



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

**Μοντελοποίηση και Προσομοίωση της Αλληλεπίδρασης
Μεταξύ Συμβατικών και Αυτόνομων Οχημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων : Δημήτριος Ναθαναήλ
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Περίληψη

Τα οδικά δυστυχήματα είναι μία από τις κυριότερες αιτίες θανάτου στον κόσμο. Η αυτοματοποίηση των μέσων μεταφοράς στοχεύει στην αύξηση της ασφάλειας αλλά και της αποδοτικότητάς των μεταφορών. Προς αυτή την κατεύθυνση, η ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων είναι μια αναπόφευκτη πραγματικότητα. Η ανέλιξη υπολογιστικών εργαλείων όπως της τεχνητής νοημοσύνης επιταχύνει την ανάπτυξη ευφύων συστημάτων καθιστώντας τα αυτόνομα οχήματα ένα εύφορο έδαφος για την αυτοκινητοβιομηχανία και την επιστημονική κοινότητα.

Εκτιμάται η πλήρη αυτοματοποίηση των μεταφορών χωρίς την ανάγκη επίβλεψης και επέμβασης του ανθρώπου σε λιγότερο από 50 χρόνια. Εντούτοις, η περίοδος ταυτόχρονης συνύπαρξης συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων – μία περίοδος που υπολογίζεται να διαρκέσει πάνω από 20 χρόνια – εγείρει προβληματισμούς σχετικά με την αρμονία και την ασφαλή συνεργασία που μπορεί να υλοποιηθεί μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων, ανθρώπου – μηχανής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των οδηγών σε μια διασταύρωση. Αναλύονται τα ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα που εξάγονται από τη μελέτη αλληλεπίδρασης με χρήση γυαλιών eye tracking σε συνδυασμό με σχολιασμό των συμμετεχόντων. Μοντελοποιείται η συμπεριφορά των οδηγών σε μια διασταύρωση βασισμένη στους κανόνες – μαθηματικούς και κοινωνικούς – που εξήχθησαν από τη μελέτη. Για τη μοντελοποίηση έγινε χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας θεωρίας παιγνίων με την οποία διαχειριζόμαστε προβλήματα λήψης αποφάσεων εξετάζοντας την ωφέλεια και το κόστος αυτών, όπως συμβαίνει στην αλληλεπίδραση οχημάτων. Στη συνέχεια, διενεργείται προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των οδηγών μέσω της σύνδεσης του περιβάλλοντος VISSIM και Matlab, υλοποιώντας υπολογιστικά το μοντέλο συμπεριφοράς των οδηγών. Και τέλος, εξάγονται αποτελέσματα που καθορίζουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια του μοντέλου του προβλήματος.

Λέξεις Κλειδιά: << Αυτόνομα οχήματα, αλληλεπίδραση οδηγών, διασταύρωση, eye tracking, μοντελοποίηση, προσομοίωση, συνάρτηση χρησιμότητας, VISSIM, Matlab >>

Abstract

Road accidents are one of the main causes of death in the world. The automation of transport means is increasing the safety and the efficiency of transport. To that end, the development of autonomous vehicles is an inevitable reality. The advancement of computational tools such as artificial intelligence accelerates the development of intelligent systems, making autonomous vehicles a fertile ground for the automotive industry and the scientific community.

The full automation of transport without the need for human supervision and intervention is estimated in less than 50 years. However, the period of simultaneous coexistence of conventional and autonomous vehicles – a period estimated to last more than 20 years – raises concerns about the harmony and safe co-operation that can be implemented between the two involved man-machine.

This diploma thesis examines the interaction between drivers at a junction. The quantitative and qualitative results derived from the interaction study using eye tracking eyewear coupled with participants' commentary are being analyzed. The behavior of drivers at a junction is being modeled on mathematical and social-based rules that were extracted from the study. For modeling, the gaming theory utility has been used to manage decision-making problems considering their utility and cost, as is the case with vehicle interaction. Subsequently, a simulation of the interaction of the drivers is carried out by pairing the VISSIM and Matlab environments, materializing the behavioral model of the drivers. Finally, results are derived that determine the reliability and accuracy of the model of the problem.

Keywords: << Autonomous vehicles, driver interaction, intersection, eye tracking, modeling, simulation, utility function, VISSIM, Matlab >>

Ευχαριστίες

Η παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017 – 2018 στα πλαίσια του Κατασκευαστικού τομέα της Σχολής Μηχανολόγου Μηχανικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η ολοκλήρωσή της είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας και της συμπόρευσής μου με, διάφορους ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησής της και για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκαρδίως αυτά τα άτομα. Αρχικά, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Δημήτριο Ναθαναήλ, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την έμπνευση και το ερέθισμα να ασχοληθώ με τον τομέα των αυτόνομων οχημάτων υπό την σκοπιά της γνωστικής εργονομίας την οποία και βρίσκω άκρως ενδιαφέρουσα αφού ερευνά την απρόβλεπτη, μυστηριώδη και διανοητική φύση του ανθρώπινου εγκεφάλου. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε και για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική εργασία με ένα τόσο υποσχόμενο θέμα, καθώς και την υπομονή του και τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε καθοδηγώντας με σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Επιστημονικό Συνεργάτη στον Τομέα Γνωστικής Εργονομίας κ. Κωνσταντίνο Γκίκα που με τη συμπληρωματική βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε συνέβαλε στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω και στους καθηγητές Νικόλαο Μαρμαρά και Σταύρο Πόνη που δέχθηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους φίλους μου και ιδιαίτερα στην οικογένεια μου, οι οποίοι δε σταμάτησαν να πιστεύουν σε μένα, για την αμέριστη στήριξη, υπομονή και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και την υλική και ηθική στήριξη των επιλογών μου.

Αλέξανδρος Νικολάου
Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Η φύση ως πηγή έμπνευσης στην εξέλιξη των αυτόνομων συστημάτων	1
1.2	Η Εποχή της Πληροφορίας	4
2	Αυτόνομα οχήματα	9
2.1	Τα επίπεδα αυτονομίας ενός οχήματος.....	10
2.2	Λειτουργία αυτόνομου οχήματος.....	13
2.3	Αισθητήρες και επενεργητές αυτόνομου οχήματος.....	13
2.3.1	<i>Πλοήγηση και καθοδήγηση.....</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Οδήγηση και Ασφάλεια.....</i>	<i>15</i>
2.3.3	<i>Διαδίκτυο – Cloud.....</i>	<i>19</i>
2.3.4	<i>Εκτέλεση ενεργειών.....</i>	<i>22</i>
2.4	Τεχνητή νοημοσύνη στα αυτόνομα συστήματα.....	23
3	Ευφυή συστήματα μεταφορών (ITS).....	27
3.1	Κινητό Ad hoc Δίκτυο (MANET)	28
3.2	Ad hoc Δίκτυο Οχημάτων (VANET).....	29
3.2.1	<i>Χρήσεις των VANET</i>	<i>29</i>
3.2.2	<i>Πλεονεκτήματα των δικτύων VANET.....</i>	<i>30</i>
3.2.3	<i>Χαρακτηριστικά των δικτύων VANET.....</i>	<i>31</i>
3.2.4	<i>Προκλήσεις για τα δίκτυα VANET.....</i>	<i>32</i>
3.2.5	<i>Πρωτόκολλα δρομολόγησης στα VANET.....</i>	<i>33</i>
3.2.6	<i>Ασφάλεια στα VANET</i>	<i>34</i>
3.2.7	<i>Πρότυπα των δικτύων VANET</i>	<i>34</i>
4	Τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων	40
4.1	Προηγούμενες αντίστοιχες έρευνες	40
5	Διαδικασία διεξαγωγής της μελέτης eye tracking και αλληλεπίδρασης των οδηγών	43

5.1	Μεθοδολογία.....	43
6	Αποτελέσματα της μελέτης παρατήρησης αλληλεπίδρασης των οδηγών	48
6.1	Ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης αλληλεπιδράσεων των οδηγών	48
6.2	Ακολουθία των ενεργειών κατά την αλληλεπίδραση των οδηγών	52
6.3	Ποιοτική ανάλυση της μελέτης των αλληλεπιδράσεων των οδηγών.....	54
6.3.1	Παρατηρήσεις για οδήγηση σε ευθύ δρόμο	56
6.3.2	Γενικές παρατηρήσεις για στροφές από/σε κύριο δρόμο σε/από πάροδο.....	56
6.3.3	Παρατηρήσεις μεμονωμένων περιπτώσεων.....	59
7	Σχεδιασμός του μοντέλου προσομοίωσης αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος – οδηγού	61
7.1	Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μακροσκοπικής κλίμακας	62
7.2	Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μέσης κλίμακας.....	62
7.3	Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μικροσκοπικής κλίμακας	63
7.3.1	Μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων.....	63
7.3.2	Μοντέλο αλλαγής λωρίδας.....	64
7.4	Δημιουργία του σεναρίου προσομοίωσης κυκλοφορίας μικροσκοπικής κλίμακας με το μοντέλο VISSIM	65
7.4.1	Δημιουργία του αρχικού μοντέλου προσομοίωσης.....	65
8	Σχεδιασμός αλγόριθμου για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος – άλλων οδηγών	72
8.1	Χρήση της θεωρίας παιγνίων στη λήψη αποφάσεων αυτόνομων συστημάτων.....	73
8.2	Η λειτουργία της συνάρτησης χρησιμότητας.....	75
8.2.1	Η θεωρία της χρησιμότητας βασισμένη σε fuzzy λογική	76
8.2.2	Σχεδιασμός της συνάρτησης χρησιμότητας του προβλήματος μοντελοποίησης.....	77
8.2.3	Σχέση που συνδέει τη συνάρτηση χρησιμότητας με την πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό	83
8.3	Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος – άλλων οδηγών	84
8.3.1	Αναγνώριση οχημάτων προσομοίωσης.....	84

8.3.2	Υποπρόγραμμα δεξιάς στροφής	85
8.3.3	Υποπρόγραμμα αριστερής στροφής.....	88
9	Εκτέλεση και αποτελέσματα της προσομοίωσης της μοντελοποίησης αλληλεπίδρασης οδηγού – αυτόνομου οχήματος.....	93
9.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης δεξιάς στροφής από πάροδο σε κύριο δρόμο	95
9.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης αριστερής στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο ...	102
10	Επίλογος	109
10.1	Συμπεράσματα.....	109
10.2	Ανακεφαλαίωση	110
10.3	Συμβολή και αναγκαιότητα.....	112
10.4	Προοπτική και μελλοντικές επεκτάσεις	113
11	Παράρτημα	116
11.1	Συνομογραφίες.....	116
12	Βιβλιογραφία	118

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 : Σμήνος μυρμηγκιών	3
Εικόνα 2 : Σμήνος αυτόνομων οχημάτων	4
Εικόνα 3 : Επίπεδα αυτονομίας των οχημάτων	12
Εικόνα 4 : Εφαρμογές των αισθητήρων των αυτόνομων οχημάτων	19
Εικόνα 5 : Ροή δεδομένων στα αυτόνομα οχήματα	25
Εικόνα 6 : Ακρίβεια νευρωνικών δικτύων στο παρόν	26
Εικόνα 7 : Τα δύο είδη MANET	28
Εικόνα 8 : Δίκτυο VANET	29
Εικόνα 9 : Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει τοποθεσίας για επικοινωνία στα ευφυή συστήματα μεταφορών	33
Εικόνα 10 : Σενάρια στροφών στα οποία εξετάστηκε η αλληλεπίδραση των οδηγών	44
Εικόνα 11 : Παραδείγματα βίντεο παρακολούθησης βλέμματος σε αριστερή στροφή από κύριο δρόμο προς πάροδο (αριστερά) και δεξιά στροφή από πάροδο σε κύριο δρόμο (δεξιά)	45
Εικόνα 12 : Κωδικοποίηση των οδηγών / οχημάτων που εμπλέκονται σε μία δεξιά στροφή (αριστερή εικόνα) και μία αριστερή στροφή (αριστερή εικόνα)	55
Εικόνα 13 : Μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων	64
Εικόνα 14 : Χάρτης της τοποθεσίας μελέτης αλληλεπίδρασης των οδηγών που χρησιμοποιήθηκε στον προσομοιωτή VISSIM	66
Εικόνα 15 : Δίκτυο προσομοίωσης και περιβάλλον χρήσης μοντέλου VISSIM	67
Εικόνα 16 : Σημεία εκκίνησης (μαύρο) και μελέτης αλληλεπίδρασης (κόκκινο) των οδηγών	69
Εικόνα 17 : Το πρόβλημα του τρόλεϊ	75
Εικόνα 18 : Σημεία Flag για τα σενάρια δεξιάς και αριστερής στροφής	79
Εικόνα 19 : Στιγμιότυπα από την προσομοίωση αριστερής και δεξιάς στροφής αντίστοιχα	94

