόλος ενός διαχειριστή σε αυτό το επίπεδο αφορά τον ορισμό των συνθηκών συνεργασίας που, έχοντας επικοινωνήσει την απαραίτητη πληροφορία στο χρήστη, θα μπορεί ουσιαστικά να ρυθμίζει τη συμπεριφορά του.

Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των προσπεράσεων σε συνθήκες συνεργασίας ήταν της τάξης του 240% και 16.6% στη μέση ταχύτητα των δικύκλων, γεγονός που μπορεί να φέρει σημαντικές βελτιώσεις στην κυκλοφορία. Ως εκ τούτου, όταν σε ένα κυκλοφοριακό σύστημα παρουσιάζεται αυξημένος αριθμός ΜΔ, ο διαχειριστής θα μπορεί να δίνει την πληροφορία για συνεργατικά όρια μεταξύ των υπόλοιπων οχημάτων, τα οποία θα εκμεταλλεύονται οι φάλαγγες δικύκλων για να φιλτράρουν την κυκλοφορία και να αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος, ενώ όταν τα ΜΔ είναι περιορισμένα σε αριθμό, οι χωρικοί διαχωρισμοί μεταξύ των οχημάτων θα είναι μικρότερη για την αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας μιας οδού.

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία του QRE που είδαμε προηγουμένως, με το να λαμβάνει συστάσεις ο οδηγός για τον τρόπο που θα κινηθεί στην οδό, ουσιαστικά ελέγχεται η παράμετρος λ , που όπως είδαμε αποτελεί ένα μέτρο της ορθολογικότητας των παικτών. Οι καμπύλες που διαμορφώθηκαν γίνονται σαφώς πιο απότομες, με αποτέλεσμα ο οδηγός να εκπαιδεύεται γρηγορότερα και με μεγαλύτερη σιγουριά προς τη βέλτιστη λύση (Εικόνα 32). Η επικοινωνία όμως της απαραίτητης και ακριβούς πληροφορίας δεν αρκεί για να αλλάξει κάποιος τη συμπεριφορά του (Vlahogianni and Barmounakis, 2017). Για παράδειγμα, αν και η πλειοψηφία των οδηγών γνωρίζει τις συνέπειες του να μη φοράει κάποιος κράνος ή ζώνη ασφαλείας, πολλοί συνειδητά επιλέγουν να μην κάνουν τη σωστή χρήση τους, αμελώντας τις σημαντικές συνέπειες που μπορεί να έχει αυτή τους η επιλογή, ή παρομοίως ενώ πληροφορούνται μέσω συνδεδεμένων πληροφοριακών συστημάτων και GPS ότι η οδός που πρόκειται να κινηθούν έχει αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση, δεν επιλέγουν κάποια (καλύτερη) εναλλακτική και εμμένουν στην πορεία τους.



Εικόνα 32: Εικονικό Διάγραμμα Μεταβολής QRE

Η άποψη αυτή ενισχύεται σε μεγάλο βαθμό από έρευνες στον τομέα της Ψυχολογίας της Συμπεριφοράς (Behavioral Psychology) και πιο συγκεκριμένα της Θετικής Κοινωνικής Συμπεριφοράς (Pro-social Behavior). Όπως αναφέρεται στην εργασία του (Miller, 2013), ο όρος συνεργασία αφορά τελικά καταστάσεις όπου ένα άτομο συμβιβάζεται να δουλέψει με κάποιο άλλο με σκοπό το μακροπρόθεσμο όφελος, αφού υπάρχει πιθανότητα να μη βελτιωθεί η κατάσταση για κανέναν από τους δύο τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα. Όμως, η βιβλιογραφία αναφέρει ότι για να επέλθει συνεργασία δεν απαιτείται απαραίτητα αλtruισμός, αφού σύμφωνα με τη θεωρία της Θετικής Κοινωνικής Συμπεριφοράς, κάποιος μπορεί να δρα συνεργατικά είτε με αλtruιστικά κίνητρα (λόγω συμπάθειας και κατανόησης) είτε με εγωιστικά κίνητρα (βοηθώντας κάποιον να βοηθηθεί τελικά ο ίδιος) (Avineri, 2009; Bierhoff, 2002). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί πολλάκις ότι για να επέλθει τελικά συνεργασία μεταξύ των αλληλεπιδρούντων μελών δεν απαιτείται προσυνεννόηση ή φιλία μεταξύ τους (Axelrod, 1984). Οι εξελίξεις στον τομέα της ψυχολογίας τείνουν να θεωρούν ότι η παραδοσιακή άποψη ότι η συμπεριφορά ενός ατόμου διαμορφώνεται κατά βάση από το εξωτερικό περιβάλλον και την αλληλεπίδρασή του με αυτό (συμπεριφορισμός) είναι πλέον παρωχημένη (Miller, 2003) και ως εκ τούτου θα πρέπει καταρχάς να αλλάζει ο τρόπος σκέψης ενός ατόμου πριν ακολουθήσει η συμπεριφορά. Άρα όσον αφορά τη συμπεριφορά των οδηγών, προκύπτει ότι θα πρέπει να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα αλλαγής του τρόπου σκέψης των οδηγών και του γενικότερου τρόπου με τον οποίο αντιλαμβάνονται τις μετακινήσεις τους με το να μετατραπεί η «απρόβλεπτη» κυκλοφοριακή συμπεριφορά των οδηγών σε ορισμένη στρατηγική.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι η τιμωρία για τις φορές που δεν οδηγούν σωστά ή νόμιμα δεν μπορεί να αποτελέσει το μοναδικό μέτρο για να μειωθούν οι μη ορθολογικές και εγωιστικές συμπεριφορές. Με αυτή τη διαπίστωση, τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί ένας καινούριο εργαλείο αλλαγής κινητοποίησης των ατόμων για να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους, γνωστό ως Gamification ή «Παιγνιδοποίηση». Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η Παιγνιδοποίηση δεν έχει κάποια σχέση με τη Θεωρία Παιγνίων που συζητήθηκε προηγουμένως, αφού το πρώτο αφορά την χρήση μεθοδολογιών, ιδεών και στοιχείων από παιχνίδια για την αντιμετώπιση προβληματικών καταστάσεων (Marczewski, 2013). Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, και εφαρμόζοντας της αρχές της Παιγνιδοποίησης, θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένα εργαλείο που θα προωθεί τη συνεργασία των οδηγών, ευνοώντας τέτοιου είδους συμπεριφορές (Vlahogianni and Barmounakis, 2017). Για παράδειγμα, ο οδηγός θα μπορεί να βαθμολογείται σε σχέση με το πόσο συνεργάσιμος ή όχι ήταν και να λαμβάνει αναφορές για το τι θα έχανε/κέρδιζε αν ακολουθούσε διαφορετική συμπεριφορά. Η βαθμολογία αυτή θα μπορούσε αργότερα να μεταφραστεί όχι μόνο σε προσωπική βελτίωση του εκάστοτε οδηγού αλλά και σε πιο πρακτικές

απολαβές, για παράδειγμα μείωση στα ασφάλιστρά του, χρηματικά και άλλα βραβεία, αναγνώριση σε κοινωνικά δίκτυα, εξαγοράσιμους πόντους κ.α. (Mahogianni and Barmounakis, 2017).

Στο ίδιο πλαίσιο, ενώ το προσωπικό όφελος ταυτίζεται με το «κοινό καλό», αυτό δεν είναι σίγουρο ότι θα επιλέγεται πάντα. Υπάρχουν περιπτώσεις που ένας οδηγός ενδέχεται να μην ενδιαφέρεται για το προσωπικό του όφελος, για παράδειγμα αν είναι σε ταξίδι αναψυχής και δεν είναι στις πρώτες προτεραιότητές του οι υψηλές ταχύτητες αλλά η ασφάλεια και η άνεση. Σε ένα σύστημα συλλογής πόντων, όπου ο συνεργατικός οδηγός επιβραβεύεται για μελλοντική εξαργύρωσή τους, η παραπάνω πληροφορία αφήνει ανοιχτό έδαφος για μία πληθώρα εφαρμογών και επιχειρηματικών ιδεών, αντίστοιχων με αυτών των hot-lanes που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις ΗΠΑ (Lou et al., 2016; Ye and Chen, 2017). Για παράδειγμα, εφόσον κάποιος οδηγός επιθυμεί, θα μπορεί να επιλέγει μία βραχυπρόθεσμη μείωση της απολαβής του (για παράδειγμα χαμηλότερες ταχύτητες) με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών γύρω του και την απόκτηση πόντων για μελλοντική εξαργύρωσή τους. Παράλληλα, στο ίδιο οδικό δίκτυο μπορούν να υπάρχουν οδηγοί που να επιθυμούν να κινηθούν πιο γρήγορα σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα της οδού οι οποίοι θα εξαργυρώνουν πόντους ή θα αγοράζουν αυξημένη απολαβή σε σχέση με τους υπόλοιπους χωρίς τη δημιουργία κάποιας αίσθησης αδικίας ή εκμετάλλευσης.

7.4. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η συγκεκριμένη διατριβή δεν εξαντλεί τις δυνατότητες μελέτης και έρευνας στα θέματα που καταρχήν πραγματεύεται. Η περιορισμένη έρευνα στον τομέα της κυκλοφορίας των ΜΔ και της επίδρασής τους στην κυκλοφορία αφήνουν ανοιχτά μέτωπα, ευκαιρίες για μελλοντική διαφορετική ανάλυση των στοιχείων και αμφισβήτηση των υποθέσεων που έγιναν στη συγκεκριμένη διατριβή. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που διαπιστώθηκαν και χωρίζονται με βάση τις σημαντικότερες ενότητες της συγκεκριμένης διατριβής, δηλαδή τη μέθοδο συλλογής δεδομένων, τα πρότυπα μηχανικής μάθησης και της αντιμετώπισης του φαινομένου της προσπέρασης υπό το πρίσμα της Θεωρίας Παιγνίων.

Αρχικά, η χρήση των UAS για την καταγραφή και παρατήρηση της κυκλοφορίας είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος καταγραφής της κυκλοφορίας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τον ερευνητή σε σχέση με τη σταθερή κάμερα, αναδεικνύεται η ανάγκη για αύξηση του μήκους καταγραφής για τη διερεύνηση πιο σύνθετων φαινομένων. Ως εκ τούτου, σε μελλοντικές έρευνες θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να διερευνηθεί η δυναμική αλλαγή σε συνεχόμενες αποφάσεις του ίδιου μοτοσυκλετιστή, όπου το UAV θα τον ακολουθεί και θα καταγράφει την κυκλοφορία σε μεγάλα αστικά τμήματα. Οι δυσκολίες σε ένα τέτοιο εγχείρημα

αφορούν αρχικά την αποτελεσματικότητα των ήδη υπαρχόντων αλγορίθμων για τον εντοπισμό και παρακολούθηση συγκεκριμένου αντικειμένου, της σταθεροποίησης του βίντεο αλλά περισσότερο την βαθμονόμηση τού βίντεο σε διαφορετικά σημεία καθώς το UAV θα κινείται. Μία εναλλακτική, θα μπορούσε να είναι η ήδη διατυπωμένη πρόταση για συλλογή δεδομένων από ένα σμήνος UAVs (Swarm of Drones) που θα ίπτανται συνεργατικά για να αυξήσουν το μήκος καταγραφής. Σε αυτήν την περίπτωση τα προβλήματα που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ο ερευνητής θα αφορούν την ταύτιση των ίδιων οχημάτων αλλά και θέματα βαθμονόμησης μεταξύ διαφορετικών καταγραφών.

Σαφώς, η αύξηση του μήκους καταγραφής θα μπορέσει να δώσει ακόμη μεγαλύτερη διάσταση στην προτυποποίηση ιδιαίτερα πολύπλοκων φαινομένων για την καλύτερη κατανόηση και αναπαράστασή τους. Για παράδειγμα, ένα από τα θέματα που προέκυψαν ήταν ο ελάχιστος αριθμός προσπεράσεων που ενώ αρχικά ο μοτοσυκλετιστής είχε πάρει την απόφαση για προσπέραση τελικά ματαιώθηκε.

Εκτός όμως από τα θέματα δεδομένων, η συγκεκριμένη διατριβή ανέδειξε τις μεγάλες δυνατότητες που έχουν οι τεχνικές μηχανικές μάθησης στην προτυποποίηση σύνθετων φαινομένων. Αν και τα Δέντρα Αποφάσεων μπορούν να προβλέψουν σε ικανοποιητικό βαθμό την οδηγική συμπεριφορά στο συγκεκριμένο φαινόμενο, υπάρχουν και άλλες συναφείς τεχνικές που θα μπορούσαν να αποδειχτούν αποτελεσματικές και να περιγράψουν με ικανοποιητικό βαθμό τη διαδικασία λήψης των αποφάσεων του μοτοσυκλετιστή. Επιπλέον, τα προτεινόμενα πρότυπα θα μπορούσαν να διερευνηθούν περαιτέρω σε θέματα οδικής ασφάλειας, για παράδειγμα το αν και πως θα αποδέχονταν ένα τέτοιο σύστημα οι μοτοσυκλετιστές και ποια η επίδρασή τους στον αριθμό των οδικών ατυχημάτων.

Επιπλέον, η προσέγγιση στο φαινόμενο της προσπέρασης υπό το πρίσμα της Θεωρίας Παιγνίων είναι καινούρια σε φαινόμενα προσπέρασης μοτοσυκλετιστών και ως εκ τούτου η διαμόρφωση του παιγνίου μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά. Αρχικά, σε μελλοντικές έρευνες θα μπορεί κάποιος να συμπεριλάβει διαφορετικές ή περισσότερες στρατηγικές πέραν από τις δύο που επιλέχθηκαν στην παρούσα προσέγγιση. Για παράδειγμα, θα μπορούσε κάποιος να συμπεριλάβει μία ουδέτερη στρατηγική, κατά την οποία ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος ούτε βοηθάει τον μοτοσυκλετιστή στην προσπέραση, ούτε όμως δυσκολεύει και την προσπάθειά του. Αντίστοιχα, ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται οι συνθήκες συνεργασίες (πέραν από τα όρια στις τιμές των διάφορων μεταβλητών) μπορεί να αλλάξει και να εισαχθούν διαφορετικά κριτήρια.

Παράλληλα, μία διαφορετική προσέγγιση θα μπορούσε να περιέχει την επαναπροσέγγιση της απολαβής της οποίας ο κάθε οδηγός θεωρεί σημαντική και τελικά συμπεριλαμβάνει στη διαδικασία λήψης της στρατηγικής του. Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκαν ταχύτητες,

προσπεράσεις και το νέο ορισμένο μέγεθος «Άνεση κατά την Προσπέραση», ενώ σε μελλοντικές έρευνες μπορούν να δημιουργηθούν νέα μεγέθη που να περιγράφουν συνδυασμό αυτών ή διαφορετικές έννοιες. Στο ίδιο πλαίσιο, η προσπέραση θα μπορούσε να θεωρηθεί μία διαφορετική διαδικασία λήψης αποφάσεων υπό το πρίσμα της Θεωρίας Προοπτικής (Prospect Theory) όπου οι δύο παίκτες έχουν διαφορετική εκτίμηση για τις απολαβές και τις ζημίες που προκύπτουν από τις στρατηγικές τους. Η συγκεκριμένη θεωρία μπορεί να δώσει σημαντικά ευρήματα στον τρόπο με τον οποίο κάποιον επιλέγει να προσπεράσει ή όχι, αφού παρόλο που η απολαβή από μία προσπέραση είναι σημαντική, η ζημία από μία ενδεχόμενη σύγκρουση ή ατύχημα θα είχε πολύ σημαντικότερα αποτελέσματα.

Τέλος, τα ευρήματα της παρούσας διατριβής και υπό την παρούσα θεώρηση μπορεί να συμπεριληφθούν σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης ώστε να μπορέσουν να γίνουν καλύτερα αντιληπτά τα αποτελέσματα που θα επέφερε στην κυκλοφορία ένα συνεργατικό δίκτυο μεταξύ οδηγών και μοτοσυκλετιστών. Αν και στην προσομοίωση των συνθηκών επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων υπάρχουν ακόμη σημαντικά θέματα προς επίλυση (Alexiadis and Campbell, 2017), θα είναι δυνατή η εξαγωγή σημαντικών ευρημάτων για την καλύτερη αποτύπωση σύνθετων κυκλοφοριακών φαινομένων. Παρόλ' αυτά, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η προσομοίωση συνθηκών συνεργασίας αλλά και των προτύπων πρόβλεψης που δημιουργήθηκαν σε καταστάσεις μικτής πληροφορίας για διαφορετική ποσόστωση ΜΔ και υπόλοιπων οχημάτων, ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή τους στην κυκλοφορία και να διερευνηθούν περαιτέρω λύσεις στα προβλήματα που παρουσιάζονται στην κυκλοφοριακή ροή.

Αν και στην παρούσα διατριβή γίνονται σαφή τα οφέλη της συνεργασίας μεταξύ των οδηγών για την κυκλοφορία, η έλευση των αυτόνομων και ημιαυτόνομων οχημάτων θα αποδείξει στην πράξη το αν οι εγωιστικές τάσεις των οδηγών θα πρέπει να εξαλειφθούν τελείως για ένα ασφαλές, άνετο και αποδοτικό κυκλοφοριακό περιβάλλον.

Αναφορές

Ρεφανίδης, Γ., 2010. Θεωρία Παιγνίων.

ACEM, 2016. ACEM market update : May 2016.

Adell, E., Várhelyi, A., Fontana, M.D., 2011. The effects of a driver assistance system for safe speed and safe distance - A real-life field study. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*
doi:10.1016/j.trc.2010.04.006

Adler, J.L., Blue, V.J., 2002. A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 10, 433–454. doi:10.1016/S0968-090X(02)00030-X

Adler, J.L., Satapathy, G., Manikonda, V., Bowles, B., Blue, V.J., 2005. A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance. *Transp. Res. Part B Methodol.* 39, 297–318.
doi:10.1016/j.trb.2004.03.005

Aikyo, Y., Kobayashi, Y., Akashi, T., Ishiwatari, M., 2015. Feasibility Study of Airbag Concept Applicable to Motorcycles Without Sufficient Reaction Structure. *Traffic Inj. Prev.* 16, S148–S152.
doi:10.1080/15389588.2015.1016156

Alexiadis, V., Campbell, R., 2017. An Evaluation of Current Simulation Analysis Capabilities and Near-Term Needs for Modeling Connected Vehicle Applications, in: *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1–21.

Ambarwati, L., Pel, A.J., Verhaeghe, R., Arem, B. Van, 2014. Empirical analysis of heterogeneous traffic flow and calibration of porous flow model. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 48, 418–436.
doi:10.1016/j.trc.2014.09.017

Andersson, H., Lundborg, P., 2007. Perception of own death risk An analysis of road-traffic and overall mortality risks. *J. Risk Uncertain.* 34, 67–84. doi:10.1007/s11166-006-9004-3

Arasan, V.T., Kashani, S.H., 2003. Modeling Platoon Dispersal Pattern of Heterogeneous Road Traffic. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 175–182. doi:10.3141/1852-22

Arbis, D., Dixit, V. V., Hossein Rashidi, T., 2016. A Game Theoretic Model of Manoeuvres at a Signalised Intersection Incorporating Perceived Risk. *Transp. Res. Board 95th Annu. Meet. Compend. Pap.* 1–18.

- Attal, F., Boubezoul, A., Oukhellou, L., Cheifetz, N., Espie, S., 2014. The Powered Two Wheelers fall detection using Multivariate CUMulative SUM (MCUSUM) control charts. 2014 IEEE 17th Int. Conf. Intell. Transp. Syst. 1280–1285.
- Aupetit, S., Gallier, V., Riff, J., Espié, S., Delgehier, F., 2016. Naturalistic study of the risky situations faced by novice riders. *Ergonomics* 139, 1–12. doi:10.1080/00140139.2015.1120887
- Avineri, E., 2009. Social value orientation and the efficiency of traffic networks.
- Axelrod, R., 1984. The evolution of cooperation. Basic Books.
- Banjanovic-mehmedovic, L., Halilovic, E., Bosankic, I., Kantardzic, M., Kasapovic, S., 2016. Autonomous Vehicle-to-Vehicle (V2V) Decision Making in Roundabout using Game Theory. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 7, 292–298.
- Barpounakis, E.N., 2016. Optimizing Strategies between Drivers to Manage Congestion. *TRA Visions 2016 Contest B.* 39.
- Barpounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2017. Modeling Cooperation and Powered-Two Wheelers Short-term Strategic Decisions during Overtaking in Urban Arterials. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* In Press.
- Barpounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2016a. Intelligent Transportation Systems and Powered Two Wheelers Traffic. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 17, 908–916. doi:10.1109/TITS.2015.2497406
- Barpounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2016b. Vision based multivariate statistical modeling for Powered Two-Wheelers Maneuverability during Overtaking in Urban Arterials. *Transp. Lett. Int. J. Transp. Res.* 8, 167–176.
- Barpounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2016c. Extracting Kinematic Characteristics from Unmanned Aerial Vehicles. *Transp. Res. Board 95th Annu. Meet. Compend. Pap.* 16, 16p.
- Barpounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2015. A Game Theoretic Approach to Powered Two Wheelers Overtaking Phenomena. *Proc. 94th Annu. Meet. Transp. Res. Board.* 1–14.
- Barpounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2014. Investigating Powered Two Wheelers Overtaking Behavior in Urban Arterials. *Proc. 93rd Annu. Meet. Transp. Res. Board.* 1–16.
- Bauza, R., Gozalez, J., Sanchez-Soriano, J., 2010. Road traffic congestion detection through cooperative Vehicle-to-Vehicle communications. *Proc. - Conf. Local Comput. Networks, LCN* 606–

612. doi:10.1109/LCN.2010.5735780

- Bayly, M., Regan, M., Hosking, S., 2006. Intelligent transport systems and motorcycle safety, Enhanced Safety of Vehicles.
- Beanland, V., Lenné, M.G., Fuessler, E., Oberlader, M., Joshi, S., Bellet, T., Banet, A., Rößger, L., Leden, L., Spyropoulou, I., Yannis, G., Roebroeck, H., Carvalhais, J., Underwood, G., 2013. Acceptability of rider assistive systems for powered two-wheelers. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 19, 63–76. doi:10.1016/j.trf.2013.03.003
- Bhavathrathan, B.K., Mallikarjuna, C., 2012. Evolution of macroscopic models for modeling the heterogeneous traffic: an Indian perspective. *Transp. Lett. Int. J. Transp. Res.* 4, 29–39. doi:10.3328/TL.2012.04.01.29-39
- Bierhoff, H.W., 2002. Prosocial Behaviour.
- Biral, F., Bosetti, P., Lot, R., 2014. Experimental evaluation of a system for assisting motorcyclists to safely ride road bends. *Eur. Transp. Res. Rev.*
- Biral, F., Da Lio, M., Lot, R., Sartori, R., 2010. An intelligent curve warning system for powered two wheel vehicles. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2, 147–156. doi:10.1007/s12544-010-0033-2
- Biral, F., Lot, R., Rota, S., Fontana, M., Huth, V., 2012. Intersection support system for powered two-wheeled vehicles: Threat assessment based on a receding horizon approach. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 13, 805–816. doi:10.1109/TITS.2011.2181835
- Bishop, R., 2000. Intelligent vehicle applications worldwide. *IEEE Intell. Syst.* 15, 78–81. doi:10.1109/5254.820333
- Biswas, S., Tatchikou, R., Dion, F., 2006. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *IEEE Commun. Mag.* 44, 74–82. doi:10.1109/MCOM.2006.1580935
- Bjørnskau, T., 2014. The Zebra Crossing Game – a game theoretic model to explain counter - rule interaction between cars and cyclists 1–8. doi:10.1016/j.ssci.2015.10.007
- Blomquist, G.C., 1991. Motorist use of safety equipment: Expected benefits or risk incompetence? *J. Risk Uncertain.* 4, 135–152. doi:10.1007/BF00056122
- Boillot, F., Midenet, S., Pierrelée, J.-C.C., 2006. The real-time urban traffic control system CRONOS: Algorithm and experiments. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 14, 18–38.

- Bonte, L., Espié, S., Mathieu, P., 2007. Virtual lanes interest for motorcycles simulation. *Proc. fifth Eur. Work. Multi-Agent Syst.* 580–596.
- Bradley, A.P., 1997. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognit.* 30, 1145–1159. doi:10.1016/S0031-3203(96)00142-2
- Braut, V., Culjak, M., Vukotic, V., Segvic, S., Sevrovic, M., Gold, H., 2012. Estimating OD matrices at intersections in airborne video - A pilot study. *MIPRO, 2012 Proc. 35th Int. Conv.* 977–982.
- Broughton, P.S., Fuller, R., Stradling, S., 2009. Conditions for speeding behaviour: A comparison of car drivers and powered two wheeled riders. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 12, 417–427. doi:10.1016/j.trf.2009.07.001
- Buch, N., Velastin, S. a., Orwell, J., 2011. A Review of Computer Vision Techniques for the Analysis of Urban Traffic. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 12, 920–939. doi:10.1109/TITS.2011.2119372
- Carsten, O.M.J., Sherborne, D., Rothengatter, J., 1998. Intelligent traffic signals for pedestrians: evaluation of trials in three countries. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 6, 213–229.
- Cavallo, V., Ranchet, M., Pinto, M., Espie, S., Vienne, F., Dang, N.-T., 2013. Improving car drivers' perception of motorcyclists through innovative headlight configurations. *Accid. Anal. Prev.* 81, 7p. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.034
- Chen, B., Cheng, H., 2010. A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. *Intell. Transp. Syst. IEEE* 11, 485–497.
- Chen, H.-C., Friedman, J.W., Thisse, J.-F., 1997. Boundedly Rational Nash Equilibrium: A Probabilistic Choice Approach. *Games Econ. Behav.* 18, 32–54. doi:10.1006/game.1997.0514
- Cheng, P., Zhou, G., Zheng, Z., 2009. Detecting and counting vehicles from small low-cost UAV images, in: *ASPRS 2009 Annual Conference, Baltimore*. pp. 138–144.
- Cho, H., Wu, Y., 2004. Modeling and simulation of motorcycle traffic flow, in: *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. IEEE, pp. 6262–6267. doi:10.1109/ICSMC.2004.1401382
- Chung, Y., Song, T., Park, J., 2012. Freeway booking policy: Public discourse and acceptability analysis. *Transp. Policy* 24, 223–231. doi:10.1016/j.tranpol.2012.08.004
- Clabaux, N., Fournier, J., Michel, J., 2014. Powered two-wheeler drivers ' crash risk associated with the

use of bus lanes. *Accid. Anal. Prev.* 71, 306–310. doi:10.1016/j.aap.2014.05.021

Cobo, M.J., Chiclana, F., Collop, a., de Ona, J., Herrera-Viedma, E., 2014. A Bibliometric Analysis of the Intelligent Transportation Systems Research Based on Science Mapping. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 15, 901–908. doi:10.1109/TITS.2013.2284756

Coifman, B., Beymer, D., McLauchlan, P., Malik, J., 1998. A real-time computer vision system for vehicle tracking and traffic surveillance. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 6, 271–288.