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Μεταβλητή yieldCost συναρτήσει του x για την περίπτωση που το όχημα A παραμένει σταθερό.....	81
Διάγραμμα 2 : Μεταβλητή yieldCost συναρτήσει του x για την περίπτωση που το όχημα B παραμένει σταθερό.....	82
Διάγραμμα 3 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον A οδηγό μετά από N B οχήματα .	96
Διάγραμμα 4 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον B οδηγό μετά από N A οχήματα .	97
Διάγραμμα 5 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων A και B, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον A οδηγό	98
Διάγραμμα 6 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον A οδηγό	99
Διάγραμμα 7 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων A και B, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον A οδηγό	100
Διάγραμμα 8 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον A οδηγό.....	101
Διάγραμμα 9 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον D οδηγό μετά από N E οχήματα	104
Διάγραμμα 10 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον E οδηγό μετά από N D οχήματα	104
Διάγραμμα 11 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό	105
Διάγραμμα 12 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό	106
Διάγραμμα 13 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό	107
Διάγραμμα 14 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό.....	108

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Συχνότητα ατυχήματος ανά όχημα ανά έτος μέχρι το 2040	8
Σχήμα 2 : Σύγκριση χαρακτηριστικών των αισθητήρων αυτόνομου οχήματος [12]	18
Σχήμα 3 : Λειτουργική απεικόνιση των αισθητήρων και επενεργητών ενός αυτόνομου οχήματος.....	23
Σχήμα 4 : Ακολουθία ενεργειών στις αλληλεπιδράσεις των οδηγών κατά τις αριστερές διασταυρώσεις.....	52
Σχήμα 5 : Ακολουθία ενεργειών στις αλληλεπιδράσεις των οδηγών κατά τις δεξιές στροφές	54
Σχήμα 6 : Λογικό διάγραμμα – αναγνώριση οχημάτων προσομοίωσης	85
Σχήμα 7 : Υποπρόγραμμα δεξιάς στροφής.....	86
Σχήμα 8 : Υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οχημάτων A και B	87
Σχήμα 9 : Υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού οδηγών A και B.....	88
Σχήμα 10 : Υποπρόγραμμα αριστερής στροφής	89
Σχήμα 11 : Υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών D και E	90
Σχήμα 12 : Υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού οδηγών D και E.....	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά μελέτης αλληλεπίδρασης οδηγών	45
Πίνακας 2 : Αλληλεπιδράσεις και αντιδράσεις μεταξύ των οδηγών ανά περίπτωση.....	49
Πίνακας 3 : Σήματα από τον συμμετέχοντα	50
Πίνακας 4 : Σήματα από τους άλλους οδηγούς.....	51
Πίνακας 5 : Τύποι οχημάτων και οδηγών τους προσομοίωσης αλληλεπίδρασης τους.....	69
Πίνακας 6 : Σημεία εκκίνησης οχημάτων προσομοίωσης αλληλεπίδρασης οδηγών	69
Πίνακας 7 : Παράμετροι προσομοίωσης.....	70
Πίνακας 8 : Αντιστοιχία συνάρτησης χρησιμότητας – πιθανότητας απόδοσης προτεραιότητας στον οδηγό Α.....	84
Πίνακας 9 : Αποτελέσματα προσομοίωσης δεξιάς στροφής.....	95
Πίνακας 10 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό	98
Πίνακας 11 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό	99
Πίνακας 12 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό.....	100
Πίνακας 13 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό.....	101
Πίνακας 14 : Αποτελέσματα προσομοίωσης αριστερής στροφής.....	103
Πίνακας 15 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό	105
Πίνακας 16 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό	106
Πίνακας 17 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό.....	107
Πίνακας 18 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό.....	108
Πίνακας 19 : Σύγκριση απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό για τις περιπτώσεις δεξιάς και αριστερής στροφής στα αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα.....	109

1

Εισαγωγή

1.1 Η φύση ως πηγή έμπνευσης στην εξέλιξη των αυτόνομων συστημάτων

Ανέκαθεν, ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε τα στοιχεία της φύσης προκειμένου να βρει λύση στα προβλήματα που αντιμετώπιζε. Από τα πρώτα χρόνια, με την ανακάλυψη της φωτιάς και την εγχάραξη της πέτρας για μετατροπή της σε φονικό όπλο – μέσο που θα του πρόσφερε τροφή – μέχρι το παρόν στο οποίο η εξέλιξη της τεχνολογίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη φύση. Αφενός με τη χρήση πρώτων υλών για την κατασκευή μηχανών και αφετέρου λόγω του γεγονότος ότι οι άνθρωποι εκμεταλλεύονται την άρτια «τεχνογνωσία» που μας προσφέρει έτοιμη η φύση και την εφαρμόζουν κατά το σχεδιασμό μηχανών.

Το παρόν οικοσύστημα, είναι ένα αποτέλεσμα εξέλιξης των οργανισμών, εκατομμύριων χρόνων. Σύμφωνα με τη θεωρία της εξέλιξης, κάθε χαρακτηριστικό, κάθε μέλος, κάθε κύτταρο ενός οργανισμού, εξελίχθηκε στηριζόμενο σε δύο φυσικές δράσεις, τη συνεχή διαίρεση του κυττάρου αλλά ταυτόχρονα και τη μη ακριβή αντιγραφή των χαρακτηριστικών του, στο νέο παραγόμενο κύτταρο. Έτσι, στις πολλαπλές εκδοχές του ίδιου κυττάρου, είναι φυσικό επακόλουθο να επιβιώνει στις

αντίξοες καιρικές συνθήκες, στο πέρασμα του χρόνου ή στις επιθέσεις από ιούς αυτό που βάσει τυχειότητας αποδεικνύεται εν τέλει το πιο ανθεκτικό κύτταρο· κάτι που ονομάζουμε φυσική επιλογή.

Μπορούμε λοιπόν αδιαμφισβήτητα να συμπεράνουμε ότι το οικοσύστημα του παρόντος αγγίζει την τελειότητα αφού εξελίχθηκε και επιβίωσε στις αντιστάσεις και επιθέσεις εκατομμυρίων χρόνων. Αυτός είναι και ο λόγος που η επιστημονική κοινότητα αναζητεί τις λύσεις των προκλήσεων που παρουσιάζονται στο πέρασμα του χρόνου, εκεί που αποδεδειγμένα φαίνεται να παρουσιάζονται οι υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης και αποτελεσματικότητας· στη φύση.

Τα αυτόνομα αυτοκίνητα γίνονται όλο και πιο απαραίτητο στοιχείο της σύγχρονης κοινωνίας. Η υπερσύγχρονη τεχνολογία ηλεκτρονικών υπολογιστών προσπαθεί να προσομοιώσει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι εγκέφαλοί μας και αν είναι δυνατόν, να βελτιώσει τις επιδόσεις τους. Θα υπάρξει αυξανόμενη ανάγκη για τις εφαρμογές της τεχνολογίας της τεχνητής νοημοσύνης στα αυτοκίνητα, για την πρόληψη της συμφόρησης και των ατυχημάτων. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι τα αυτόνομα αυτοκίνητα θα πρέπει να εργάζονται, να επικοινωνούν και να μαθαίνουν συλλογικά και όχι ως μεμονωμένες μονάδες. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων ακολουθεί πιστά τις αρχές μιας νέας επιστήμης που βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας της φύσης· την επιστήμη της νοημοσύνης σμήνους¹.

Η νοημοσύνη σμήνους είναι η συλλογική συμπεριφορά οποιουδήποτε συνόλου αποκεντρωμένων, αυτόνομων συστημάτων που είναι φυσικά ή τεχνητά. Η ιδέα εφαρμόζεται σήμερα στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης αφού αποτελεί μια ιδιότητα συστημάτων που επιδεικνύουν συλλογικά ευφυή συμπεριφορά.

Τα συστήματα νοημοσύνης σμήνους συνήθως αποτελούνται από ένα πλήθος απλών μονάδων. Η κάθε μονάδα λειτουργεί αυτόνομα. Οι μονάδες νοημοσύνης σμήνους ακολουθούν πολύ απλούς κανόνες: Παρόλο που δεν υπάρχει κεντρική δομή ελέγχου που να υπαγορεύει τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται οι μεμονωμένες μονάδες, φαίνεται να αναπτύσσεται μια τάξη μεταξύ των μονάδων. Οι τοπικές και τυχαίες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μονάδων τείνουν να οδηγήσουν στην εμφάνιση «νοημοσύνης» καθολικής συμπεριφοράς.

¹ Swarm intelligence

Η έμπνευση για συστήματα τεχνητής νοημοσύνης προέρχεται άμεσα από τη φύση. Φυσικό παράδειγμα νοημοσύνης σμήνους αποτελεί ένας υπεροργανισμός που επιβίωσε στους αιώνες και θεωρείται από τους πιο ανθεκτικούς οργανισμούς της φύσης, τα μυρμηγκία.



Εικόνα 1 : Σμήνος μυρμηγκιών

Τα μυρμηγκία είναι ένα σύνολο μονάδων – σμήνος – που δρα ως μία ενιαία οντότητα με μία ενιαία νοημοσύνη. Η συνεργασία μεταξύ των μυρμηγκιών τους επιτρέπει να εκτελούν σύνθετες εργασίες, που υπό άλλες συνθήκες θα φάνταζε αδύνατο. Ο εγκέφαλος αυτής της ενιαίας οντότητας δεν συγκεντρώνεται σε μία κεντρική ισχυρή μονάδα αλλά κατανέμεται ισόποσα σε κάθε μεμονωμένη μονάδα ξεχωριστά.

Κάθε μυρμηγκί, πράττει ανάλογα, αναλύοντας τη συμπεριφορά των γειτονικών μυρμηγκιών και του περιβάλλοντός του μετατρέποντας το φαινομενικά «άτακτο» χάος των αλληλεπιδράσεων του σμήνους σε μοτίβα έξυπνης καθολικής συμπεριφοράς.

Δεν θα αναλυθεί ο τρόπος λήψης αποφάσεων κάθε μονάδας, ή της διάδοσης της πληροφορίας μεταξύ των μυρμηγκιών κατά τη συνεργασία τους, αξίζει όμως να αναφερθεί ότι αυτό, όπως και πολλά άλλα παραδείγματα νοημοσύνης σμήνους που βρίσκουμε στη φύση: σμήνη πουλιών, κοπάδια ψαριών, μέλισσες που ενημερώνουν

τη κυψέλη για νέκταρ κ.α., αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης στην ανάπτυξη των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης και των δικτύων επικοινωνίας σε αυτόνομα συστήματα και κυρίως στα αυτόνομα αυτοκίνητα.



Εικόνα 2 : Σμήνος αυτόνομων οχημάτων

1.2 Η Εποχή της Πληροφορίας

Πόσος καιρός θα χρειαστεί μέχρι οι μηχανές να κάνουν μια εργασία καλύτερα από τους ανθρώπους;

Ο αυτοματισμός κάποτε σήμαινε μεγάλες άλογες μηχανές που κάνουν επαναληπτική εργασία στα εργοστάσια. Σήμερα μπορούν να προσγειώσουν ένα αεροπλάνο, να διαγνώσουν τον καρκίνο ή να αντικαταστήσουν τον οδηγό σε ένα όχημα.