Coifman, B., McCord, M., Mishalani, R.G., Redmill, K., 2004. Surface transportation surveillance from unmanned aerial vehicles. *Proc. 83rd Annu. Meet. Transp. Res. Board.*

Coifman, B., McCord, M., Mishalani, R.G.R., 2006. Traffic Flow Data Extracted from Imagery Collected Using a Micro Unmanned Aerial Vehicle. *Appl. Adv. Technol. Transp. Ninth Int. Conf.* 298–303. doi:10.1061/40799(213)47

Crundall, D., Bibby, P., Clarke, D., 2008. Car drivers' attitudes towards motorcyclists: A survey. *Accid. Anal. Prev.* 40, 983–993. doi:10.1016/j.aap.2007.11.004

Cuena, J., Hernández, J., Molina, M., 1995. Knowledge-based models for adaptive traffic management systems. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 3, 311–337. doi:10.1016/0968-090X(95)00013-9

Darbha, S., Rajagopal, K., 1999. Intelligent cruise control systems and traffic flow stability. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 7, 329–352.

DataFromSky, 2016. Advanced traffic analysis of aerial video data [WWW Document]. URL <http://datafromsky.com> (accessed 3.30.16).

De Filippi, P., Tanelli, M., Corno, M., Savaresi, S.M., Santucci, M.D., 2014. Electronic stability control for powered two-wheelers. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 22, 265–272. doi:10.1109/TCST.2013.2238541

de la Escalera, a., Armingol, J.M., Mata, M., 2003. Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles. *Image Vis. Comput.* 21, 247–258. doi:10.1016/S0262-8856(02)00156-7

de Oliveira, D., Bazzan, A.L.C., 2009. Multiagent Learning on Traffic Lights Control: Effects of Using Shared Information, in: *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*. pp. 307–322.

Di Stasi, L.L.L., Contreras, D., Cándido, a., Cañas, J.J.J., Catena, a., 2011. Behavioral and eye-movement measures to track improvements in driving skills of vulnerable road users: First-time

motorcycle riders. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 14, 26–35.
doi:10.1016/j.trf.2010.09.003

Dionne, G., Fluet, C., Desjardins, D., 2007. Predicted risk perception and risk-taking behavior: The case of impaired driving. *J. Risk Uncertain.* 35, 237–264. doi:10.1007/s11166-007-9023-8

DJI, 2016. Spreading Wings S900 - highly portable, powerful aerial system for the demanding filmmaker [WWW Document]. URL <http://www.dji.com/product/spreading-wings-s900> (accessed 5.30.16).

Doherty, P., Granlund, G., Kuchcinski, K., 2000. The WITAS unmanned aerial vehicle project. *ECAI*.

Elslande, P. Van, Fournier, J.-Y., 2017. Failures of Interaction between Powered Two-Wheeler Riders and Car Drivers in Urban Accidents. *Int. J. Transp. Dev. Integr.* 1, 235–244. doi:10.2495/TDI-V1-N2-235-244

Espié, S., Baldanzini, N., 2012. Powered Two-Wheelers and Intelligent Transport Systems. *FEMA Spec. Ed. Newsl.* April.

Esposito, F., Malerba, D., Semeraro, G., 1997. A comparative analysis of methods for pruning decision trees. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 19, 476–491. doi:10.1109/34.589207

European Aviation Safety Agency, 2016. “Prototype” Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations.

Eyssartier, C., Meineri, S., Gueguen, N., 2017. Motorcyclists' intention to exceed the speed limit on a 90km/h road: Effect of the type of motorcycles. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 45, 183–193. doi:10.1016/j.trf.2016.12.009

Fagnant, D.J., Kockelman, K., 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 77, 167–181.
doi:10.1016/j.tra.2015.04.003

Fang, C.-Y., Hsu, W.-H., Ma, C.-W., Chen, S.-W., 2014. A vision-based safety driver assistance system for motorcycles on a smartphone. 2014 IEEE 17th Int. Conf. Intell. Transp. Syst. 328–333.

Faouzi, N.-E. El, Leung, H., Kurian, A., 2011. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey. *Inf. Fusion* 12, 4–10. doi:10.1016/j.inffus.2010.06.001

Farah, H., Toledo, T., 2010. Passing behavior on two-lane highways. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 13, 355–364. doi:10.1016/j.trf.2010.07.003

Federal Aviation Administration, 2016. Summary of Small Unmanned Aircraft Rule. *FAA News*.

- Freund, Y., Schapire, R.E., 1996. Experiments with a New Boosting Algorithm. *ICML*. 96, 148–156.
- Frew, E., McGee, T., Kim, Z., 2004. Vision-based road-following using a small autonomous aircraft. *Aerosp. Conf. 2004. Proceedings*. 2004 IEEE 5.
- Gao, H., Kong, S.L., Zhou, S., Lv, F., Chen, Q., 2014. Automatic Extraction of Multi-Vehicle Trajectory Based on Traffic Videotaping from Quadcopter Model. *Appl. Mech. Mater.* 552, 232–239. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.552.232
- Garelli, L., Casetti, C., Chiasserini, C.F., Fiore, M., 2011. MobSampling: V2V communications for traffic density estimation. *IEEE Veh. Technol. Conf.* doi:10.1109/VETECS.2011.5956223
- Gheisari, M., Karan, E., Christmann, H.C., Irizarry, J., Johnson, E.N., 2015. Investigating Unmanned Aerial System (UAS) Application Requirements within a Department of Transportation, in: *Transportation Research Board 94th Annual Meeting Compendium of Papers*.
- Goel, S., Imielinski, T., Ozbay, K., 2004. Ascertaining viability of WiFi based vehicle-to-vehicle network for traffic information dissemination. *Proceedings. 7th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. (IEEE Cat. No.04TH8749)*. doi:10.1109/ITSC.2004.1399058
- Goeree, J.K., Holt, C.A., Pfaffrey, T.R., 2016. *Quantal Response Equilibrium: A Stochastic Theory of Games*. Princeton University Press.
- Golestan, K., Souza, R., Karray, F., Kamel, M.S., 2016. Game Theoretic Fuzzy Multi-Entity Bayesian Networks for Collision Avoidance in VANETs, in: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE, pp. 508–515. doi:10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737729
- Gomathi, C., Gandhimathi, D., Dhivya, K., Science, C., Studies, M., 2014. A Review on Vehicle-To-Vehicle Communication Protocols For Traffic Safety Using Co-Operative Collision Warning. *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Manag. Stud.* 7782, 278–287.
- Granlund, G., Nordberg, K., Wiklund, J., Doherty, P., Skarman, E., Sandewall, E., 2000. WITAS : An Intelligent Autonomous Aircraft Using Active Vision. *Proc. UAV 2000 Int. Tech. Conf. Exhib.*
- Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., Witten, I., 2009. The WEKA data mining software: An update. *SIGKDD Explor.* 11, 10–18. doi:10.1145/1656274.1656278
- Hallé, S., Chaib-draa, B., 2005. A collaborative driving system based on multiagent modelling and simulations. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 13, 320–345. doi:10.1016/j.trc.2005.07.004
- Hassan, H.M., Abdel-Aty, M. a., 2011. Analysis of drivers' behavior under reduced visibility conditions

- using a Structural Equation Modeling approach. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 14, 614–625. doi:10.1016/j.trf.2011.07.002
- Heesen, M., Baumann, M., Kelsch, J., 2012. Investigation of Cooperative Driving Behaviour during Lane Change in a Multi-Driver Simulation Environment. *Hfes-Europe.Org* 305–318.
- Hegeman, G., 2004. Overtaking frequency and advanced driver assistance systems. *IEEE Intell. Veh. Symp.* 2004 431–436. doi:10.1109/IVS.2004.1336422
- Hegeman, G., Brookhuis, K., Hoogendoorn, S., 2005. Opportunities of advanced driver assistance systems towards overtaking. *EJTIR*.
- Hegeman, G., Tapani, A., Hoogendoorn, S., 2009. Overtaking assistant assessment using traffic simulation. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 17, 617–630. doi:10.1016/j.trc.2009.04.010
- Heintz, F., Rudol, P., Doherty, P., 2007. From images to traffic behavior - A UAV tracking and monitoring application, in: *FUSION 2007 - 2007 10th International Conference on Information Fusion*. Ieee, pp. 1–8. doi:10.1109/ICIF.2007.4408103
- Hernández, J., Ossowski, S., Garcia-Serrano, A., Hernandez, J., 2002. Multiagent architectures for intelligent traffic management systems. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 10, 473–506. doi:10.1016/S0968-090X(02)00032-3
- Hollander, Y., Prashker, J.N., 2006. The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis. *Transportation (Amst)*. 481–496. doi:10.1007/s11116-006-0009-1
- Hsieh, J.-W., Yu, S.-H., Chen, Y.-S., Hu, W.-F., 2006. Automatic Traffic Surveillance System for Vehicle Tracking and Classification. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 7, 175–187. doi:10.1109/TITS.2006.874722
- Hsu, T., Sadullah, E., Dao, I., 2003. A comparison study on motorcycle traffic development in some Asian countries—case of Taiwan, Malaysia and Vietnam. *East. Asia Soc. Transp. Stud. Int. Coop. Res. Act.*
- Huang, B., Preston, J., 2004. A Literature Review on Motorcycle Collisions Final Report. *Transp. Stud. Unit Oxford Univ.*
- Hung, N.V., Dung, N.H., Tran, L.C., Hoang, T.M., Dzung, N.T., 2016. Vehicle classification by estimation of the direction angle in a mixed traffic flow, in: *2016 IEEE 6th International Conference on Communications and Electronics, IEEE ICCE 2016*. pp. 365–368. doi:10.1109/CCE.2016.7562663

- Huth, V., Biral, F., Martín, O., Lot, R., 2012. Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning system for motorcyclists in a simulator study. *Accid. Anal. Prev.* 44, 118–25. doi:10.1016/j.aap.2011.04.023
- Huth, V., Lot, R., Biral, F., Rota, S., 2012. Intelligent intersection support for powered two-wheeled riders: a human factors perspective. *IET Intell. Transp. Syst.* 6, 107. doi:10.1049/iet-its.2011.0130
- IEEE Spectrum, 2016. Dutch Police Training Eagles to Take Down Drones - IEEE Spectrum [WWW Document]. URL <http://spectrum.ieee.org/autaton/robotics/drones/dutch-police-training-eagles-to-take-down-drones>
- Jamson, S., Chorlton, K., Carsten, O.M.J., 2012. Could Intelligent Speed Adaptation make overtaking unsafe? *Accid. Anal. Prev.* 48, 29–36. doi:10.1016/j.aap.2010.11.011
- Jia, D., Ngoduy, D., 2016. Enhanced cooperative car-following traffic model with the combination of V2V and V2I communication. *Transp. Res. Part B Methodol.* 90, 172–191. doi:10.1016/j.trb.2016.03.008
- Kaaniche, K., Champion, B., Pégard, C., Vasseur, P., 2005. A vision algorithm for dynamic detection of moving vehicles with a UAV, in: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 78–83. doi:10.1109/ROBOT.2005.1570387
- Kanistras, K., Martins, G., Rutherford, M.J., Valavanis, K.P., 2014. Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring, in: *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, pp. 2643–2666. doi:10.1109/ICUAS.2013.6564694
- Karlaftis, M.G., Golias, J.C., Papadimitriou, S., 2001. Transit quality as an integrated traffic management strategy: measuring perceived service. *J. Public Transp.*
- Katachanaki, P., Bampounakis, E.N., Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2015. Multivariate Statistical Methods for explaining Powered Two Wheelers' Traffic in Urban Arterials, in: *7th International Congress on Transport Research - ICTR*.
- Katagiri, N., Marumo, Y., Tsunashima, H., 2009. Controller Design and Evaluation of Lane-Keeping-Assistance System for Motorcycles. *J. Mech. Syst. Transp. Logist.* 2, 43–54. doi:10.1299/jmtl.2.43
- Kita, H., 1999. A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 33, 305–312. doi:10.1016/S0965-8564(98)00039-1
- Kita, H., Tanimoto, K., Fukuyama, K., 2002. A Game Theoretic Analysis of Merging-Giveway Interactions - A Joint Estimation Model. *Transp. Traffic Theory* 15, 503–518.

- Klein, I., Ben-Elia, E., 2016. Emergence of cooperation in congested road networks using ICT and future and emerging technologies: A game-based review. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 72, 10–28. doi:10.1016/j.trc.2016.09.005
- Kokubo, S., Tanimoto, J., Hagishima, A., 2011. A new Cellular Automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 390, 561–568. doi:10.1016/j.physa.2010.10.027
- Kov, M., Yai, T., 2010. Traffic characteristics of motorcycle-dominated urban street considering the effect of light vehicle. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 8, 1806–1821.
- Lan, L.W., Chiou, Y.-C., Lin, Z.-S., Hsu, C.-C., 2010. Cellular automaton simulations for mixed traffic with erratic motorcycles' behaviours. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 389, 2077–2089. doi:10.1016/j.physa.2010.01.028
- Lan, L.W., Chiou, Y.-C., Lin, Z.-S., Hsu, C.-C., 2009. A refined cellular automaton model to rectify impractical vehicular movement behavior. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 388, 3917–3930. doi:10.1016/j.physa.2009.05.039
- Laval, J. a., 2011. Hysteresis in traffic flow revisited: An improved measurement method. *Transp. Res. Part B Methodol.* 45, 385–391. doi:10.1016/j.trb.2010.07.006
- Law, T.H., Radin Umar, R.S., 2005. Determination of comfortable safe width in an exclusive motorcycle lane. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 6, 3372–3385.
- Lee, J., Park, B., 2012. Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 13, 81–90. doi:10.1109/TITS.2011.2178836
- Lee, J., Zhong, Z., Kim, K., Dimitrijevic, B., Du, B., Gutesa, S., 2015. Examining the Applicability of Small Quadcopter Drone for Traffic Surveillance and Roadway Incident Monitoring. *Transp. Res. Board 94th Annu. Meet. Compend. Pap.*
- Lee, T.-C., 2007. An agent-based model to simulate motorcycle behaviour in mixed traffic flow 1–227.
- Lee, T.-C., Polak, J.W., Bell, M.G.H., 2009. New Approach to Modeling Mixed Traffic Containing Motorcycles in Urban Areas. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2140, 195–205. doi:10.3141/2140-22
- Lee, T.-C., Polak, J.W., Bell, M.G.H., Wigan, M.R., 2012. The kinematic features of motorcycles in congested urban networks. *Accid. Anal. Prev.* 49, 203–211. doi:10.1016/j.aap.2011.04.002

- Lee, T.-C., Wong, K.I., 2016. An agent-based model for queue formation of powered two-wheelers in heterogeneous traffic. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* doi:10.1016/j.physa.2016.05.005
- Lee, W.-H., Tseng, S.-S., Shieh, W.-Y., 2010. Collaborative real-time traffic information generation and sharing framework for the intelligent transportation system. *Inf. Sci. (Ny)*. 180, 62–70. doi:10.1016/j.ins.2009.09.004
- Lee, Y.M., Sheppard, E., 2016. The effect of motion and signalling on drivers' ability to predict intentions of other road users. *Accid. Anal. Prev.* 95, 202–208. doi:10.1016/j.aap.2016.07.011
- Lenhart, D., Hinz, S., Leitloff, J., Stilla, U., 2008. Automatic traffic monitoring based on aerial image sequences. *Pattern Recognit. Image Anal.* 18, 400–405. doi:10.1134/S1054661808030061
- Leong, L.V., Mohd Sadullah, A.F., 2007. A STUDY ON THE MOTORCYCLE OWNERSHIP: A CASE STUDY IN PENANG STATE, MALAYSIA. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 7, 528–539.
- Levin, J., 2002. Extensive Form Games. *Stanford Univ. Lect. Notes* 1–22.
- Li, C., Dixit, V. V., Hamdar, S.H., 2016. Estimating Risk Attitude and Risk Perception in Car Following. *Transp. Res. Board 95th Annu. Meet. Compend. Pap.* 1–18.
- Li, L., Wang, F.-Y., 2006. Cooperative Driving at Blind Crossings Using Intervehicle Communication. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 55, 1712–1724. doi:10.1109/TVT.2006.878730
- Li, Y., 2008. Fuzzy Image Segmentation From High Resolution Uav Aerial, in: *ISPRS08*. p. B3b 529.
- Lima, C., Cardoso, J.L., Ben-Akiva, M.E., Costeira, J.P., Marques, M., Azevedo, C.L., Cardoso, J.L., Ben-Akiva, M.E., Costeira, J.P., Marques, M., 2014. Automatic Vehicle Trajectory Extraction by Aerial Remote Sensing. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 111, 849–858. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.119
- Lin, P.-S., Puri, A., Hagen, L., Valavanis, K., 2006. Automatic Transformation of Video Image Data from UAVs into Traffic Information for Simulation Model Calibration. *ITS World Congr. 13th World Congr. Intell. Transp. Syst. Compend. Tech. Pap.* 1–8.
- Liu, H., Wei, H., Zuo, T., Li, Z., Yang, Y.J., 2017. Fine-tuning ADAS algorithm parameters for optimizing traffic safety and mobility in connected vehicle environment. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 76, 132–149. doi:10.1016/j.trc.2017.01.003
- Liu, H., Xin, W., Adam, Z., Ban, J., 2007. A game theoretical approach for modelling merging and yielding behaviour at freeway on-ramp sections. *Transp. Traffic Theory* 1–15.

- Liu, J., Khattak, A.J., 2016. Delivering improved alerts, warnings, and control assistance using basic safety messages transmitted between connected vehicles. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 68, 83–100. doi:10.1016/j.trc.2016.03.009
- Liu, M., Lu, G., Chen, Y., Zhang, X., Li, B., 2017. Modeling of Vehicles Merging Movement at Unsignalized Intersections Considering Drivers Risk Perception, in: *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*.
- Liu, M., Researcher, A., District, H., Chen, Y., District, H., Lu, G., District, H., Wang, Y., 2016. Modeling drivers' crossing behavior at unsignalized intersections based on risk perception and game theory. *Transp. Res. Board 95th Annu. Meet. Compend. Pap.*
- Liu, X., Li, L., Peng, Z., Xu, X., 2013. Multi-Objective Optimization Model and Evolutionary Algorithm to plan UAV cruise route for road traffic surveillance. *Transp. Res. Board 92nd Annu. Meet.*
- Liu, X., Peng, Z., Hou, H., Wang, L., 2015. Simulation and evaluation of using unmanned aerial vehicle to detect low-volume road traffic incident. *Transp. Res. Board 94th Annu. Meet. Compend. Pap.*
- Lo, S., 2012. Equivalent Transformation for Heterogeneous Traffic Cellular Automata. *Proc. World Acad. Sci. Eng. Technol.* 61, 1271–1275.
- Logi, F., Ritchie, S.G., 2002. A multi-agent architecture for cooperative inter-jurisdictional traffic congestion management. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 10, 507–527. doi:10.1016/S0968-090X(02)00033-5
- Lou, Y., Archer, M., Vadlamani, S., 2016. HOT Lanes with Refund Option: Stated-Preference Survey of Phoenix Metropolitan Area, in: *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*.
- Lubis, H.A.S., 2009. Motorcycles Growth and Its Impacts to Urban Transportation. *Proc. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 7, 329–343. doi:10.11175/eastpro.2009.0.329.0
- Mallikarjuna, C., Kuzhiyamkunnath, B.B., 2014. Analysis of the effect of two-wheeler lane-sharing behavior on macroscopic traffic flow modeling. *Transport* 29, 146–153. doi:10.3846/16484142.2014.928788
- Mannering, F.L., Grodsky, L.L., 1995. Statistical analysis of motorcyclists' perceived accident risk. *Accid. Anal. Prev.* 27, 21–31.
- Marczewski, A., 2013. Gamification: a simple introduction. Andrzej Marczewski.
- Matsushashi, N., Hyodo, T., Takahashi, Y., 2005. Image Processing Analysis of Motorcycle Oriented

- Mixed Traffic Flow in Vietnam. *Proc. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 5, 929–944.
- Mccarley, J.J.S., Wickens, C.D.C., 2004. Human factors concerns in UAV flight. *Urbana-Champaign, Inst. Aviat.* 3.1-3.11.
- McCormack, E., Trepanier, T., 2008. The use of small unmanned aircraft by the Washington State Department of Transportation.
- McKelvey, Richard D., McLennan, Andrew M., Turocy, T.L., 2016. *Gambit: Software Tools for Game Theory*.
- McKelvey, R.D., Palfrey, T.R., 1995. Quantal response equilibria for normal form games. *Games Econ. Behav.* doi:10.1007/BF01426213
- McKelvey, R.D., Palfrey, T.R., 1998. Quantal response equilibria for extensive form games. *Exp. Econ.* doi:10.1007/s10683-015-9471-y
- Meng, J., Dai, S., Dong, L., Zhang, J., 2007. Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 380, 470–480. doi:10.1016/j.physa.2007.02.091
- Meng Liu, Chengdong Wu, Yunzhou Zhang, 2008. A review of Traffic Visual Tracking technology, in: 2008 International Conference on Audio, Language and Image Processing. IEEE, pp. 1016–1020. doi:10.1109/ICALIP.2008.4590198
- Miller, G.A., 2003. The cognitive revolution: A historical perspective. *Trends Cogn. Sci.* 7, 141–144. doi:10.1016/S1364-6613(03)00029-9
- Miller, H.J., 2013. Beyond sharing: Cultivating cooperative transportation systems through geographic information science. *J. Transp. Geogr.* 31, 296–308. doi:10.1016/j.jtrangeo.2013.04.007
- Minh, C., Binh, T., Mai, T., Sano, K., 2009. The Delay Estimation under Heterogeneous Traffic Conditions. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 7.
- Minh, C., Sano, K., Matsumoto, S., 2005a. Characteristics of passing and paired riding maneuvers of motorcycle. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 6, 186–197.
- Minh, C., Sano, K., Matsumoto, S., 2005b. The Speed, Flow and Headway analyses of motorcycle traffic. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 6, 1496–1508.
- Minh, C.C., Kazushi, S., Matsumoto, S., 2010. Maneuvers of motorcycles in queues at signalized intersections. *J. Adv. Transp.* 46, 39–53. doi:10.1002/atr

- Minh, C.C.C., Sano, K., 2003. Analysis of Motorcycle effects to saturation flow rate at signalized intersection in developing countries. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 5, 1211–1222.
- Mirchandani, P., Hickman, M., Angel, A., Chandhani, D., Hickman, M., 2002. Application of aerial video for traffic flow monitoring and management. *ASCE 7th Int. Conf. Appl. Adv. Technol. Transp.*
- Møgelmoose, A., Liu, D., Trivedi, M.M.M., 2014. Traffic Sign Detection for US Roads: Remaining Challenges and a case for Tracking. *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*
- Motro, M., Chu, A., Choi, J., Lavieri, P.S., Pinjari, A.R., Bhat, C.R., Ghosh, J., Heath, R.W., 2016. Vehicular ad-hoc network simulations of overtaking maneuvers on two-lane rural highways. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 72, 60–76. doi:10.1016/j.trc.2016.09.006
- Mulvihilla, C., Salmonb, P., Filtnessc, a, Mulvihill, C., Salmon, P., 2013. Lane filtering and situation awareness in motorcyclists: An on-road proof of concept study. *Proc. 2013 Australas. Road Saf. Res. Polic. Educ. Conf.*
- Myerson, R.B., 2013. *Game Theory*. Harvard University Press.
- Nakatsuji, T., Giang Hai, N., Taweessilp, S., Tanaboriboon, Y., 2001. Effects of motorcycles on the capacity of signalized intersections. *J. Infrastruct. Plan. Rev.* 18, 935–942.
- Naranjo, J., Gonzalez, C., 2008. Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 9, 438–450.
- Neufert, E., Neufert, P., Kister, J., 2012. *Architects' data*. John Wiley & Sons.
- Nguyen, L.X., Hanaoka, S., 2013. Safety spaces for overtaking movements in motorcycle traffic flow. *Proc. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 9, 2–12.
- Nguyen, L.X., Hanaoka, S., Kawasaki, T., 2014. Traffic conflict assessment for non-lane-based movements of motorcycles under congested conditions. *IATSS Res.* 37, 137–147. doi:10.1016/j.iatssr.2013.10.002
- Nikias, V., Vlahogianni, E.I., Lee, T.-C., Golias, J.C., 2012. Determinants of powered two-wheelers virtual lane width in urban arterials. *2012 15th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.* 1205–1210.
- Nikolos, I.K., Delis, A.I., Papageorgiou, M., 2015. Macroscopic Modelling and Simulation of ACC and CACC Traffic, in: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. pp. 2129–2134. doi:10.1109/ITSC.2015.357
- Ntousakis, I., Nikolos, I., Papageorgiou, M., 2017. Cooperative Vehicle Merging on Highways: Model