Οδηγούμεστε με συνοπτικές διαδικασίες σε μία νέα εποχή της τεχνολογίας, διαφορετική από οτιδήποτε γνωρίζαμε μέχρι τώρα, αυτή του αυτοματισμού. Σύμφωνα με μία έρευνα του 2013, σχεδόν οι μισές δουλειές στις Ηνωμένες Πολιτείες θα μπορούσαν δυνητικά να αυτοματοποιηθούν στις επόμενες δύο δεκαετίες [1].

Υπήρξε ξεκάθαρη πρόοδος και ανάπτυξη όσον αφορά την απασχόληση των ανθρώπων για να βγάλουν τα προς το ζην και το βιοτικό τους επίπεδο. Για το

μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ασχολούμασταν με τη γεωργία. Με τη βιομηχανική επανάσταση, στραφήκαμε στις εργασίες παραγωγής, και με την αυτοματοποίηση να γίνεται περισσότερο διαδεδομένη, οι άνθρωποι άρχισαν να ασχολούνται με τις εργασίες υπηρεσιών.

Στη συνέχεια ακολούθησε μια άλλη σημαντική καμπή στην ιστορία της ανθρωπότητας, η Εποχή της Πληροφορίας. Ξαφνικά, οι κανόνες είναι διαφορετικοί. Οι θέσεις εργασίας μας αντικαθίστανται πλέον από μηχανές, πολύ ταχύτερα σε σχέση με το παρελθόν. Ενώ οι νέες βιομηχανίες στην εποχή της πληροφορίας αναπτύσσονται ραγδαία, οι νέες θέσεις που δημιουργούν ολοένα και λιγότερες. Το 1979, η General Motors απασχολούσε περισσότερους από 800.000 εργαζομένους και είχε κέρδη περίπου 11 δισ. δολάρια. Το 2012, η Google είχε κέρδη περίπου 14 δισ. δολάρια, απασχολώντας μόλις 58.000 άτομα [2]. Αυτό μας οδηγεί αβίαστα στην υπόθεση του τι ήταν αυτό που δημιουργούσε θέσεις εργασίας στο παρελθόν: Οι καινοτόμες νέες επιχειρήσεις. Οι προηγούμενες καινοτόμες επιχειρήσεις χάνουν έδαφος.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αυτοκινητοβιομηχανία. Η έγερση των αυτοκινήτων, 100 χρόνια πριν, δημιούργησε τεράστιες βιομηχανίες. Τα αυτοκίνητα μεταμόρφωσαν τον τρόπο ζωής μας, τις υποδομές και τις πόλεις μας. Εκατομμύρια ανθρώπων βρήκαν με αυτόν τον τρόπο θέσεις εργασίας, είτε άμεσα είτε έμμεσα. Δεκαετίες επενδύσεων διατήρησαν την ορμή που είχε αυτή η βιομηχανία. Σήμερα, η διαδικασία αυτή έχει σχεδόν ολοκληρωθεί. Οι καινοτομίες στην αυτοκινητοβιομηχανία δεν δημιουργούν τόσες θέσεις εργασίας όσες δημιουργούσαν στο παρελθόν. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, μια καινοτομία με κινητήριο μοχλό της τη βιωσιμότητα του περιβάλλοντος, δε θα δημιουργήσει εκατομμύρια νέες θέσεις εργασίας. Η καινοτομία στην Εποχή της Πληροφορίας δεν συνεπάγεται τη δημιουργία αρκετών νέων θέσεων εργασίας, κάτι το οποίο είναι ήδη αρκετά ανησυχητικό από μόνο του, ωστόσο τώρα έρχεται ένα καινούριο "κύμα" αυτοματισμού και μία νέα γενιά μηχανών αρχίζει σιγά σιγά να επικρατεί.

Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των μηχανών αυτοματισμού, απαιτείται πρώτα η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των ανθρώπων. Η πρόοδος του ανθρώπου βασίζεται στη διαίρεση της εργασίας. Ενώσω αναπτυσσόμασταν όλες αυτές τις χιλιετίες, οι δουλειές μας γινόντουσαν ολοένα και πιο εξειδικευμένες. Παρόλο που ακόμη και οι πιο ευφυής μηχανές μας υστερούν στο να εκτελούν

σύνθετες εργασίες, είναι υπερβολικά καλές στο να κάνουν πολύ αυστηρά κάποιες συγκεκριμένες ή/και προβλέψιμες εργασίες. Αυτό ήταν που αφάνισε τις θέσεις εργασίας στα εργοστάσια. Ωστόσο μία σύνθετη εργασία αποτελείται από πολλές αυστηρά ορισμένες και προβλέψιμες εργασίες όπου η μία ακολουθεί την άλλη. Οι μηχανές κοντεύουν να γίνουν τόσο καλές στο να αναλύουν σύνθετες εργασίες σε πολλές μικρότερες και προβλέψιμες, που στο τέλος για πολλούς ανθρώπους, δεν θα υπάρχει άλλο περιθώριο για εξειδίκευση. Βρισκόμαστε στα πρόθυρα του να βγούμε εκτός συναγωνισμού.

Οι ψηφιακές μηχανές το επιτυγχάνουν αυτό μέσω του machine learning, το οποίο τις επιτρέπει, αναλύοντας δεδομένα, να αποκτούν πληροφορίες και ικανότητες. Οι μηχανές λοιπόν γίνονται καλύτερες σε κάτι, όταν ανακαλύπτουν σχέσεις σε αυτό. Οι μηχανές διδάσκουν τον εαυτό τους. Αυτό το πετυχαίνουμε δίνοντας στον υπολογιστή πληθώρα δεδομένων σχετικά με το αντικείμενο το οποίο θέλουμε να κάνουμε καλύτερο. Εάν δείξουμε σε μία μηχανή όλα τα προϊόντα που αγοράσαμε online, σιγά σιγά θα μάθει τι να μας προτείνει, ώστε να αγοράσουμε περισσότερα προϊόντα.

Τώρα είναι που το machine learning φτάνει στη μεγαλύτερη δυναμική του, καθώς τα τελευταία χρόνια οι άνθρωποι έχουν αρχίσει να συλλέγουν δεδομένα για τα πάντα. Η Εποχή της Πληροφορίας: Συμπεριφορές, μοτίβα στον καιρό, ιατρικό ιστορικό, συστήματα επικοινωνιών, στοιχεία ταξιδιών, και βεβαίως δεδομένα σχετικά με τις δουλειές μας. Έχουμε δημιουργήσει μία τεράστια βάση δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι μηχανές ώστε να μάθουν να εκτελούν εργασίες όπως οι άνθρωποι, και να μάθουν να τις εκτελούν καλύτερα.

Οδηγούμεστε λοιπόν σε μία αναπόφευκτη πραγματικότητα αυτόνομων οχημάτων, στην οποία καλούμαστε να προσφέρουμε στον οδηγό, τεχνολογίες που θα καταστήσουν την οδήγηση ασφαλέστερη, θα εξοικονομήσουν χρόνο και χρήμα και θα επιβεβαιώσουν ότι η επένδυση στην αυτοματοποίηση της οδήγησης θα επιφέρει τα μέγιστα επικερδή αποτελέσματα σε σχέση με το χρόνο που χρειάστηκε η έρευνα για τη μετάβαση από την ανθρώπινη στην αυτόνομη οδήγηση.

Η τεχνολογία αυτόνομων οχημάτων καθίσταται δυνατή με χρήση πολλών αισθητήρων και επενεργητών. Αυτά είναι που προσφέρουν σε ένα όχημα τη δυνατότητα «αίσθησης» του περιβάλλοντα χώρου, και αντίδρασης προκειμένου να προσαρμόζεται σε αυτό, σε πραγματικό χρόνο. Η εξέλιξη της τεχνολογίας λοιπόν στηρίζεται στην μίμηση βιολογικών οργανισμών για τους οποίους γνωρίζουμε μεν

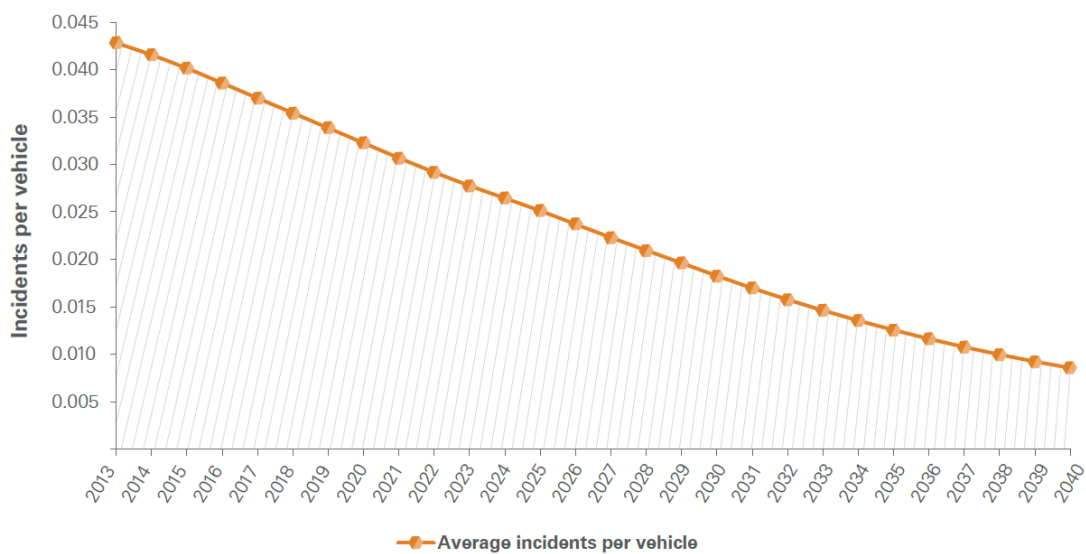
την αποτελεσματικότητα χρήσης τους στον πραγματικό κόσμο, αλλά που επιχειρούμε στη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους κατασκευάζοντας τεχνολογικά ομοιώματα αυτών δε. Στην προκειμένη περίπτωση, τα άλογα μπορούν να θεωρηθούν τα αυτόνομα οχήματα του παρελθόντος.

Κατά τη μετάβαση ωστόσο από την εποχή μεταφοράς με τα άλογα, στην εποχή της αυτοκινητοβιομηχανίας, απωλέσαμε σημαντικές δεξιότητες αυτονομίας, όπως η αποφυγή εμποδίων, καθώς αδιαμφισβήτητα τα άλογα είχαν την ικανότητα να αναλάβουν αποτελεσματικά αυτόνομες αποστολές. Πολλές φορές τα άλογα δύναται να μετέφεραν τον επιβάτη ασφαλή στον προορισμό του, ακόμη και όταν αυτός δεν ήταν σε θέση να «οδηγήσει» το άλογο. Μπορούσαν έστω να μεταπέσουν σε «ασφαλή κατάσταση», κάνοντας στάση στην άκρη του δρόμου, ανανεώνοντας τα καύσιμά τους τρώγοντας χορτάρι.

Η ανάληψη του ελέγχου από τον άνθρωπο, του μέσου μεταφοράς του, στα αυτοκίνητα, αν και αποτελεσματική, απέβη μοιραία. Τα οδικά δυστυχήματα είναι η αιτία για εκατομμύρια θανάτους κάθε χρόνο ξεπερνώντας θανάσιμες ασθένειες ή φυσικές καταστροφές. Έρευνες έδειξαν ότι περίπου 60% των οδικών συγκρούσεων θα μπορούσαν να αποφευχθούν εάν ο χρήστης του οχήματος λάμβανε ένα προειδοποιητικό σήμα έστω μισό δευτερόλεπτο πριν τη σύγκρουση [3]. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), 1.24 εκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως πέθαναν σε οδικά δυστυχήματα το 2010 [4].

Επιπρόσθετα, μία άλλη έρευνα έδειξε ότι 90% των οδικών ατυχημάτων προκαλούνται από ανθρώπινο λάθος, εκτιμώντας ότι τα αυτόνομα οχήματα θα μειώσουν αυτό το ποσοστό, αφού θα υπάρξει δυνητική μείωση στη συχνότητα εμφάνισης ατυχημάτων ανά όχημα έως και 80% μέχρι το 2040 [5].