- Predictive Control. Transp. Res. Board 96th Annu. Meet.
- Oketch, T., 2000. New Modeling Approach for Mixed-Traffic Streams with Nonmotorized Vehicles. Transp. Res. Rec. doi:10.3141/1705-10
- Orfanou, F., Vlahogianni, E.I., Karlaftis, M., 2012. Associating Driving Behavior with Hysteretic Phenomena of Freeway Traffic Flow, in: Control in Transportation Systems. pp. 209–214.
- Osborne, M.J., 2000. An introduction to Game Theory.
- Papacharalampous, A.E., Vlahogianni, E.I., 2014. Modeling microscopic freeway traffic using cusp catastrophe theory. Intell. Transp. Syst. Mag. IEEE 6, 6–16.
- Papadimitriou, C.H., Yannakakis, M., 1994. On complexity as bounded rationality (extended abstract), in: Proceedings of the Twenty-Sixth Annual ACM Symposium on Theory of Computing - STOC '94. pp. 726–733. doi:10.1145/195058.195445
- Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., Wang, Y., 2008. Review of Road Traffic Control Strategies. Proc. IEEE 91, 2043–2067.
- Park, D., Rilett, L., 2007. Forecasting Multiple-Period Freeway Link Travel Times Using Modular Neural Networks. <http://dx.doi.org/10.3141/1617-23>.
- PB Farradyne, 2005. Use of Unmanned Aerial Vehicles in Traffic Surveillance and Traffic Management.
- Pinto, M., Cavallo, V., Saint-Pierre, G., 2014. Influence of front light configuration on the visual conspicuity of motorcycles. Accid. Anal. Prev. 62, 230–237. doi:10.1016/j.aap.2013.09.026
- Prasan, U.D., Murugappan, S., 2016. An Analysis on Vehicular Ad-Hoc Networks: Research Issues, Challenges and Applications. Int. J. Appl. Eng. Res. ISSN 11, 973–4562.
- Puri, A., Valavanis, K., Kontitsis, M., 2007. Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. 2007 Mediterr. Conf. Control Autom. 1–6. doi:10.1109/MED.2007.4433658
- Quinlan, J., 1993. C4. 5: programs for machine learning, Machine Learning. Morgan Kaufmann Publishers. doi:10.1016/S0019-9958(62)90649-6
- Quinlan, J.R., 1986. Induction of Decision Trees. Mach. Learn. 1, 81–106.
- Radin Umar, R.S., Mackay, M.G., Hills, B.L., 1995. Preliminary Analysis of Exclusive Motorcycle Lanes along the Federal Highway F02, Shah Alam, Malaysia. IATSS Res. Vol. 19, 93–98.

- Rass, S., Fuchs, S., Kyamakya, K., 2008. A game-theoretic approach to co-operative context-aware driving with partially random behavior. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)* 5279 LNCS, 154–167. doi:10.1007/978-3-540-88793-5-12
- Reinartz, P., Lachaise, M., Schmeer, E., Krauss, T., Runge, H., 2006. Traffic monitoring with serial images from airborne cameras. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 61, 149–158. doi:10.1016/j.isprsjprs.2006.09.009
- Rizzi, M., Strandroth, J., Tingvall, C., 2009. The effectiveness of antilock brake systems on motorcycles in reducing real-life crashes and injuries. *Traffic Inj. Prev.* 10, 479–487. doi:10.1080/15389580903149292
- Ro, K., Oh, J., Dong, L., 2007. Lessons learned: Application of small uav for urban highway traffic monitoring. 45th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib. 1–19. doi:doi:10.2514/6.2007-596
- Rokach, L., Maimon, O., 2014. Data mining with decision trees: theory and applications, Series in Machine Perception and Artificial Intelligence. World Scientific. doi:10.1007/978-1-4939-0539-3
- Rongviriyapanich, T., Suppattrakul, C., 2005. Effects of motorcycles on traffic operations on arterial streets. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 6, 137–146.
- Rose, G., Delbosc, A., 2016. Powered-two-wheelers for city commuting: Insight from Australia's three largest capital cities. *J. Transp. Geogr.* 54, 325–335. doi:10.1016/j.jtrangeo.2016.05.019
- Rosenthal, R.W., 1989. A bounded-rationality approach to the study of noncooperative games. *Int. J. Game Theory* 18, 273–292. doi:10.1007/BF01254292
- Rubinfeld, D.L., Rodgers, G.B., 1992. Evaluating the Injury Risk Associated with All-Terrain Vehicles: An Application of Bayes' Rule. *J. Risk Uncertain.* 5, 145–158.
- Ruggieri, S., 2002. Efficient C4.5 [classification algorithm]. *Knowl. Data Eng. IEEE Trans.* 14, 438–444.
- Salvo, G., Caruso, L., Scordo, A., 2014a. Urban Traffic Analysis through an UAV. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 111, 1083–1091. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.143
- Salvo, G., Caruso, L., Scordo, A., 2013. Gap acceptance analysis in an urban intersection through a video acquired by an UAV 199–205.
- Salvo, G., Caruso, L., Scordo, A., Guido, G., 2014b. Comparison between vehicle speed profiles acquired by differential GPS and UAV. 17th Meet. EURO Work. Gr. Transp. EWGT.
- Savino, G., Giovannini, F., Baldanzini, N., Pierini, M., Rizzi, M., 2013. Assessing the potential benefits of

- the motorcycle autonomous emergency braking using detailed crash reconstructions. *Traffic Inj. Prev.* 14 S., S40-9. doi:10.1080/15389588.2013.803280
- Savino, G., Giovannini, F., Pierini, M., 2014. Autonomous Emergency Braking for Cornering Motorcycle. 24th Int. Tech. Conf. Enhanc. Saf. Veh.
- Savino, G., Pierini, M., Rizzi, M., Frampton, R., 2013. Evaluation of an Autonomous Braking System in Real-World PTW Crashes. *Traffic Inj. Prev.* 14, 532–543. doi:10.1080/15389588.2012.725878
- Sbeiti, M., Goddemeier, N., Behnke, D., Wietfeld, C., 2016. PASER: Secure and Efficient Routing Approach for Airborne Mesh Networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 15, 1950–1964. doi:10.1109/TWC.2015.2497257
- Schapire, R.E., 2013. Explaining adaboost, in: *Empirical Inference: Festschrift in Honor of Vladimir N. Vapnik*. pp. 37–52. doi:10.1007/978-3-642-41136-6_5
- Seiniger, P., Schröter, K., Gail, J., 2012. Perspectives for motorcycle stability control systems. *Accid. Anal. Prev.* 44, 74–81. doi:10.1016/j.aap.2010.11.018
- Sengupta, R., Rezaei, S., Shladover, S.E., Cody, D., Dickey, S., Krishnan, H., 2007. Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation. *J. Intell. Transp. Syst.* 11, 143–155. doi:10.1080/15472450701410452
- Seredynski, M., Bouvry, P., 2011. A survey of vehicular-based cooperative traffic information systems. *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC* 163–168. doi:10.1109/ITSC.2011.6083055
- Shastri, A., Schowengerdt, R., 2002. Airborne Video registration for Visualization and Parameter Estimation of Traffic Flows. *Proc. Pecora*. Vol. 15. 391–405.
- Shladover, S.E., 1995. Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS), *Vehicle System Dynamics*. doi:10.1080/00423119508969108
- Shukla, A.P., Saini, M., 2015. Moving Object Tracking of Vehicle Detection: A Concise Review. *Int. J. Signal Process. Image Process. Pattern Recognit.* 8, 169–176.
- Simon, H., 2000. Bounded rationality in social science: Today and tomorrow. *Mind Soc.*
- Sivaraman, S., Trivedi, M.M., 2013a. Looking at vehicles on the road: A survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 14, 1773–1795. doi:10.1109/TITS.2013.2266661
- Sivaraman, S., Trivedi, M.M., 2013b. Integrated lane and vehicle detection, localization, and tracking: A

synergistic approach. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 14, 906–917.
doi:10.1109/TITS.2013.2246835

Sperley, M., Pietz, A., 2010. Motorcycle Lane-Sharing: Literature Review. No. OR-RD-10-20. 2010.

Srinivasan, S., Latchman, H., Shea, J., 2004. Airborne traffic surveillance systems: video surveillance of highway traffic. *Proc. ACM 2nd Int. Work. Video Surveill. Sens. networks* 131–135.

Sun, R., Hu, J., Xie, X., Zhang, Z., 2014. Variable Speed Limit Design to Relieve Traffic Congestion based on Cooperative Vehicle Infrastructure System. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 138, 427–438.
doi:10.1016/j.sbspro.2014.07.221

Sundharam, S.M., Navet, N., Lassy, F., 2016. Connected Motorized Riders - A Smart Mobility System to Connect Two and Three-wheelers 2–5.

Talebpour, A., Mahmassani, H.S., Hamdar, S.H., 2015. Modeling Lane-Changing Behavior in a Connected Environment: A Game Theory Approach. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 7, 216–232. doi:10.1016/j.trc.2015.07.007

Theofilatos, A., Yannis, G., 2016. Investigation of powered 2-wheeler accident involvement in urban arterials by considering real-time traffic and weather data. *Traffic Inj. Prev.* 0, 1–6.
doi:10.1080/15389588.2016.1198871

Theofilatos, A., Yannis, G., 2015. A review of powered-two-wheeler behaviour and safety. *Int. J. Inj. Contr. Saf. Promot.* 22, 284–307. doi:10.1080/17457300.2014.908224

Todorovski, L., Džeroski, S., 2003. Combining Classifiers with Meta Decision Trees. *Mach. Learn.* 50, 223–249.

Tseng, B., Lin, C., Smith, J., 2002. Real-time video surveillance for traffic monitoring using virtual line analysis. *Multimed. Expo, 2002. ICME'02. Proceedings. 2002 IEEE Int. Conf.* 541–544.

Turocy, T.L., 2009. Computing sequential equilibria using agent quantal response equilibria. *Econ. Theory* 42, 255–269. doi:10.1007/s00199-009-0443-3

van Arem, B., van Driel, C.J.G., Visser, R., 2006. The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 7, 429–436.
doi:10.1109/TITS.2006.884615

Van Hinsbergen, C.P.I., Van Lint, J.W.C., Van Zuylen, H.J., n.d. Bayesian committee of neural networks to predict travel times with confidence intervals. *Transp. Res. Part C* 17, 498–509.

doi:10.1016/j.trc.2009.04.007

Van Katwijk, R., van Koningsbruggen, P., 2002. Coordination of traffic management instruments using agent technology. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 10, 455–471. doi:10.1016/S0968-090X(02)00034-7

Vlahogianni, E.I., 2015. Optimization of traffic forecasting: Intelligent surrogate modeling. doi:10.1016/j.trc.2015.03.016

Vlahogianni, E.I., 2014. Powered-Two-Wheelers kinematic characteristics and interactions during filtering and overtaking in urban arterials. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 24, 133–145. doi:10.1016/j.trf.2014.04.004

Vlahogianni, E.I., 2013. Modeling duration of overtaking in two lane highways. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 20, 135–146. doi:10.1016/j.trf.2013.07.003

Vlahogianni, E.I., Barmounakis, E.N., 2017. Gamification and sustainable mobility: Challenges and opportunities in a changing transportation landscape, in: Hussein, D. (Ed.), *Low Carbon Mobility for Future Cities*. Institution of Engineering and Technology.

Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., 2012. Bayesian modeling of the microscopic traffic characteristics of overtaking in two-lane highways. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 15, 348–357. doi:10.1016/j.trf.2012.02.002

Vlahogianni, E.I., Golias, J.C., Karlaftis, M.G., 2004. Short-term traffic forecasting: Overview of objectives and methods. *Transp. Rev.* 24, 533–557. doi:10.1080/0144164042000195072

Vlahogianni, E.I., Karlaftis, M.G., Golias, J.C., 2014a. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 43, 3–19. doi:10.1016/j.trc.2014.01.005

Vlahogianni, E.I., Yannis, G., Golias, J.C., 2014b. Detecting Powered-Two-Wheeler incidents from high resolution naturalistic data. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 22, 86–95. doi:10.1016/j.trf.2013.11.002

Vlahogianni, E.I., Yannis, G., Golias, J.C., 2013. Critical power two wheeler driving patterns at the emergence of an incident. *Accid. Anal. Prev.* 58, 340–5. doi:10.1016/j.aap.2012.12.026

Vlahogianni, E.I., Yannis, G., Golias, J.C., 2012. Overview of critical risk factors in Power-Two-Wheeler safety. *Accid. Anal. Prev.* 49, 12–22. doi:10.1016/j.aap.2012.04.009

Wang, H., Duan, S., Zheng, Y., Liu, S., Dong, C., Li, Y., 2014. Using Model Aircraft to Collect Vehicle

- Trajectory Data. Transp. Res. Board 93rd Annu. Meet. Compend. Pap.
- Wang, L., Chen, F., Yin, H., 2015. Detecting and tracking vehicles in traffic by unmanned aerial vehicles. Autom. Constr. doi:10.1016/j.autcon.2016.05.008
- Wang, M., Hoogendoorn, S.P., Daamen, W., van Arem, B., Happee, R., 2015. Game theoretic approach for predictive lane-changing and car-following control. Transp. Res. Part C Emerg. Technol. 58, 73–92. doi:10.1016/j.trc.2015.07.009
- Washington, S.P., Karlaftis, M.G., Mannering, F.L., 2010. Statistical and econometric methods for transportation data analysis. CRC press.
- Wilson, T., Best, W., 1982. Driving strategies in overtaking. Accid. Anal. Prev. 14, 179–185. doi:10.1016/0001-4575(82)90026-4
- Wong, K.I., Lee, T.-C., 2015. Investigating the heterogeneity in driving behavior of Powered Two-Wheelers under mixed traffic flow. Transp. Res. Board 94th Annu. Meet. Compend. Pap.
- Xin, Z., Yun-tao, C., Li, L., Jia-ning, G., 2014. Algorithm of Vehicle Speed Detection in Unmanned Aerial Vehicle Videos, in: Transportation Research Board 93rd Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.
- Xue Yang, Jie Liu, Feng Zhao, Vaidya, N.H., 2004. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. First Annu. Int. Conf. Mob. Ubiquitous Syst. Netw. Serv. 2004. MOBIQUITOUS 2004. 114–123. doi:10.1109/MOBIQ.2004.1331717
- Ye, M., Chen, T.D., 2017. Best practises for existing hot lanes and conceptual framework for variably priced fully tolled facilities. Transp. Res. Board 96th Annu. Meet. Compend. Pap.
- Yu Min Chen, L.D., Oh, J., 2007. Real-Time Video Relay for UAV Traffic Surveillance Systems Through Available Communication Networks, in: Wireless Communications and Networking Conference. Ieee, pp. 2608–2612. doi:10.1109/WCNC.2007.485
- Zhang, H., Su, Y., Peng, L., Yao, D., 2010. A review of game theory applications in transportation analysis. Int. Conf. Comput. Inf. Appl. 152–157. doi:10.1109/ICCIA.2010.6141559
- Zhang, J., Wang, F.-Y., Wang, K., Lin, W.-H., Xu, X., Chen, C., 2011. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 12, 1624–1639. doi:10.1109/TITS.2011.2158001
- Zhang, L., Peng, Z., Li, L., 2014. A novel road boundary detection approach for not-well-marked roads in

UAV video, in: Transportation Research Board 93rd Annual Meeting Compendium of Papers.

Zhang, L., Peng, Z., Sun, D.D.J., Liu, X., 2013. A UAV-Based Automatic Traffic Incident Detection System for Low Volume Roads. *Transp. Res. Board 92nd Annu. Meet.* 1–19.

Zhang, Y., Haghani, A., 2015. A gradient boosting method to improve travel time prediction. *Transp. Res. Part C* 58, 308–324. doi:10.1016/j.trc.2015.02.019

Zou, X., Levinson, D., 2006. A Multi Agent Congestion and Pricing Model. *Transportmetrica* 2, 237–249.

A.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων

Η Θεωρία Παιγνίων (Game Theory) εστιάζει στη στρατηγική αλληλεξάρτηση των αποφάσεων ομάδων ανθρώπων, όπου η απόφαση καθενός επηρεάζει τους υπολοίπους. Το κάθε άτομο που λαμβάνει αποφάσεις (Decision Maker) είναι ένας παίκτης (Player) του οποίου οι κινήσεις επηρεάζουν τους υπόλοιπους παίκτες (Interaction). Κάθε παίκτης επιλέγει τις ενέργειές του με βάση τη στρατηγική (Strategic) ερμηνεία των αλληλεπιδράσεων ενώ η ενέργεια που επιλέγει να εκτελέσει κάθε παίκτης είναι η καλύτερη δυνατή, αφού θεωρείται ορθολογικός (Rationality).

Στον τομέα των μεταφορών, η Θεωρία Παιγνίων έχει βρει εφαρμογή περισσότερο σε συνδυασμένες μεταφορές, αστικά δίκτυα και μέσα μαζικής μεταφοράς, με έμφαση στα οικονομικά των μεταφορών (Hollander and Prashker, 2006; Zhang et al., 2010). Η Θεωρία Παιγνίων έχει εφαρμοστεί σε προηγούμενες έρευνες που αφορούν την ανάλυση της κυκλοφορίας και την προτυποποίησή της με σκοπό να εξηγήσει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της οδικής συμπεριφοράς όπως για παράδειγμα τη συγχώνευση στην κυκλοφορία ή ελιγμούς αλλαγής λωρίδας (Kita, 1999; Kita et al., 2002; Liu et al., 2007; Talebpour et al., 2015), τη συμπεριφορά των ποδηλατών στις διασταυρώσεις πεζών (Bjørnskau, 2014), της μείωσης της ασφάλειας λόγω των εγωιστικών δράσεων των οδηγών (Rass et al., 2008), το σχεδιασμό στρατηγικών ελέγχου για αυτοματοποιημένα οχήματα, τα οποία ακολουθούν κανόνες οδικής συμπεριφοράς (M. Wang et al., 2015), τις αποφάσεις των οδηγών που εισέρχονται σε κυκλικούς κόμβους (Banjanovic-mehmedovic et al., 2016), την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής για τη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών (Klein and Ben-Elia, 2016) και την αποφυγή συγκρούσεων (Golestan et al., 2016). Αν και η εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων σε περιπτώσεις που αφορούν την οδική συμπεριφορά σπάνια υποστηρίζεται από πραγματικά δεδομένα, στην πλειοψηφία των παραπάνω ερευνών έχει αναγνωριστεί η χρησιμότητα της λήψης στρατηγικών αποφάσεων και η σημαντικότητά της στην ανάλυση οδικών αλληλεπιδράσεων. Όπως συνοψίζεται στην (Bjørnskau, 2014), «τέτοια πρότυπα έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την οδική ασφάλεια με την καλύτερη κατανόηση στις αλληλεπιδράσεις των χρηστών, αλλά και στη δυνατότητά μας να τις προβλέψουμε».

Σε κάθε παίγνιο το πλήθος των παικτών το συμβολίζουμε με N ενώ έναν τυχαίο παίκτη τον συμβολίζουμε με i . Η τυχαία στρατηγική του παίκτη i συμβολίζεται με s_i ενώ η συνάρτηση απολαβής του παίκτη i συμβολίζεται με u_i . Ένα σύνολο στρατηγικών για όλους τους άλλους παίκτες εκτός του i συμβολίζεται με s_{-i} . Η Θεωρία Παιγνίων περιλαμβάνει μαθηματικά εργαλεία και πρότυπα για να περιγράψει συνθήκες συνεργασίας και σύγκρουσης μεταξύ ορθολογικών

χρηστών και συναντάται συχνά στους τομείς των οικονομικών, πολιτικής, ψυχολογίας και βιολογίας (Myerson, 2013).

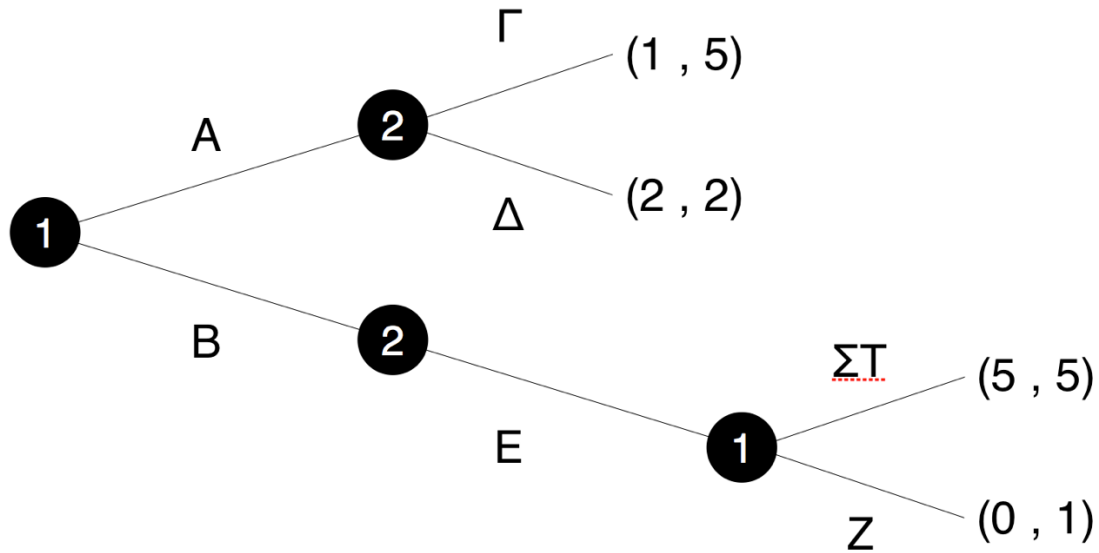
Στην θεωρία παιγνίων χρησιμοποιούνται δύο τρόποι παράστασης των παιγνίων (Osborne, 2000). Η πρώτη και πιο συνηθισμένη μορφή είναι η κανονική ή στρατηγική μορφή. Σε αυτή τη μορφή οι στρατηγικές των παικτών παρουσιάζονται σε μορφή ενός πίνακα. Εκεί εμφανίζονται όλοι οι παίκτες που συμμετέχουν στο παίγνιο και οι διαθέσιμες κινήσεις/στρατηγικές τους. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 19) οι επικεφαλίδες των γραμμών και των στηλών του πίνακα αναπαριστούν τις στρατηγικές των παικτών ενώ στα κελιά των πινάκων υπάρχουν αριθμοί που δηλώνουν την απολαβή κάθε παίκτη για τον εκάστοτε συνδυασμό στρατηγικών.

Πίνακας 19: Παίγνιο Στρατηγικής Μορφής

		Παίκτης 2	
		Γ	Δ
Παίκτης 1	A	5 , 5	0 , 15
	B	15 , 0	1 , 1

Συγκεκριμένα, στα γκρι κελιά φαίνονται οι στρατηγικές των παικτών. Ο παίκτης 1 έχει τις στρατηγικές A και B ενώ ο παίκτης 2 έχει τις Γ και Δ. Τα λευκά κελιά αναπαριστούν τις απολαβές των παικτών, δηλαδή στον συνδυασμό στρατηγικών BΓ ο παίκτης 1 θα πάρει απολαβή 15 ενώ ο παίκτης 2 θα πάρει απολαβή 0.

Η δεύτερη μορφή παιγνίου είναι η εκτατική μορφή ή αναλυτική μορφή ή μορφή δέντρου. Η βασική τους διαφορά είναι ότι στη στρατηγική μορφή το παίγνιο είναι στατικό, δηλαδή κάθε παίκτης καλείται να πάρει απόφαση μονάχα στην αρχή του παιγνίου. Αντίθετα, στην αναλυτική μορφή (Εικόνα 33) ο κάθε παίκτης μπορεί να πάρει απόφαση για το τι στρατηγική θα ακολουθήσει καθώς παίζεται το παίγνιο. Ένα παίγνιο εκτατικής μορφής αποτελείται από ένα ορισμένο σύνολο $i = 1, 2, \dots, I$ παικτών και ένα σύνολο X από κόμβους απόφασης (nodes), που διαμορφώνουν ένα «δέντρο», με τους $Z \subset X$ να ορίζονται ως οι τελικοί κόμβοι. Επιπλέον, αποτελείται από ένα σύνολο λειτουργιών που περιγράφουν ότι για κάθε $x \notin Z$, ο παίκτης $i(x)$ που κινείται στο x , το σύνολο $A(x)$ από πιθανές επιλογές στο x και τον επόμενο κόμβο $n(x, a)$ που είναι αποτέλεσμα της επιλογής a . Τελικά, υπάρχει μια συνάρτησης απολαβής $u_i: Z \rightarrow \mathbb{R}$ που δίνει τις απολαβές στους παίκτες σαν μία συνάρτησης του τελικού κόμβου (Levin, 2002).



Εικόνα 33: Παίγνιο Αναλυτικής Μορφής

Για παράδειγμα στο παίγνιο που αναπαρίσταιται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 33), αρχικά παίρνει απόφαση ο Παίκτης 1 μεταξύ των στρατηγικών Α και Β. Αν επιλέξει την Α τότε είναι σειρά του Παίκτη 2 να επιλέξει μεταξύ των στρατηγικών Γ και Δ. Σε εκείνο το σημείο το παίγνιο λήγει με τον Παίκτη 1 να λαμβάνει απολαβή 1 ή 2 και τον Παίκτη 2 να λαμβάνει απολαβή 5 ή 2 αντίστοιχα. Αντίθετα, αν ο Παίκτης 1 επιλέξει τη στρατηγική Β τότε ο Παίκτης 2 ουσιαστικά δεν έχει δυνατότητα επιλογής, αφού και ο Παίκτης 1 καλείται να ξαναπάρει απόφαση μεταξύ των στρατηγικών ΣΤ και Ζ για να καθορίσει το τελικό αποτέλεσμα και για τους δύο παίκτες.