Accident frequency per vehicle by year (baseline scenario)



Source: KPMG LLP actuarial analysis

Σχήμα 1: Συχνότητα ατυχήματος ανά όχημα ανά έτος μέχρι το 2040

Τα πιο πάνω στατιστικά, οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα να στραφεί σε πιο προηγμένα συστήματα τεχνολογίας, αρχικά ως υποστήριξη του ανθρώπου κατά το οδήγημά του, όπως είναι το Advance Driver Assistance Systems (ADAS) [6] και στη συνέχεια ως αυτοματοποίηση των λειτουργιών του οδηγήματος, με την καθιέρωση του Automated Driving System (ADS). Περαιτέρω έρευνα στα αυτόνομα οχήματα είχε ως αποτέλεσμα την εμπορευματοποίησή τους στις αρχές του 21^{ου} αιώνα. Έτσι, σε μερικά χρόνια η τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων δεν θα είναι μόνο πιο αποτελεσματική αλλά και πιο ασφαλής από τη δυνητικά φυσιολογική μεταφορά που πιθανό θα χρησιμοποιούσε ο άνθρωπος με την μη ύπαρξη της τεχνολογίας, τα άλογα, αφού θα έχει και τη δυνατότητα να «προβλέπει» το μέλλον χρησιμοποιώντας την τεχνολογία της τεχνητής νοημοσύνης.

Η αυτονομία είναι η λύση και όχι το πρόβλημα στον τομέα των μεταφορών.

2

Αυτόνομα οχήματα

Μία αυτόνομη μηχανή υπάγεται στην κατηγορία των ρομπότ. Ρομπότ είναι η ορολογία που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε οποιαδήποτε μηχανή με κινούμενα μηχανικά μέρη. Τα ρομπότ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αυτά που αντιδρούν με το περιβάλλον και αυτά που δεν αντιδρούν. Στα ρομπότ που αντιδρούν με το περιβάλλον υπάγονται οι υποκατηγορίες μηχανών με δεδομένες συγκεκριμένες αντιδράσεις, και μηχανών που αντιδρούν προσαρμόζοντας κάθε φορά τις κινήσεις τους βάσει των συνθηκών του περιβάλλοντος τους. Αυτές τις μηχανές είναι που ονομάζουμε αυτόνομες.

Τι καθορίζει ένα όχημα λοιπόν, ως αυτόνομο?

Στην τρέχουσα παγκόσμια συζήτηση για την αυτόνομη οδήγηση δείχνει ότι δεν υπάρχει μια καθολική ορολογία που να περιγράφει αυστηρά την «αυτονομία». Ωστόσο θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε ένα όχημα ως αυτόνομο όταν έχει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται τον περιβάλλοντα χώρο και να προσαρμόζει τη κίνηση του σε αυτόν, χωρίς την συμβολή ανθρώπινου παράγοντα για την οδήγηση του.

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων της ευρείας χρήσης αυτόνομων οχημάτων είναι

- (1) Ασφάλεια: Η μείωση των ατυχημάτων που προκαλούνται από ανθρώπινα σφάλματα στην οδήγηση και οφείλονται κυρίως σε απόσπαση προσοχής ή επικίνδυνη οδήγηση, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους σε ανθρώπινες ζωές πρωτίτως, αλλά και σε υλικές ζημιές.

- (2) Εξοικονόμηση χρόνου: Εφόσον δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη οδηγού, απαλλάσσονται οι επιβάτες από την υποχρέωση της οδήγησης. Προσφέρεται έτσι η δυνατότητα αντικατάστασης του χρόνου οδήγησης με χρόνο χαλάρωσης ή εργασίας κερδίζοντας έτσι περίπου 1 ώρα κατά μέσο όρο ανά ημέρα.
- (3) Μειωμένες εκπομπές: Αύξηση των ορίων ταχύτητας, ομαλότερες διαδρομές, αυτοκινητόδρομοι με μεγαλύτερη χωρητικότητα και μειωμένη συμφόρηση, λόγω της μειωμένης ανάγκης για μέτρα ασφαλείας, έχουν ως αποτέλεσμα τη βιώσιμη ανάπτυξη αφού η βελτιστοποίηση του ελέγχου των συστημάτων ενός αυτόνομου οχήματος, όπως είναι το σύστημα κατανάλωσης καυσίμου, θα είναι τέτοια που υπολογίζεται ότι τα οχήματα του μέλλοντος θα βοηθήσουν στη μείωση των εκπομπών κατά 60%.

Τα μειονεκτήματα που κρύβονται στη χρήση αυτόνομων οχημάτων είναι

- (1) Η αξιοπιστία λογισμικού.
- (2) Ο κίνδυνος αποτυχίας των συστημάτων ελέγχου.
- (3) Η έλλειψη νομικού πλαισίου σχετικά με την ευθύνη σε περίπτωση ατυχημάτων.
- (4) Η κατάργηση επαγγελματιών που αφορούν την οδήγηση οχημάτων.

2.1 Τα επίπεδα αυτονομίας ενός οχήματος

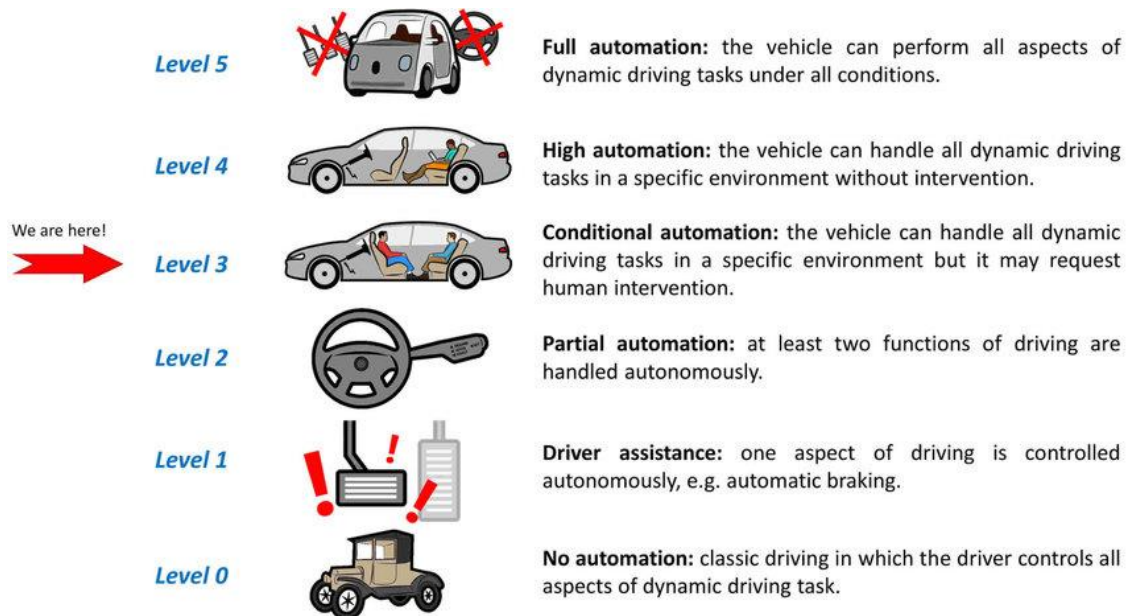
Το 2013, η Εθνική Υπηρεσία Οδικής Ασφάλειας των Αυτοκινητόδρομων (NHTSA) του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ όρισε έξι διαφορετικά επίπεδα αυτόνομης οδήγησης. Τον Οκτώβριο του 2016, η NHTSA επικαιροποίησε την πολιτική της ώστε να αντικατοπτρίζει ότι έχει υιοθετήσει επίσημα τα επίπεδα αυτονομίας που περιγράφονται στο έγγραφο J3016 του Society of Automotive Engineers (SAE) International [7]. Τον Ιούνιο του 2018 η SAE International επικαιροποίησε το έγγραφο J3016, έτσι που να ανταποκρίνεται στην εξέλιξη της τεχνολογίας. Έτσι, το τμήμα Μεταφορών των ΗΠΑ (DOT) και η NHTSA σχεδιάζουν να αναβαθμίσουν την πολιτική αυτόνομων οχημάτων, αργότερα μέσα στο έτος.

Τα επίπεδα αυτονομίας που περιγράφουν το σύστημα και όχι το όχημα, όπως καθορίζεται από την πολιτική της NHTSA το 2016, είναι

- Επίπεδο 0: Καμία αυτονομία. Ο οδηγός ελέγχει όλες τις λειτουργίες: τιμόνι, φρένα, γκάτσι, ισχύς.

- Επίπεδο 1: Βασικά συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης. Οι περισσότερες λειτουργίες εξακολουθούν να ελέγχονται από τον οδηγό, αλλά μια συγκεκριμένη λειτουργία (όπως το τιμόνι ή η επιτάχυνση) μπορεί να γίνει αυτόματα από το αυτοκίνητο.
- Επίπεδο 2: Μερική αυτονομία. Τουλάχιστον ένα σύστημα υποβοήθησης οδηγού "τόσο του τιμονιού όσο και της επιτάχυνσης / επιβράδυνσης με χρήση πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον οδήγησης" είναι αυτοματοποιημένο, όπως το cruise control και το κεντράρισμα στη λωρίδα. Σημαίνει ότι ο "οδηγός απεμπλέκεται από το φυσικό χειρισμό του οχήματος, έχοντας τα χέρια του από το τιμόνι και το πεντάλ του ποδιού ταυτόχρονα", σύμφωνα με το SAE. Ωστόσο, ο οδηγός πρέπει να είναι πάντα έτοιμος να πάρει τον έλεγχο του οχήματος.
- Επίπεδο 3: Αυτονομία υπό όρους. Τα αυτόνομα οχήματα έχουν πλήρη επίγνωση του περιβάλλοντος και έχουν αναλάβει την οδήγηση, ωστόσο ανά πάσα στιγμή μπορεί να κληθεί ο οδηγός να παρέμβει. Ο οδηγός δεν χρειάζεται να προσέχει στον δρόμο, αλλά πρέπει να είναι σε θέση να αναλάβει τον έλεγχο. Εδώ τα όρια που ορίζονται είναι λίγο ασαφή. Αρχικά, ο οδηγός μπορεί να χρειαστεί αρκετά δευτερόλεπτα για να παρέμβει και να αξιολογήσει την κατάσταση, με την SAE να δηλώνει ότι «μερικά δευτερόλεπτα» είναι αρκετά. Μάλιστα, έρευνα από το πανεπιστήμιο Stanford έδειξε ότι η μετάβαση από αυτόνομη οδήγηση σε χειροκίνητο έλεγχο του οχήματος, ίσως είναι πολύ δύσκολη για τους οδηγούς, δημιουργώντας έτσι της κατάλληλες συνθήκες για να δημιουργηθούν φαινόμενα υπερστροφής ή υποστροφής στο όχημα[8]. Αξίζει να αναφερθεί ότι μέχρι το επίπεδο 2 ο οδηγός είναι που παρακολουθεί, ελέγχει και κατευθύνει το περιβάλλον οδήγησης, ενώ από το επίπεδο 3 και μετά αυτό ελέγχεται από το ADS.
- Επίπεδο 4: Υψηλό επίπεδο αυτοματισμού. Εδώ πλέον ο οδηγός αρχίζει και γίνεται «αναλώσιμος». Το αυτόνομο όχημα μπορεί να διαχειριστεί όλες τις λειτουργίες της οδήγησης, ωστόσο υπό συγκεκριμένα «σενάρια». Για παράδειγμα ένα τέτοιο σενάριο θα ήταν η οδήγηση στον αυτοκινητόδρομο, ή αυτό που θέλει να κάνει η Google με τα οχήματά της, τα οποία κυκλοφορούν σε μια καλά χαρτογραφημένη περιοχή. Αν βάλουμε ένα όχημα με επίπεδο 4 αυτόνομης οδήγησης σε ένα άγνωστο σημείο ίσως αντιμετωπίσει μερικά προβλήματα.

- Επίπεδο 5: Πλήρης αυτονομία. Σε αυτό το επίπεδο, το αυτόνομο όχημα είναι ικανό να διαχειριστεί με ευκολία την οδήγηση σε όλες τις περιπτώσεις, κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες, όπως θα έκανε και ένας άνθρωπος. Δεν χρειάζονται προαπαιτούμενα για να λειτουργήσει, καθώς οι αισθητήρες και το λογισμικό έχουν πλήρη επίγνωση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 3 : Επίπεδα αυτονομίας των οχημάτων

Σίγουρα το Επίπεδο 5 είναι και το πιο δύσκολο για να επιτευχθεί, αλλά δυστυχώς στον τομέα των μεταφορών κάθε τι λιγότερο θα ήταν συμβιβασμός, αφού η ασφάλεια είναι το ίδιο σημαντικό με την αποδοτικότητα.

Αυτή τη στιγμή οι μεγαλύτερες κατασκευαστικές εταιρείες αυτοκινήτων προσφέρουν το Επίπεδο 1 αυτονομίας και μερικές προσφέρουν το Επίπεδο 2. Επίσης αρκετές εταιρείες έβαλαν στόχο το 2020 για να ανακοινώσουν οχήματα Επιπέδων 3 και 4, και η υλοποίησή τους βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο.

Ατυχήματα που συνέβησαν με επίκεντρο τα αυτόνομα οχήματα μεγάλων εταιρειών όπως το συμβάν με το αυτόνομο όχημα της Apple [9], της Tesla [10] ή της Uber [11] εγείρουν ερωτήματα και προβληματισμούς όσο αφορά την αξιοπιστία αυτών των οχημάτων. Ωστόσο η έρευνα και ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών βρίσκεται σε πολύ προχωρημένο στάδιο και δεν θα αργήσει μέχρι να αποδειχθεί ότι οι μηχανές θα οδηγούν ασφαλέστερα απ' ότι οι άνθρωποι.

2.2 Λειτουργία αυτόνομου οχήματος

Τα αυτόνομα οχήματα αντιλαμβάνονται τον περιβάλλοντα χώρο χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από αισθητήρες. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας από προηγμένα συστήματα ελέγχου με σκοπό την εύρεση της κατάλληλης διαδρομής και τη διασφάλιση της σωστής συμπεριφοράς στο δρόμο δηλαδή ικανότητα αποφυγής εμποδίων, αναγνώρισης πεζών, αναγνώρισης σήμανσης και παρακολούθησης κυκλοφορίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την επιλογή αισθητήρα σε εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων είναι,

- **Ακρίβεια:** Το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής τιμής και της αναφερόμενης μέτρησης του αισθητήρα. Αυτή η ακρίβεια θα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων θορύβου και των εξωτερικών παρεμβολών
- **Ανάλυση:** Η ελάχιστη διακύμανση μεταξύ δύο μετρήσεων, η οποία είναι γενικά μικρότερη από την πραγματική ακρίβεια του αισθητήρα.
- **Ευαισθησία:** Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να ανιχνευθεί ή να μετρηθεί.
- **Δυναμική εμβέλεια:** Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές που μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια.
- **Αντίληψη:** Αυτό γενικά μεταφράζεται ως το «οπτικό πεδίο» του αισθητήρα.
- **Ενεργός έναντι παθητικού:** Ένας ενεργός αισθητήρας εκπέμπει μια μορφή ενέργειας για την αντίληψη του περιβάλλοντα χώρου, ενώ ένας παθητικός αισθητήρας βασίζεται στις συνθήκες περιβάλλοντος για την παροχή πληροφοριών.
- **Χρονικός ορίζοντας:** Ο ρυθμός ανανέωσης του αισθητήρα και η συχνότητα του εύρους ζώνης μέτρησης με το χρόνο.
- **Διεπαφή εξόδου:** Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό ως έξοδος του αισθητήρα που μπορεί να είναι οτιδήποτε, από μία αναλογική τάση, αναλογικό ρεύμα, ψηφιακό σήμα, σειριακή ροή ή ροή δεδομένων δικτύου.

2.3 Αισθητήρες και επενεργητές αυτόνομου οχήματος

Οι αισθητήρες και οι επενεργητές σε ένα αυτόνομο όχημα εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες:

- Πλοήγηση και καθοδήγηση: Γνώση της κατεύθυνσης των οχημάτων
- Οδήγηση και ασφάλεια: Όραση των οχημάτων
- Διαδίκτυο – Cloud: Κοινοποίηση των πληροφοριών
- Εκτέλεση ενεργειών: Επενέργεια των οχημάτων βάσει των αισθητήρων

Υπάρχουν δεκάδες υποσυστήματα αισθητήρων και επενεργητών για αυτές τις κατηγορίες. Στη συνέχεια αναλύονται τα κυριότερα υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων.

2.3.1 Πλοήγηση και καθοδήγηση

Ο σκοπός πλοήγησης και καθοδήγησης του οχήματος είναι η γνώση της θέσης του ανά πάσα στιγμή, και ο υπολογισμός της βέλτιστης διαδρομής προκειμένου να φτάσει στον προορισμό του. Αυτό αποτελεί πρόκληση για τα υποσυστήματα αισθητήρων και ελέγχου αφού σε περίπτωση εμφάνισης εμποδίου (πχ πεζός) στη βέλτιστη διαδρομή, το σύστημα πλοήγησης καλείτε σε πραγματικό χρόνο να επανεκτιμήσει τη βέλτιστη διαδρομή και να δώσει την εντολή για αλλαγή της πορείας του οχήματος. Το γεγονός ωστόσο ότι η πορεία του οχήματος περιορίζεται από διάφορους παράγοντες (πχ οι γραμμές του δρόμου), αυτό αυξάνει επιπλέον την απαιτούμενη υπολογιστική προσπάθεια.

Τα κυριότερα υποσυστήματα πλοήγησης και καθοδήγησης είναι:

- Global Positioning System (GPS)
- Inertial Measurement Unit (IMU)

2.3.1.1 Global Positioning System

Το GPS είναι το κύριο υποσύστημα που χρησιμοποιείται για πλοήγηση και καθοδήγηση. Το GPS υπολογίζει τη θέση του οχήματος βάσει ανάλυσης και σύνθεσης σημάτων από τουλάχιστον τέσσερις από τους σύνολο 60 και πλέον δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά. Το σύστημα GPS έχει ακρίβεια ενός μέτρου και χρειάζεται 30-60 δευτερόλεπτα μέχρι να αρχικοποιήσει τη θέση του οδηγού. Είναι απαραίτητο εργαλείο για τα αυτόνομα αυτοκίνητα αλλά από μόνο του δεν είναι αρκετό καθώς το σήμα από τους δορυφόρους παρεμποδίζεται

από φαράγγια, σήραγγες, ραδιοφωνικές παρεμβολές και άλλους παράγοντες, καθιστώντας έτσι αναγκαία την υποστήριξη του υποσυστήματος GPS από άλλα.

2.3.1.2 Inertial Measurement Unit

Η συσκευή IMU αποτελείται από συνολικά έξι αισθητήρες, τρία γυροσκόπια και τρία επιταχυνσιόμετρα, ένα ζευγάρι για κάθε ένα από τους X, Y, και Z άξονα. Παρέχουν πληροφορίες για τη γραμμική και περιστροφική κίνηση αλλά και για τη θέση του οχήματος, ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ή της παρεμπόδισης σήματος. Η πληροφορία που δίνεται από το IMU δεν είναι απόλυτη, αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να προσδιοριστεί η αρχική θέση του οχήματος χειροκίνητα ή με GPS και στη συνέχεια σε αυτή υπερτίθεται το σήμα του IMU για να βελτιώσει την πληροφορία θέσης.

2.3.2 Οδήγηση και Ασφάλεια

Τα υποσυστήματα του GPS και IMU δίνουν πολύ ακριβή πληροφορία θέσης. Ωστόσο ένα αυτόνομο αυτοκίνητο είναι απαραίτητο να μπορεί να αναγνωρίζει τι υπάρχει γύρω από αυτό προκειμένου να είναι σε θέση αφενός να παραμείνει εντός των ορίων οδήγησης και αφετέρου να αποφύγει τυχόν εμπόδια που θα εμφανιστούν στο δρόμο του. Αυτό επιτυγχάνεται με αισθητήρες που παρέχουν εποπτική εικόνα 360ο για το κοντινό περιβάλλον του οχήματος. Η αποτελεσματικότερη λύση είναι η χρήση καμερών όμως η βαριά, από άποψη μνήμης, επεξεργασία γραφικών, ώθησε την επιστημονική κοινότητα σε χρήση εναλλακτικών επιλογών [12]. Κυριότερες αυτών είναι:

- Light Detection and Ranging (LIDAR)
- Radio Detection And Ranging (RADAR)
- Αισθητήρες υπερήχων (Ultrasonic)
- Αισθητήρες εικόνας (κάμερες)
- Υπέρυθρες (Infrared)

2.3.2.1 *Light Detection and Ranging*

Το LIDAR είναι ένα υποσύστημα πομπού high-speed, high-power παλμών laser και ενός αποδέκτη των σημάτων στον οποίο βάσει χρονομέτρησης της διάρκειας εκπομπής τους, υπολογίζονται οι αποστάσεις των τριγύρω αντικειμένων, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο μια τρισδιάστατη πληροφορία του περιβάλλοντα χώρου. Οι πληροφορίες αυτές αναλύονται μέσω ενός επεξεργαστή και μετατρέπονται σε αναγνώριση όγκου και διανυσμάτων θέσης, ταχύτητας και κατεύθυνσης των αντικειμένων. Επίσης βάσει εξελιγμένων αλγόριθμων ο επεξεργαστής δύναται να προβλέψει την πιθανότητα σύγκρουσης αλλά και στρατηγικές αποφυγής της. Έχουν εύρος ικανοποιητικής καταγραφής πληροφορίας τα 200 μέτρα.

Η χρήση του LIDAR για έλεγχο κοντινών αποστάσεων, όπως για παράδειγμα στη διαδικασία στάθμευσης, σε αλλαγή λωρίδας ή γενικότερα όταν βρίσκεται πολύ κοντά σε άλλα αντικείμενα, δεν κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική. Επίσης δεν ανιχνεύει εύκολα το γυαλί και δυσλειτουργεί σε ανώμαλες καιρικές συνθήκες αφού στηρίζεται στο φωτισμό. Έτσι είναι αναγκαία η πλαισίωση του συστήματος LIDAR με τους υπόλοιπους αισθητήρες.

2.3.2.2 *Radio Detection And Ranging*

Τα RADAR, γνωστά για την πλοήγηση πλοίων και αεροπλάνων, λειτουργούν παρόμοια με τα LIDAR συστήματα. Οι αισθητήρες RADAR εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία εάν συναντήσουν εμπόδιο, αντανακλώνται και επιστρέφουν στον αποδέκτη του αισθητήρα παρέχοντας έτσι πληροφορίες για την απόσταση και την ταχύτητα του αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο. Στα οχήματα εγκαθίστανται RADAR κοντινών και μακρινών αποστάσεων, έχουν εύρος ικανοποιητικής καταγραφής πληροφορίας τα 250 μέτρα και συχνότητα συνήθως κοντά στα 77GHz λόγω της καλής ανάλυσης και διάδοσης σήματος που αποδείχθηκε ότι παρέχει.

Είναι σχεδόν ανεπηρέαστα σε συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων και φωτισμού. Αυτό σε συνδυασμό με το χαμηλό τους κόστος σε σύγκριση με τα συστήματα LIDAR τα καθιστούν τα πιο διαδεδομένα συστήματα στην παραγωγή αυτόνομων οχημάτων.

Βασικό μειονέκτημα των RADAR είναι ότι η πληροφορία που παρέχουν είναι δισδιάστατη αφού τα σήματα ταξιδεύουν στο οριζόντιο επίπεδο, έτσι δεν μπορούν να προσδιορίσουν το ύψος των αντικειμένων προκαλώντας προβλήματα για παράδειγμα κάτω από γέφυρες. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αναπτύσσονται τρισδιάστατοι αισθητήρες RADAR που

όμως ακόμη βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο. Επιπλέον παρουσιάζουν προβλήματα εντοπισμού υλικών με χαμηλή διηλεκτρική σταθερά.