Κάθε παίγνιο έχει έναν αριθμό λύσεων, αναλόγως την εφαρμογή και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μία από τις πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενη λύση είναι η Ισορροπία Nash (Nash Equilibrium), κατά την οποία κανένας παίκτης δεν κερδίζει καλύτερη απολαβή αν αλλάξει τη στρατηγική του, λαμβάνοντας υπόψη ότι ούτε ο αντίπαλος θα αλλάξει τη δική του στρατηγική (Ρεφανίδης, 2010). Ουσιαστικά, μία στρατηγική s_i^* είναι η καλύτερη απάντηση (best response) σε ένα διάνυσμα στρατηγικών των άλλων παικτών s_{-i}^* , ένα ισχύει για κάθε s_i ότι $u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*)$ και ένας συνδυασμός στρατηγικών $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_N^*)$ αποτελεί μια ισορροπία Nash εάν για κάθε i και για κάθε s_i ισχύει ότι $u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*)$. Παρόλ' αυτά, στην Ισορροπία Nash οι στρατηγικές θεωρούνται επιλογές που λαμβάνονται μία φορά και για πάντα, και ως εκ τούτου σε ένα παίγνιο εκτεταμένης μορφής αγνοείται η διαδοχική δομή λήψης αποφάσεων.

Ο εντοπισμός της κυρίαρχης στρατηγικής για κάθε παίκτη λοιπόν είναι σημαντικός σε ένα παίγνιο (Ρεφανίδης, 2010). Ως κυρίαρχη στρατηγική s_i^* για τον παίκτη i ορίζεται η στρατηγική για την οποία για κάθε $s_i \neq s_i^*$ και για κάθε s_{-i} ισχύει ότι $u_i(s_i^*, s_{-i}) > u_i(s_i, s_{-i})$. Αυτό σημαίνει ότι η κυρίαρχη στρατηγική έχει τη μεγαλύτερη απολαβή σε σχέση με τις εναλλακτικές στρατηγικές του

παίκτη i . Σε μια τέτοια περίπτωση, όλες οι εναλλακτικές στρατηγικές του παίκτη i είναι κυριαρχούμενες.

Επιπλέον, ως ασθενώς κυρίαρχη στρατηγική s_i^* για τον παίκτη i ορίζεται η στρατηγική για την οποία για κάθε $s_i \neq s_i^*$ και για κάθε s_{-i} ισχύει ότι $u_i(s_i^*, s_{-i}) \geq u_i(s_i, s_{-i})$ και για κάθε $s_i \neq s_i^*$, υπάρχει s_{-i}' , έτσι ώστε $u_i(s_i^*, s_{-i}') \geq u_i(s_i, s_{-i}')$, δηλαδή μία στρατηγική s_i^* είναι ασθενώς κυρίαρχη, εάν για κάθε μία από τις εναλλακτικές στρατηγικές του παίκτη i η s_i^* έχει τουλάχιστον ίση απολαβή για όλους τους συνδυασμούς στρατηγικών των υπολοίπων παικτών και καλύτερη απολαβή για τουλάχιστον έναν συνδυασμό.

Αφού εντοπιστούν οι κυρίαρχες και οι ασθενώς κυρίαρχες στρατηγικές, τότε εάν δεν υπάρχει κυρίαρχη στρατηγική, τότε για την εύρεση μιας λύσης του παιγνίου κάποιος μπορεί να ξεκινήσει με την απαλοιφή των κυριαρχούμενων στρατηγικών. Η απαλοιφή κυριαρχούμενων στρατηγικών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων κυριαρχούμενων στρατηγικών, οι οποίες με τη σειρά τους θα απαλειφθούν και αυτές. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επαναλαμβανόμενη απαλοιφή κυριαρχούμενων στρατηγικών (Iterated Elimination of Dominated Strategies - IEDS) (Ρεφανίδης, 2010). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη διαδικασία της απαλοιφής των κυριαρχούμενων στρατηγικών, εφόσον υπάρχουν μονάχα ισχυρά κυρίαρχες στρατηγικές η σειρά με την οποία θα γίνει η απαλοιφή δεν παίζει ρόλο σε αντίθεση με παίγνια όπου υπάρχουν ασθενώς κυρίαρχες στρατηγικές, αφού η σειρά της απαλοιφής μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Τέλος, σημειώνεται ότι με τη μέθοδο της απαλοιφής δεν καταλήγουμε πάντα σε μοναδική λύση για το παίγνιο. Υπάρχουν παίγνια όπου δεν υπάρχει καθόλου κυριαρχούμενες στρατηγικές ενώ υπάρχουν παίγνια όπου στο τέλος της απαλοιφής παραμένουν περισσότερες από μία στρατηγικές που δεν απαλείφονται.

A.2 Δέντρα Αποφάσεων & Μέτα-αλγόριθμοι

A.2.1 Γενική Περιγραφή

Τα Δέντρα Αποφάσεων (ΔΑ ή Decision Trees ή DTs) είναι μία τεχνική μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιεί απλές αναπαραστάσεις για την κατηγοριοποίηση παραδειγμάτων και χρησιμοποιείται συχνά στον τομέα της εξόρυξης δεδομένων (Rokach and Maimon, 2014). Η ονομασία της μεθόδου προκύπτει από τον τρόπο που μπορεί να αναπαρασταθεί το πρότυπο ΔΑ, μέσω της δενδρικής μορφής ενώ ο σκοπός της μεθόδου είναι να προβλέψει την τιμή μιας μεταβλητής με το να εκπαιδευτεί σε απλούς κανόνες αποφάσεων που δημιουργούνται από άλλες μεταβλητές εισόδου. Τα ΔΑ έχουν αρκετά πλεονεκτήματα για τους ερευνητές:

- είναι απλά στην κατανόηση και ερμηνεία τους
- απαιτούν μικρή προετοιμασία δεδομένων
- μπορούν να χειριστούν τόσο συνεχείς όσο και κατηγορικές μεταβλητές
- είναι δυνατή η επαλήθευση ενός προτύπου με τη χρήση στατιστικών μεθόδων

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί όπως για παράδειγμα η απαίτηση για ένα ισορροπημένο δείγμα και ότι υπάρχει πιθανότητα για υπερπροσαρμογή των δεδομένων (overfitting), εάν υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών, ειδικά σε ένα δέντρο με μικρό δείγμα.

Οι βασικές αρχές των ΔΑ μπορούν να βρεθούν στις (Quinlan, 1986) και (Quinlan, 1993), όπου ο Επαναληπτικός Αλγόριθμος Διχοτόμησης (Iterative Dichotomiser 3 ή ID3) και ο διάδοχός του C4.5 περιγράφονται αναλυτικά. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι ο αλγόριθμος ID3 δημιουργεί ένα πολλαπλών διαδρομών δέντρο, που χρησιμοποιεί κόμβους με κατηγορικές μεταβλητές, ενώ ο C4.5 αφαιρεί αυτόν τον περιορισμό κάνοντας χρήση μιας οριακής τιμής. Η οριακή αυτή τιμή χωρίζει τα δεδομένα σε αυτά που είναι πάνω από το όριο και αυτά που είναι κάτω ή ίσα με αυτό. Ως εκ τούτου, τα δέντρα μπορούν να μεταφραστούν σε απλούς κανόνες αν-τότε (if then rules) και η σειρά των κανόνων εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση. Αν και ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών μπορεί να εισαχθεί μέσα στο πρότυπο, οι πιο σημαντικές μεταβλητές εμφανίζονται στους πρώτους κόμβους του δέντρου και δύνανται να εξηγήσουν καλύτερα το πρότυπο ενώ τελικά στο δέντρο παραμένουν μόνο τα «κλαδιά» που βελτιώνουν την απόδοσή του.

Έστω A μία κατηγορική μεταβλητή με h πιθανά αποτελέσματα $A = d_1, \dots, A = d_h$, όπου $d_1, \dots, d_h$ είναι οι γνωστές τιμές της μεταβλητής A , τότε ο έλεγχος για τη συνεχή μεταβλητή έχει δύο πιθανά αποτελέσματα, $A \leq t$ και $A > t$, όπου t είναι μία οριακή τιμή (threshold) (Ruggieri, 2002). Κάνοντας χρήση της στρατηγικής του διαίρει και βασίλευε, ο αλγόριθμος επιλέγει όλες τις μεταβλητές που θα δοκιμαστούν στους κόμβους αποφάσεων. Αν ένα σετ από περιπτώσεις T ανήκει ολοκληρωτικά σε μία συγκεκριμένη κλάση C_j , τότε ο κόμβος απόφασης που δημιουργείται από αυτήν τη μεταβλητή ονομάζεται φύλλο (leaf). Όμως, αν υπάρχουν περιπτώσεις που ανήκουν σε δύο ή περισσότερες κλάσεις, τότε υπολογίζεται το κέρδος της πληροφορίας (information gain) από κάθε μεταβλητή. Το κέρδος της πληροφορίας υπολογίζεται όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (Ruggieri, 2002):

$$gain = info(T) - \sum_{i=1}^s \frac{|T_i|}{T} \times info(T_i) \quad (1)$$

όπου η μεταβλητή a είναι κατηγορική και $T_1, \dots, T_s$ είναι τα υποσύνολα του T και $info(T)$ είναι η συνάρτηση εντροπίας που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$info(T) = - \sum_{j=1}^{N_{Class}} \frac{freq(C_j, T)}{|T|} \times \log_2 \left(\frac{freq(C_j, T)}{|T|} \right) \quad (2)$$

A.2.2 «Κλάδεμα» και Ενίσχυση

Η διαδικασία της εκπαίδευσης του αλγορίθμου μπορεί να οδηγήσει συχνά σε μη βελτιστοποιημένες δομές δέντρων σε σχέση με την ακρίβεια του προτύπου και την πολυπλοκότητά του, θέματα που συνήθως σχετίζονται με την υπερπροσαρμογή. Μία προσέγγιση για την αντιμετώπιση τού προβλήματος ονομάζεται κλάδεμα (pruning). Το κλάδεμα είναι μία τεχνική που σκοπό έχει να μειώσει την πολυπλοκότητα ενός προτύπου (μείωση αχρείαστης πληροφορίας) με το να μειώσει τα κλαδιά (branches) που συμβάλουν λιγότερο στην ακρίβεια τού προτύπου, ενώ όλα τα «κομμένα κλαδιά» αναπαρίστανται με φύλλα (Rokach and Maimon, 2014). Το κλάδεμα μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια ενός δέντρου με το να αντιμετωπίσει τις ακραίες τιμές και τα θέματα υπερπροσαρμογής. Ο διπλός ρόλος λοιπόν του κλαδέματος είναι αρχικά να μειώσει την πολυπλοκότητα του προτύπου και κατά δεύτερον να βελτιώσει την απόδοσή του. Οι δύο τύποι κλαδέματος είναι α) μετά το δέντρο (post pruning), που πραγματοποιείται μετά τη δημιουργία του δέντρου και β) απευθείας κλάδεμα (online pruning) που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του δέντρου. Μία ακόμη πιο λεπτομερής περιγραφή των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων δέντρων μπορεί να βρεθεί στην (Esposito et al., 1997).

Ο αλγόριθμος C4.5 εφαρμόζει τη μέθοδο Κλαδέματος Βασισμένο σε Σφάλμα (Error-Based Pruning ή EBP), η οποία εκτελείται από ένα φύλλο προς το κέντρο του δέντρου βάσει της λανθασμένης ταξινόμησης. Συγκεκριμένα, για κάθε φύλλο t ενός δέντρου απόφασης T , είναι δυνατό να οριστεί ένα διάστημα εμπιστοσύνης $[L_{CF}(t), U_{CF}(t)]$ για τη (μεταγενέστερη) πιθανότητα της λανθασμένης ταξινόμησης ενός φύλλου t όπου όλα τα παραδείγματα περιλαμβάνουν φύλλα (Esposito et al., 1997). Η $U_{CF}(t)$ ορίζει το χειρότερο σενάριο, τέτοιο ώστε $P(e(t)/n(t) \leq U_{CF}) = CF$, όπου CF είναι το διάστημα εμπιστοσύνης, με την υπόθεση ότι τα σφάλματα στο σετ εκπαίδευσης είναι διωνυμικά διανεμημένα με πιθανότητα p σε $n(t)$ δοκιμές. Έχοντας το πάνω όριο και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι υπολογισμοί του σφάλματος για όλα τα φύλλα σε ένα κλαδί T_i του δέντρου είναι ισοδύναμοι με τον υπολογισμό του σφάλματος ολόκληρου του ίδιου του κλαδιού, με τη σύγκριση του σφάλματος μεταξύ φύλλων, κλαδιών και

μεγαλύτερων κλαδιών ενός δέντρου, είναι δυνατό να αποφασίσει κανείς αν ένα συγκεκριμένο κλαδί θα πρέπει να κλαδευτεί ή να διατηρηθεί σε ένα δέντρο.