2.3.2.3 Αισθητήρες υπερήχων

Οι αισθητήρες υπερήχων προσομοιάζουν το σύστημα πλοήγησης της νυχτερίδας. Λειτουργούν με ακριβώς ίδιο τρόπο όπως τα RADAR εξακριβώνοντας τη θέση των κοντινών αντικειμένων με εκπομπή ηχητικών κυμάτων. Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό εμποδίων στις πολύ κοντινές αποστάσεις, καθιστώντας τα ιδανικά για τη διαδικασία στάθμευσης. Ταξιδεύουν με ταχύτητα ήχου, έχουν συχνότητα 50kHz και εύρος ικανοποιητικής καταγραφής πληροφορίας τα 2 μέτρα.

Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι τα σήματα υπερήχων επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και ότι είναι αποτελεσματικά μόνο σε πολύ χαμηλές ταχύτητες. Ωστόσο εξυπηρετούν ικανοποιητικά το σκοπό χρήσης τους, έτσι δεν υπάρχει η ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξή τους.

2.3.2.4 Αισθητήρες εικόνας

Οι αισθητήρες εικόνας (κάμερες) προσομοιώνουν την ανθρώπινη όραση παράγοντας εικόνες των περιβαλλόντων αντικειμένων του οχήματος. Συγκεκριμένα, η κάμερες στα αυτόνομα συστήματα χρησιμοποιούν τεχνικές μηχανικής όρασης που αυτές διαμορφώνουν την αντίληψη ενός αυτόνομου οχήματος. Υπάρχει η δυνατότητα υπέρθεσης εικόνων από διάφορες κάμερες δημιουργώντας έτσι τρισδιάστατη εικόνα για προσδιορισμό της απόστασης. Η υπέρθεση των εικόνων εκτελεί καθήκοντα αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης μέσω των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης και είναι απαραίτητη για την κατανόηση του περιβάλλοντος.

Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αισθητήρες, οι κάμερες αναγνωρίζουν το χρώμα και το φόντο, καθιστώντας τις ικανές να ερμηνεύουν σήματα και φώτα τροχαίας όπως και την οριοθέτηση των δρόμων από τις γραμμές. Μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως εφεδρικό σύστημα σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου άλλου αισθητήρα. Έχουν εμβέλεια περίπου 120 μέτρα, ωστόσο χρειάζεται βελτίωση αυτού μέχρι τα 250 μέτρα για αποτελεσματικότερη πρόβλεψη σεναρίων στην οδήγηση.

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στη χρήση αισθητήρων εικόνας. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία αποθήκευσης και επεξεργασίας τόσο μεγάλου όγκου δεδομένων.

Επίσης υπάρχουν μηχανικοί περιορισμοί εγκατάστασης, σταθεροποίησης και συντήρησης των συσκευών. Και τέλος, καταστάσεις έντονου ή λιγοστού φωτισμού ή/και ανώμαλων καιρικών συνθηκών αυξάνουν τον κίνδυνο αποτυχίας αναγνώρισης των αντικειμένων. Οι αλγόριθμοι αναγνώρισης των αντικειμένων, επίσης χρειάζονται βελτίωση αφού αποδείχθηκε πειραματικά ότι το ποσοστό αναγνώρισης πεζών αυτή τη στιγμή ανέρχεται στο 95% κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

2.3.2.5 Υπέρυθρες

Οι αισθητήρες υπέρυθρων λειτουργούν συλλέγοντας μακρινά υπέρυθρα σήματα (FIR) μέσω της ανίχνευσης θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από αντικείμενα και ανθρώπινα σώματα.

Το πλεονέκτημα των αισθητήρων υπέρυθρων είναι ότι δεν αντιμετωπίζει προβλήματα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, σε συνθήκες χαμηλού ή υψηλού φωτισμού ή σε περιβάλλοντα ελλιπής λεπτομέρειας όπως συμβαίνει με lidar.

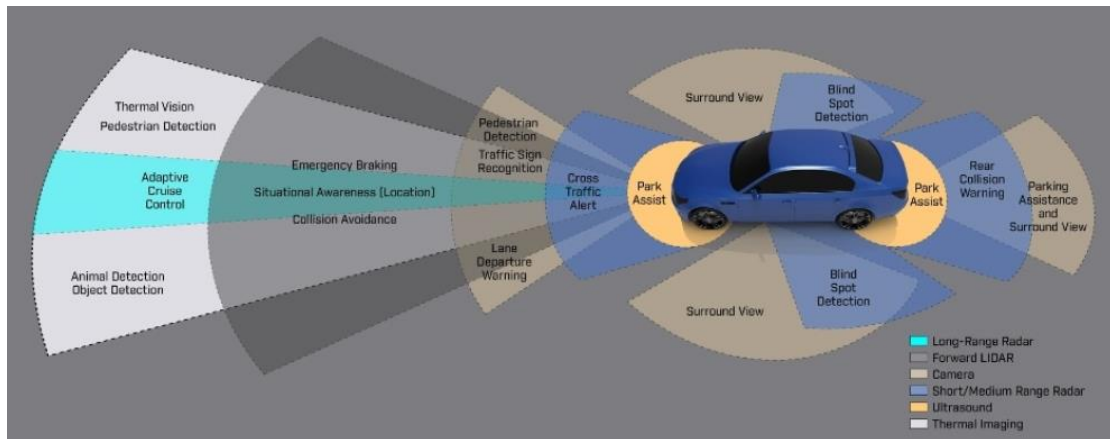
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σύγκριση των προαναφερθέντων αισθητήρων ως προς κάποια μετρικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την αναγκαιότητά και αποδοτικότητά τους για εφαρμογή σε αυτόνομα συστήματα.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι εφαρμογές των αισθητήρων βάσει απόστασης, οπτικού πεδίου και χρησιμότητας.

	LiDAR	Radar	Camera	Ultrasonic	Passive Visual Infrared
Proximity Detection	2	4	2	5	3
Range	4	4	5	1	5
Resolution	4	3	4	2	5
Works in dark	5	5	2	5	1
Works in bright sun	5	5	5	5	4
Works in inclement weather	3	5	1	5	2
Provides color and contrast	1	1	5	1	5
Detects Speed	4	5	5	1	1
Sensor Size	1	5	5	5	5
Sensor Cost	1	5	5	5	5
Detect Depth	5	3	3	1	3

Heat map of Sensor applicability in Autonomous Vehicles
Data from MIT 6.S094: Deep Learning for Self-Driving Cars by Lex Fridman

Σχήμα 2 : Σύγκριση χαρακτηριστικών των αισθητήρων αυτόνομου οχήματος [12]



Εικόνα 4 : Εφαρμογές των αισθητήρων των αυτόνομων οχημάτων

2.3.3 Διαδίκτυο – Cloud

Το cloud μεταφράζεται ως ένα δυναμικό ηλεκτρονικό δίκτυο στο οποίο όλα τα αυτόνομα αυτοκίνητα μπορούν να διαμοιράσουν πληροφορίες. Παρέχει ένα χάρτη δεδομένων υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο και οι συσκευές με τις οποίες το πετυχαίνει είναι οι V2V και V2X ή V2I, δηλαδή vehicle-to-vehicle και vehicle-to-everything ή vehicle-to-infrastructure αντίστοιχα.

2.3.3.1 V2V/V2X

Οι επικοινωνίες V2V είναι τεχνολογίες αποφυγής εμποδίων οι οποίες βασίζονται στην άμεση επικοινωνία και διάδοση πληροφοριών μεταξύ πολλαπλών οχημάτων για να προειδοποιήσει ενδεχομένως τους οδηγούς για επικίνδυνες καταστάσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε συντριβή. Για παράδειγμα, το V2V θα μπορούσε να προειδοποιήσει τον οδηγό ότι ένα προπορευόμενο όχημα φρενάρει και πρέπει να επιβραδύνει ή να τον ενημερώσει ότι δεν είναι ασφαλές να προχωρήσει σε μια διασταύρωση, επειδή ένα άλλο αυτοκίνητο (ακόμα αόρατο από τον οδηγό) πλησιάζει γρήγορα. Η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας ένα εσωτερικό σχετικό δίκτυο που διασυνδέει τα γειτνιάζοντα οχήματα, είτε χρησιμοποιώντας το GPS.

Η εμβέλεια των συστημάτων V2V φτάνει μέχρι και τα 300 μέτρα υπερεισχύοντας των δυνατοτήτων των αισθητήρων του αυτόνομου οχήματος. Επίσης η επικοινωνία V2V επιτρέπει στα οχήματα να «βλέπουν» πίσω από γωνίες ή διαμέσου άλλων οχημάτων,

επιτρέποντάς τους έτσι να ανιχνεύουν μια απειλή πολύ γρηγορότερα από τα υπόλοιπα συστήματα.

Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων χαρακτηρίζεται συνήθως είτε ως single hop είτε ως multihop. Το single hop είναι η επικοινωνία μεταξύ γειτονικών οχημάτων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επικοινωνία οχημάτων σε σειριακή μορφή, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεχή αλυσίδα οχημάτων με δυνατότητα V2V. Για να ξεπεραστεί αυτή η απαίτηση, το multihop περιλαμβάνει την επικοινωνία πολλαπλών οχημάτων που χρησιμοποιούν ενδιάμεσους κόμβους ή επικοινωνία μεγαλύτερης εμβέλειας.

Έχουν διεξαχθεί έρευνες για την επίλυση του λανθάνοντος χρόνου και των περιορισμών εμβέλειας του multihop. Υψηλές ταχύτητες οχημάτων που προκαλούν μετατοπίσεις Doppler, διαταραχές θορύβου αστικού σήματος και εγγενείς παρεμβολές στην κυκλοφορία έχουν περιορισμένες δυνατότητες εμβέλειας. Μετά από δοκιμές, το δίκτυο IEEE 802.11b το οποίο θα αναλύσουμε στη συνέχεια, με λειτουργία στα 2.4 GHz φαίνεται να επιφέρει τα πιο ακριβή αποτελέσματα για V2V και V2I με εμβέλεια έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα. Ωστόσο, αυτό απαιτεί ευρεία αποδοχή της αγοράς για το V2V. Χωρίς ευρεία αποδοχή της αγοράς, η τεχνολογία θα παράσχει ακανόνιστα δεδομένα μέχρις ότου ένα άλλο αυτοκίνητο ικανό για V2V να βρίσκεται εντός εμβέλειας. Το V2I αντιμετωπίζει παρόμοιους περιορισμούς, αλλά έχει και την πρόσθετη απαίτηση δημιουργίας της κατάλληλης υποδομής. Αυτό απαιτεί μεγάλη κυβερνητική στήριξη και ανάπτυξη συστημάτων του οδικού δικτύου. Με άλλα λόγια, για να είναι αυτά τα συστήματα αποδοτικά και πλήρως εκμεταλλεύσιμα από το οδικό δίκτυο, απαιτούνται ριζικές αλλαγές στα μέχρι τώρα δεδομένα για τη λειτουργία των συγκοινωνιών μας.

Παρόλο που οι τεχνολογίες αυτές αντιμετωπίζουν σημαντικά εμπόδια για την καθολική τους υλοποίηση, τα οφέλη χρήσης αυτών των συστημάτων αυξάνουν την ασφάλεια των οχημάτων βελτιώνοντας τους ακόλουθους παράγοντες:

- (1) Απόκριση σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης: Συνδέοντας τα οχήματα και την υποδομή, μειώνουμε τους χρόνους απόκρισης καθώς όλοι οι οδηγοί ενημερώνονται για την προσέγγιση οχημάτων έκτακτης ανάγκης. Επίσης, αυτό μπορεί να επιφέρει ταχύτερους χρόνους προειδοποίησης για ατυχήματα οχημάτων.
- (2) Ροή κυκλοφορίας: Με τη σύνδεση των οχημάτων, η κυκλοφοριακή συμφόρηση μπορεί να βελτιστοποιηθεί συνδυάζοντας την ταχύτητα του οχήματος και την

πέδηση. Αυτό θα εφαρμοζόταν με την ιδέα των οχημάτων platoon². Αυτή η ιδέα βελτιώνει δραματικά τις συνθήκες κυκλοφορίας, φέροντας σε σχηματισμό platoon πολλά οχήματα που βρίσκονται πολύ πίσω από το ένα από το άλλο, υλοποιώντας αλληλοεξαρτώμενες, βάσει επικοινωνίας, ταχύτητες, πέδηση, επιτάχυνση και κατεύθυνση. Καθώς το όχημα συγχωνεύεται ή / και εξέρχεται από το platoon, τα διάφορα οχήματα θα μπορούν να βελτιστοποιούν μέσω πρόβλεψης τη ροή κυκλοφορίας. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει τη ροή της κυκλοφορίας, αλλά μειώνει επίσης δραστικά την οπισθέλκουσα δύναμη (αντίσταση) των οχημάτων αφού αυτά στοιχίζονται βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του οχήματος και την οικονομία καυσίμου. Στοιχισι είναι η τεχνική που ένα όχημα ακολουθεί ένα άλλο προπορευόμενο, αρκετά κοντά έτσι ώστε να μειώσει την οπισθέλκουσα δύναμη εκμεταλλεύοντας την ολίσθηση του ανέμου στην επιφάνεια του προπορευόμενου οχήματος.

- (3) Αποφυγή εμποδίων: Με το που αναγνωριστεί ένα εμπόδιο, αυτή η πληροφορία μεταβιβάζεται στα υπόλοιπα κοντινά οχήματα. Αυτό μπορεί να είναι οτιδήποτε όπως κατασκευή του δρόμου, τροχαία ατυχήματα, τρύπες, ολισθηροί δρόμοι κτλ. Έτσι το σύστημα προτείνει εναλλακτικές διαδρομές στους οδηγούς προλαβαίνοντας ατυχήματα. Σε συνδυασμό με το παραπάνω παράδειγμα ροής κυκλοφορίας, αυτό θα αυτοματοποιούσε το σύστημα κατεύθυνσης και πέδησης για να υποβοηθήσει τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης να επαναυπολογίζουν αυτόματα τη διαδρομή τους.

Παρόλο που υπάρχουν πολλά περισσότερα πλεονεκτήματα πέρα από την πιο πάνω λίστα με την εφαρμογή των V2V και V2I, οι τρέχουσες υποδομές και τεχνολογίες οχημάτων απαιτούν μεγάλα κόστη για την υλοποίησή τους. Καθώς μειώνεται το κόστος των τεχνολογιών, ίσως αυτό να έχει δυναμική εφαρμογή στο μέλλον.

Μέσω αυτών των συσκευών τα οχήματα επικοινωνούν με τα άλλα οχήματα και με το περιβάλλον, δηλαδή φώτα/σήματα τροχαίας πεζούς κτλ για τη δημιουργία του χάρτη δεδομένων. Το cloud περιλαμβάνει από τη διαδρομή του οχήματος, την ταχύτητά του, την απόδοσή του, τη φθορά των εξαρτημάτων του, μέχρι και την κατάσταση του δρόμου, την κυκλοφοριακή συμφόρηση ή κλειστούς δρόμους. Έτσι, η επεξεργασία των πληροφοριών δίνει μια εποπτική εικόνα του περιβάλλοντος του οχήματος.

Το cloud δεδομένων είναι η τελευταία εξέλιξη στην τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων και στο παρόν στάδιο βρίσκει εφαρμογή μόνο σε δοκιμασίες πρωτοτύπων, αφού η ακρίβειά

² Η λέξη platoon μεταφράζεται ως φάλαγγα, ωστόσο η ελληνική μετάφραση δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική σημασία της. Για το σκοπό αυτό, στο έγγραφο θα χρησιμοποιείται η αγγλική ορολογία.

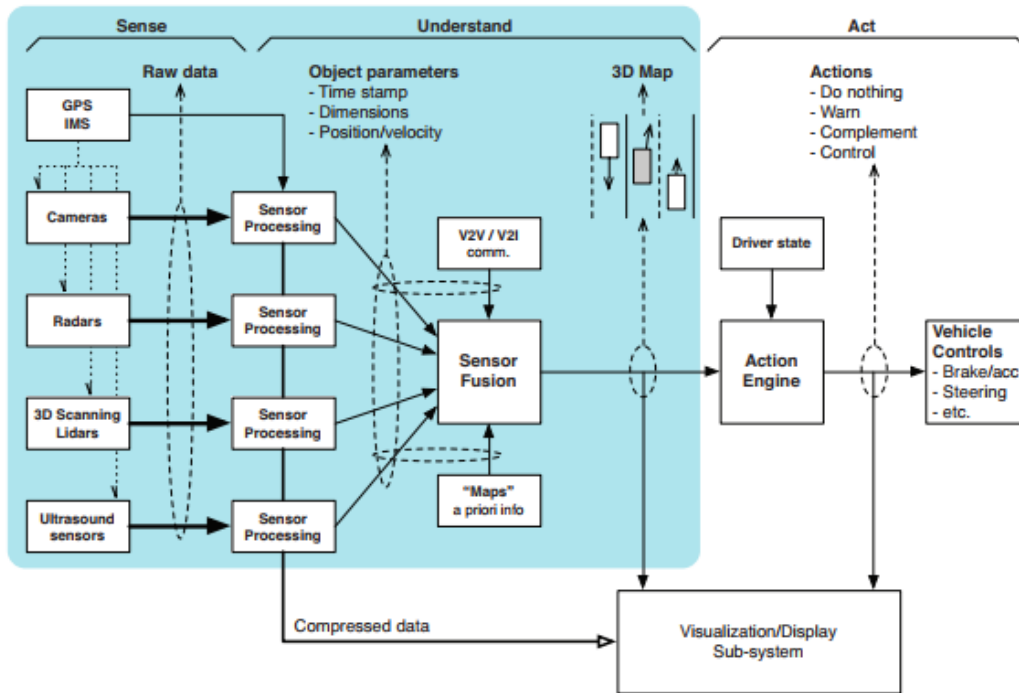
του εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Είναι το μοναδικό μέσο λειτουργίας του οχήματος που παρέχει πληροφορίες για εμβέλεια μεγαλύτερη των 250 μέτρων και επιτρέπει στο όχημα να ανταποκριθεί καλύτερα σε ότι πρόκειται να ακολουθήσει - για παράδειγμα κυκλοφοριακή συμφόρηση - μειώνοντας έτσι την κατανάλωση και αυξάνοντας την ασφάλεια.

2.3.4 Εκτέλεση ενεργειών

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες πλοήγησης και δημιουργίας εικόνας του περιβάλλοντος του οχήματος επεξεργάζονται ώστε να μεταφραστούν σε μια γλώσσα που θα αναγνωρίζει το σύστημα λήψης αποφάσεων έτσι ώστε με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης να αντιδρούν με ασφάλεια σε διάφορες καταστάσεις οδήγησης. Έτσι τα πιο πάνω πλαίσιαώνονται από συσκευές που επισφραγίζουν την αυτονομία του οχήματος:

- Αναλογικό front-end (AFE): Αισθητήρας μετατροπής των πραγματικών δεδομένων από αναλογικά σε ψηφιακά.
- Ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC): Για επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.
- Επεξεργαστές (CPU): Για ανάλυση των δεδομένων των αισθητήρων, επεξεργασία τους και εν τέλει λήψη αποφάσεων.
- Ελεγκτές (MCU): Χρησιμοποιείται για ενεργοποίηση και έλεγχο μηχανικών λειτουργιών όπως τα φρένα, οδήγηση τιμονιού κ.α.
- Συσκευές διαχείρισης ενέργειας

Η λειτουργική απεικόνιση της ροής των δεδομένων του συστήματος αισθητήρων και ελέγχου σε ένα αυτόνομο όχημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3 : Λειτουργική απεικόνιση των αισθητήρων και επενεργητών ενός αυτόνομου οχήματος

2.4 Τεχνητή νοημοσύνη στα αυτόνομα συστήματα

Η τεχνητή νοημοσύνη είναι ο κινητήριος μοχλός που οδηγεί την αυτοκινητιστική βιομηχανία σε επίπεδα 4 και 5 της αυτονομίας [13]. Η τεχνητή νοημοσύνη υπήρχε ως ορολογία και μεθοδολογία από το 1955, ωστόσο στο παρόν γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων που είναι διαθέσιμα. Με τη διασύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών και υπηρεσιών είμαστε σε θέση να συλλέγουμε δεδομένα ενισχύοντας την επανάσταση τεχνητής νοημοσύνης.

Εν ολίγης, η τεχνητή νοημοσύνη είναι η ικανότητα μιας μηχανής να μιμείται τη νόηση και τη γνωστική λειτουργία του ανθρώπου και γι' αυτό το λόγο έχει γίνει ένα αναπόσπαστο κομμάτι της τεχνολογίας αυτόματης οδήγησης.

Σύμφωνα με έρευνα [14] έχει υπολογιστεί ότι η αξία της έρευνας για την τεχνητή νοημοσύνη στα αυτόνομα οχήματα θα φτάσει μέχρι και 11 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025 με ρυθμό ετήσιας αύξησης 38.5%. Τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης θα γίνουν κανόνας στα νέα οχήματα και συγκεκριμένα στις πιο κάτω κατηγορίες:

- Συστήματα διασύνδεσης και αλληλεπίδρασης ανθρώπου με μηχανή για ψυχαγωγία όπως η αναγνώριση ομιλίας, χειρονομίας, παρακολούθηση οφθαλμών, οδηγού, εικονική βοήθεια κ.α.

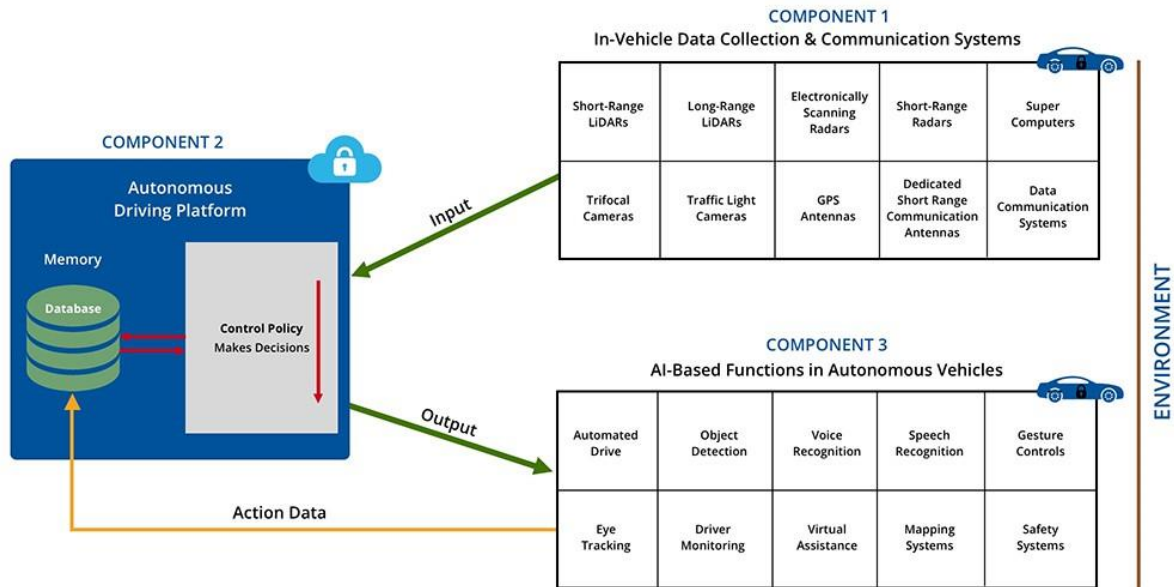
- Προηγμένα συστήματα υποστήριξης οδηγού (ADAS) συμπεριλαμβανομένων συστημάτων μηχανικής όρασης, μονάδων ανίχνευσης ραντάρ, μονάδων ελέγχου κινητήρων σύντηξης (ECU) κ.α.