Αλλά ακόμη και αν εφαρμοστεί το κλάδεμα, τις περισσότερες φορές δεν υπάρχει ένδειξη ότι ένα μοναδικό πρότυπο μπορεί να αντιμετωπίσει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, μέτα-αλγόριθμοι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν που μπορούν να ενισχύσουν συνδυασμένες δομές προτύπων για να επιτύχουν καλύτερη απόδοση (Todorovski and Džeroski, 2003). Οι πιο γνωστές προσεγγίσεις σε προβλήματα μεταφορών είναι τα συνδυαστικά πρότυπα (committees of models), οι πολυμορφικές δομές (modular structures) και η παρένθετη προτυποποίηση (surrogate modeling) (Park and Rilett, 2007; Van Hinsbergen et al., n.d.; Vlahogianni, 2015). Μία προσέγγιση που έχει αρχίσει να αποκτά ενδιαφέρον στο πεδίο των δέντρων αποφάσεων είναι η ενίσχυση (boosting). Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι πολλά δέντρα αποφάσεων μειωμένης ακρίβειας, εφόσον συνδυαστούν, μπορούν να ενισχύσουν την απόδοσή τους και να παράξουν πολύ πιο ακριβείς προβλέψεις (Zhang and Haghani, 2015). Οι αλγόριθμοι ενίσχυσης είναι πολύ δημοφιλείς και μπορεί να τους συναντήσει κανείς σε διάφορες μορφές. Η «Προσαρμοστική Ενίσχυση» (Adaptive Boosting ή AdaBoost) είναι βασισμένη στην ιδέα ότι, αν είναι δύσκολο να βρει κανείς ένα μοναδικό, ακριβή κανόνα πρόβλεψης, η απόδοσή του μπορεί να ενισχυθεί με την μετατροπή ενός αδύναμου «εκπαιδευτή» σε έναν πιο δυνατό (Freund and Schapire, 1996; Schapire, 2013). Συγκεκριμένα, με το να συγκεντρώνεται σε πιο «προβληματικά» δεδομένα, δηλαδή αυτά που έχουν ταξινομηθεί λάθος περισσότερες φορές από τον προηγούμενο αδύναμο ταξινομητή, αυξάνει τα βάρη των λανθασμένα ταξινομημένων περιπτώσεων και μειώνει εκείνα των σωστά ταξινομημένων κατά την διάρκεια των επαναλήψεων εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος Adaboost έχει ως σκοπό να εκπαιδεύσει ένα σετ από αδύναμους ταξινομητές. Ο τελικός ταξινομητής που προκύπτει είναι της μορφής:

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{t=1}^T a_t h_t(\mathbf{x}) \quad (3)$$

όπου $a_t = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_t} \right)$ είναι το βάρος του κάθε αδύναμου ταξινομητή h_t από m

παραδείγματα εκπαίδευσης $(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1), \dots, (\mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m)$, με $\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}$ και $\mathbf{y}_i \in \{-1, 1\}$, και όπου

$\varepsilon_t = \Pr_{i \sim D_t} [h_t(\mathbf{x}_i) \neq \mathbf{y}_i]$ είναι το σταθμισμένο σφάλμα με $D_t = \frac{1}{m}$ την κατανομή για $i = 1, \dots, m$.

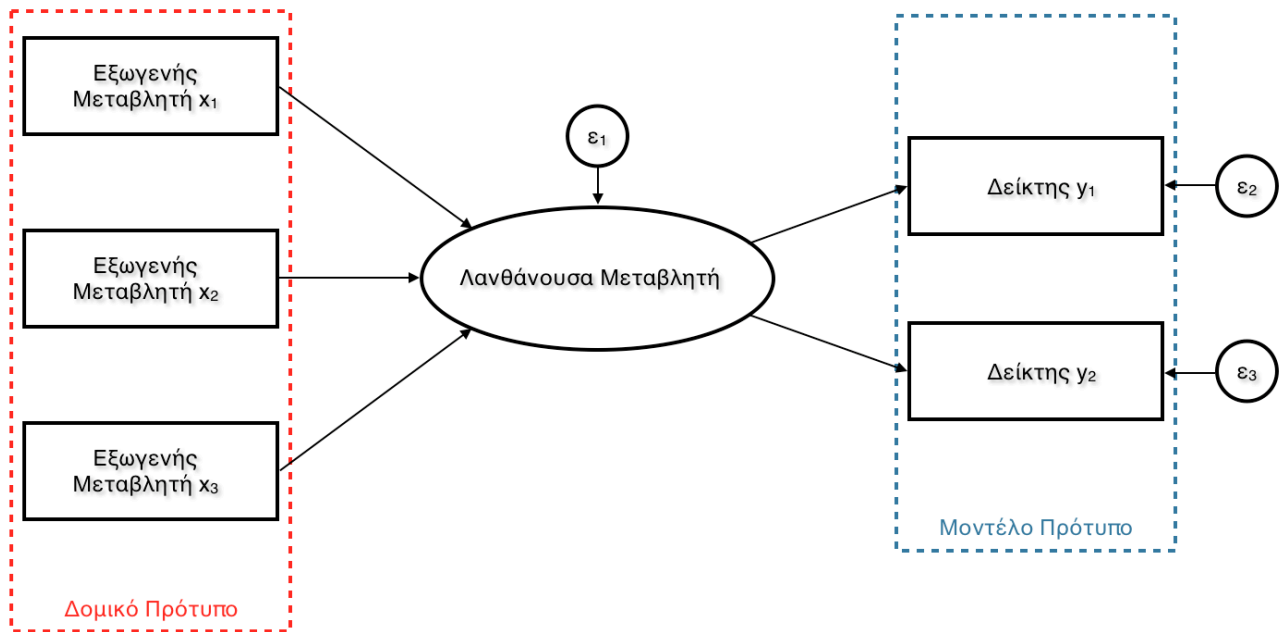
Ο σκοπός λοιπόν είναι να βρεθεί ένας αδύναμος ταξινομητής h_t με χαμηλό σταθμισμένο σφάλμα ε_t σχετική με το D_t .

A.3 Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων

Τα Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων (Structural Equation Models - SEM) είναι μια στατιστική τεχνική, για τον έλεγχο και την εκτίμηση των σχέσεων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ μεταβλητών, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό των στατιστικών στοιχείων και ποιοτικών αιτιακών σεναρίων. Τα πρότυπα δομικών εξισώσεων είναι ένας γενικός όρος, που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα πλήθος στατιστικών προτύπων, που στοχεύουν στην αξιολόγηση της εγγύτητας θεωριών με εμπειρικά δεδομένα (Washington et al., 2010). Βασικό πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα υπολογισμού σχέσεων μεταξύ μεταβλητών οι οποίες δεν μπορούν να μετρηθούν ή να υπολογιστούν με συμβατικούς τρόπους μέτρησης ή παρατήρησης, ή αλλιώς να υπολογίσουν σχέσεις μεταξύ μη παρατηρήσιμων ή λανθανουσών (latent variable) όπως αποκαλούνται. Τα πρότυπα SEM έχουν χρησιμοποιηθεί και σε άλλες έρευνες στον τομέα των μεταφορών (Bampounakis et al., 2016b; Chung et al., 2012; Hassan and Abdel-Aty, 2011; Karlaftis et al., 2001; Katachanaki et al., 2015).

Τα SEM εκτιμούν και αξιοποιούν τις σχέσεις μεταξύ λανθανουσών και παρατηρηθέντων μεταβλητών. Τα δύο είδη μεταβλητών χωρίζονται σε ενδογενείς και εξωγενείς, αναλόγως των αλληλεπιδράσεών τους. Οι σχέσεις μεταξύ εξωγενών και ενδογενών μεταβλητών, εξετάζονται μέσω γραμμικών εξισώσεων και επιπλέον υπάρχει και η δυνατότητα της γραφικής αναπαράστασης του εκτιμώμενου προτύπου για καλύτερη κατανόηση και επεξεργασία.

Ένα διάγραμμα στα πρότυπα δομικών εξισώσεων, αποτελείται από ορθογώνια παραλληλόγραμμα και από κύκλους ή ελλείψεις που συνδέονται μεταξύ τους με απλής ή διπλής κατεύθυνσης βέλη. Τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα, αντιπροσωπεύουν τις παρατηρηθείσες ή μετρήσιμες μεταβλητές και οι ελλείψεις τις λανθάνουσες. Πιο συγκεκριμένα, τα απλής κατεύθυνσης βέλη χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις αιτιώδεις σχέσεις στο πρότυπο, όπου η μεταβλητή στην ουρά του βέλους προκαλεί τη μεταβλητή στο σημείο. Τα διπλής κατεύθυνσης βέλη, χρησιμοποιούνται για να δείξουν τις συνδιακυμάνσεις ή τους συσχετισμούς μεταξύ των παραγόντων χωρίς καμία αιτιώδη ερμηνεία. Στατιστικά τα απλά βέλη αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές παλινδρόμησης ή τις φορτώσεις των παραγόντων, ενώ τα διπλής κατεύθυνσης βέλη δείχνουν τις συνδιακυμάνσεις μεταξύ των παραγόντων. Συνδεδεμένος με κάθε μια παρατηρήσιμη μεταβλητή, είναι ένας όρος λάθους, ο οποίος αντιπροσωπεύει το λάθος μέτρησης και απεικονίζει την επάρκεια του προτύπου στη μέτρηση του σχετικού παράγοντα. Επιπλέον, συνδεδεμένος με κάθε κρυφή μεταβλητή είναι ένας όρος υπολοίπου (residual), ο οποίος αντιπροσωπεύει το λάθος στην πρόβλεψη των ενδογενών παραγόντων από τους εξωγενείς παράγοντες. Δεδομένου ότι και οι όροι λάθους και υπολοίπων, αντιπροσωπεύουν μεταβλητές που δεν ορίζονται στο πρότυπο, έχουν τη μορφή του κύκλου ή της έλλειψης.



Εικόνα 34: Γραφική αναπαράσταση ενός προτύπου δομικών εξισώσεων.

Το δομικό πρότυπο εξισώσεων, καθορίζει τις αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των κρυφών παραγόντων καθώς και την προσαρμοστικότητα των προτύπων με τα δεδομένα. Με τον όρο αιτιώδη σχέση ορίζεται η υπόθεση ότι, θεωρώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που καθορίζουν το πρότυπο, μια αλλαγή στη μεταβλητή που βρίσκεται στην ουρά του βέλους, τι είδους μεταβολή θα προκαλέσει στη μεταβλητή που βρίσκεται στο κεφάλι του βέλους και αν αυτή η μεταβολή είναι στατιστικά σημαντική. Επομένως, σε ένα δομικό πρότυπο, κάθε εξίσωση αντιπροσωπεύει μια αιτιώδη συνάφεια παρά μια εμπειρική ένωση.

Το πρότυπο MIMIC (Multiple Indicators – Multiple Causes) είναι μια περίπτωση προτυποποίησης κάνοντας χρήση δομικών προτύπων εξισώσεων (SEM) γνωστό επίσης και ως προτυποποίηση με λανθάνουσες μεταβλητές και αποτελεί μια διεξοδική τεχνική για τον έλεγχο των υποθέσεων, όσον αφορά τις σχέσεις μεταξύ των παρατηρούμενων και των μη παρατηρούμενων (λανθανουσών) μεταβλητών (Washington et al., 2010). Το πρότυπο αποτελείται από δύο συστατικά μέρη: ένα πρότυπο μέτρησης (Measurement Model) που καθορίζει τις σχέσεις μεταξύ μιας λανθάνουσας μεταβλητής και τους δείκτες της και ένα δομικό πρότυπο (Structural Model) το οποίο διευκρινίζει τις περιστασιακές σχέσεις μεταξύ λανθανουσών μεταβλητών και επεξηγεί τις περιστασιακές επιδράσεις.

Ένα πρότυπο MIMIC θεωρεί τη λανθάνουσα μεταβλητή η ως μονοδιάστατο μέγεθος και συσχετίζει τον φορέα των δεικτών y και τις παρατηρούμενες εξωγενείς μεταβλητές x που την προκαλούν με το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\eta = \Gamma x + \varepsilon$$

$$y = \Lambda \eta + \zeta$$

Όπου Γ και Λ πίνακες αγνώστων παραμέτρων που υπολογίζονται και ε και ζ είναι όροι σφάλματος.

Τα Πρότυπα Δομικών Εξισώσεων (Structural Equation Models - SEM) συνήθως χρησιμοποιούνται σαν μια επικυρωτική διαδικασία διαφόρων θεωρητικών υποθέσεων, επειδή δεν υπολογίζουν μόνο τις εκτιμήσεις για τους παράγοντες του, αλλά εξετάζουν επίσης και το βαθμό προσαρμογής τους με τα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορα κριτήρια καταλληλότητας και στατιστικούς δείκτες καλής προσαρμογής. Οι δείκτες αυτοί παρέχουν την πιο θεμελιώδη ένδειξη του πόσο καλά η προτεινόμενη θεωρία ταιριάζει με τα δεδομένα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι δείκτες χ^2 -Chi-Square, RMSEA, SRMR, AIC, BIC, CI, pclose, CFI, TLI και CD (Washington et al., 2010).