Ο τρόπος που λειτουργούν τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης εμπνέεται από τη λειτουργία του νευρωνικού δικτύου του ανθρώπινου εγκεφάλου. Συγκεκριμένα από την ανθρώπινη αντίληψη κατά την οδήγηση που βασίζεται στη λειτουργία των αισθήσεων όπως όραση, και ακοή για εκτίμηση της κατάστασης του δρόμου. Οι στιγμιαίες αποφάσεις που καλείται να λάβει ο άνθρωπος ως αντίδραση του τι συμβαίνει στο δρόμο στηρίζονται στη μνήμη του. Η πολύχρονη εμπειρία που αποκτά ο άνθρωπος για τη διεκπεραίωση συγκεκριμένων ενεργειών όπως είναι η οδήγηση, του επέτρεψε να αναγνωρίζει τις λεπτομέρειες που αντιμετωπίζει στο δρόμο όπως μια μικρή λακούβα στο δρόμο, μια καλύτερη διαδρομή για τη δουλειά του ως προς θέμα κυκλοφοριακής συμφόρησης ή η εκτίμηση του αν ένας πεζός θα διασταυρώσει ή όχι. Αυτές οι λεπτομέρειες είναι που τελικά διαμορφώνουν την αντίληψη του οδηγού για να πάρει την ορθότερη διαδοχή ενεργειών για να αντιμετωπίσει μία κατάσταση.

Ο σκοπός των αυτόνομων οχημάτων είναι να λειτουργούν χωρίς οδηγό και να το κάνουν όπως και οι άνθρωποι. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να παρέχουμε σε αυτά τα οχήματα τις λειτουργίες των αισθήσεων, τις γνωστικές λειτουργίες όπως μνήμη, λογική σκέψη, λήψη αποφάσεων και μάθησης αλλά και τις εκτελεστικές ικανότητες που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι κατά την οδήγηση. Η αυτοκινητοβιομηχανία εξελίσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια προς επίτευξη αυτού του στόχου.

Έτσι τα αυτόνομα οχήματα εξοπλίζονται με τους αισθητήρες και τα συστήματα επικοινωνίας που προαναφέρθηκαν τα οποία παρέχουν στο όχημα μεγάλο όγκο δεδομένων ως είσοδο στα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης. Αυτά με τη σειρά τους αναλύουν τα δεδομένα, επιτρέποντας στα οχήματα να βλέπουν, να ακούν, να σκέφτονται και εν τέλει να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με μια κατάσταση στο δρόμο, ακριβώς όπως γίνεται με τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου.

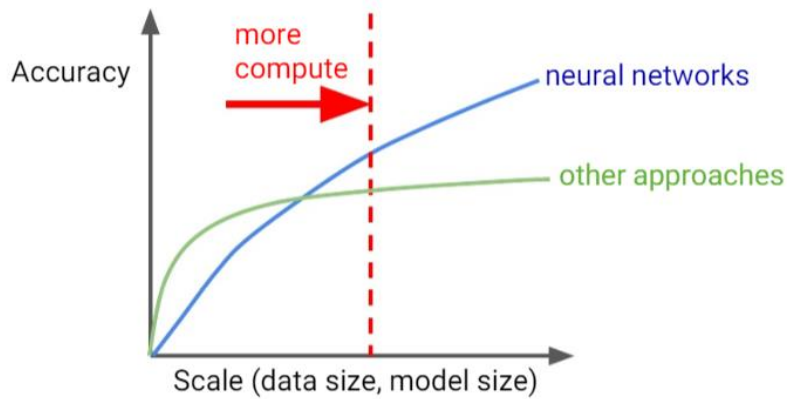
Ένας επαναλαμβανόμενος κύκλος, που ονομάζεται Κύκλος Δράσης Αντίληψης, δημιουργείται όταν το αυτόνομο όχημα παράγει δεδομένα από το περιβάλλον του και τα τροφοδοτεί σε ένα ευφυή σύστημα, το οποίο με τη σειρά του λαμβάνει αποφάσεις και επιτρέπει στο αυτόνομο όχημα να εκτελεί συγκεκριμένες ενέργειες στο ίδιο περιβάλλον. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τη ροή δεδομένων σε αυτόνομα οχήματα:



Εικόνα 5 : Ροή δεδομένων στα αυτόνομα οχήματα

Έχει αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο ένα αυτόνομο όχημα παράγει δεδομένα με χρήση των αισθητήρων. Επίσης, το cloud δρα ως η μνήμη του αυτόνομου οχήματος που αποθηκεύει τα προσωρινά ερεθίσματα του περιβάλλοντος ή μακροπρόθεσμα τις πληροφορίες που αφορούν την πλοήγησή του. Η μνήμη βοηθά το σύστημα λήψης αποφάσεων ως προς την κατεύθυνση που πρέπει να ακολουθήσει για να αντιμετωπίσει μία κατάσταση. Βάσει των αποφάσεων που λήφθηκαν, το αυτόνομο όχημα είναι σε θέση να αναγνωρίζει αντικείμενα στο δρόμο ή να πλοηγείται μέσα στην κίνηση χωρίς την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα φτάνοντας ασφαλή στον προορισμό του. Οι εμπειρίες οδήγησης που δημιουργούνται από κάθε διαδρομή, καταγράφονται και αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων, εξυπηρετώντας την υποβοήθηση των συστημάτων λήψης αποφάσεων τεχνητής νοημοσύνης για πιο ακριβείς μελλοντικές αποφάσεις.

Ο κύκλος δράσης αντίληψης εκτελείται επανειλημμένα. Όσο περισσότερες φορές εκτελεστεί ο κύκλος, τόσο πιο ευφυή γίνεται το σύστημα με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια στη λήψη αποφάσεων, ειδικότερα σε σύνθετες καταστάσεις οδήγησης. Όσο περισσότερα είναι τα διασυνδεδεμένα οχήματα, τόσο περισσότερες εμπειρίες και αντιλήψεις οδήγησης καταγράφονται σε μια κοινή βάση δεδομένων επιτρέποντας στα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης να λαμβάνουν αποφάσεις που στηρίζονται σε δεδομένα παραγμένα από πολλά αυτόνομα οχήματα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δε χρειάζονται όλα τα αυτόνομα οχήματα να περάσουν από μια σύνθετη και πολύπλοκη κατάσταση οδήγησης προκειμένου να την κατανοήσουν για τη λήψη της ορθότερης απόφασης.



Εικόνα 6 : Ακρίβεια νευρωνικών δικτύων στο παρόν

Η τεχνητή νοημοσύνη και συγκεκριμένα τα νευρωνικά δίκτυα και η βαθιά μάθηση (deep learning) έχουν γίνει απόλυτη ανάγκη προκειμένου τα αυτόνομα οχήματα να λειτουργούν σωστά και με ασφάλεια στο δρόμο αφού προσφέρουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Έτσι η τεχνητή νοημοσύνη χαράζει το δρόμο για την επίτευξη του οράματος της πλήρους αυτοματοποίησης των δρόμων, στηριζόμενη σε ευφυή συστήματα που είναι ικανά να αντιδρούν και να λαμβάνουν αποφάσεις – ιδανικά – καλύτερα απ’ ότι ο άνθρωπος.

3

Ευφυή συστήματα μεταφορών (ITS)

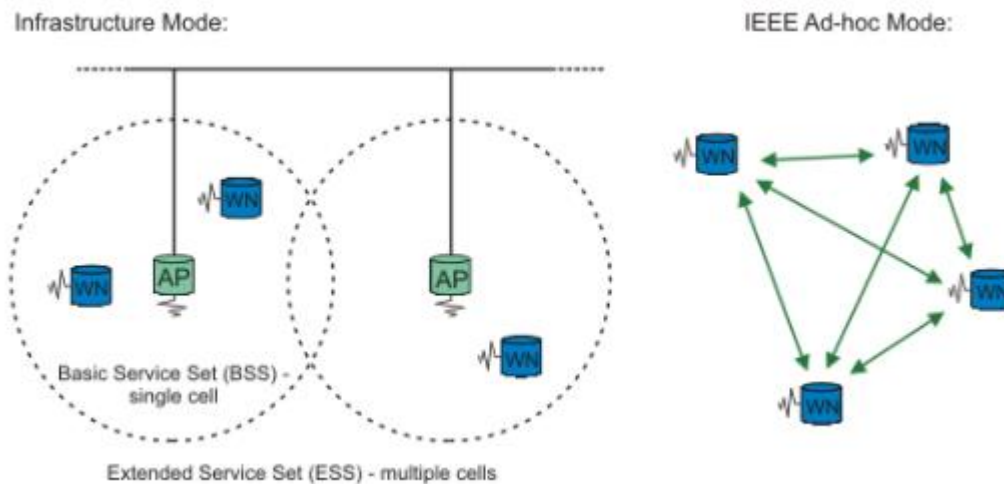
Ευφυή συστήματα μεταφορών (ITS) είναι η εφαρμογή τεχνολογιών αισθητήρων, ανάλυσης, ελέγχου και επικοινωνιών στις επίγειες μεταφορές προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια, η κινητικότητα και η αποδοτικότητα. Το ITS περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που επεξεργάζονται και μοιράζονται πληροφορίες για να διευκολύνουν τη συμφόρηση, να βελτιώσουν τη διαχείριση της κυκλοφορίας, να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να αυξήσουν τα οφέλη της μεταφοράς στους εμπορικούς χρήστες και το κοινό γενικότερα.

Το ITS, το οποίο είναι μέρος του Διαδίκτυου των πραγμάτων (IoT), περιλαμβάνει τεχνολογία V2V και V2I και ενσωματώνει τόσο ασύρματες όσο και καλωδιακές τεχνολογίες επικοινωνίας.

Οι επικοινωνίες V2V, για τις οποίες έγινε αναφορά πιο πάνω, αποτελούν ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο στους δρόμους. Τέτοια δίκτυα αναφέρονται επίσης ως ad hoc δίκτυα οχημάτων (VANET) [15]. Ένα δίκτυο VANET αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη πτυχή των κινητών δικτύων ad hoc (MANET), έτσι θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των MANET προκειμένου να κατανοήσουμε τη λειτουργικότητα των VANET. Ωστόσο, η γνώση της θεωρίας δικτύων αποτελεί προϋπόθεση πρώτου αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των MANET. Έτσι ακολουθεί μία σύνοψη της θεωρίας δικτύων.

3.1 Κινητό Ad hoc Δίκτυο (MANET)

Γενικά, υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που επιτρέπουν στις ασύρματες κινητές μονάδες να επικοινωνούν μεταξύ τους: κεντρικής υποδομής και ad hoc [16].



Εικόνα 7 : Τα δύο είδη MANET

Τα ad hoc δίκτυα μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: στατικά και κινητά. Σε στατικά ad hoc δίκτυα, η θέση ενός κόμβου ενδέχεται να μην αλλάξει μόλις γίνει μέρος του δικτύου. Στα δίκτυα κινητών ad hoc, τα συστήματα μπορούν να κινούνται αυθαίρετα.

Ένα δίκτυο MANET είναι ένα αυτόνομο σύστημα αποτελούμενο από κινητούς κόμβους διασυνδεδεμένους με ασύρματες στατικές ή δυναμικές συνδέσεις χωρίς τη διαχείριση κεντρικής υποδομής. Οι κινητοί κόμβοι μπορούν επίσης να αναλάβουν το ρόλο του δρομολογητή για την αναμετάδοση δεδομένων. Οι κόμβοι MANET είναι εξοπλισμένοι με ασύρματους πομπούς και δέκτες που χρησιμοποιούν κεραίες, οι οποίες μπορεί να είναι πολύ-κατευθυντικές (broadcast), δηλαδή προς όλες τις κατευθύνσεις ή μονο-κατευθυντικές (από σημείο σε σημείο). Το MANET είναι η βασική τεχνολογία για την ανάπτυξη δικτύου ad-hoc για οχήματα.

Ωστόσο τα δίκτυα MANET αντιμετωπίζουν περιορισμούς όπως,

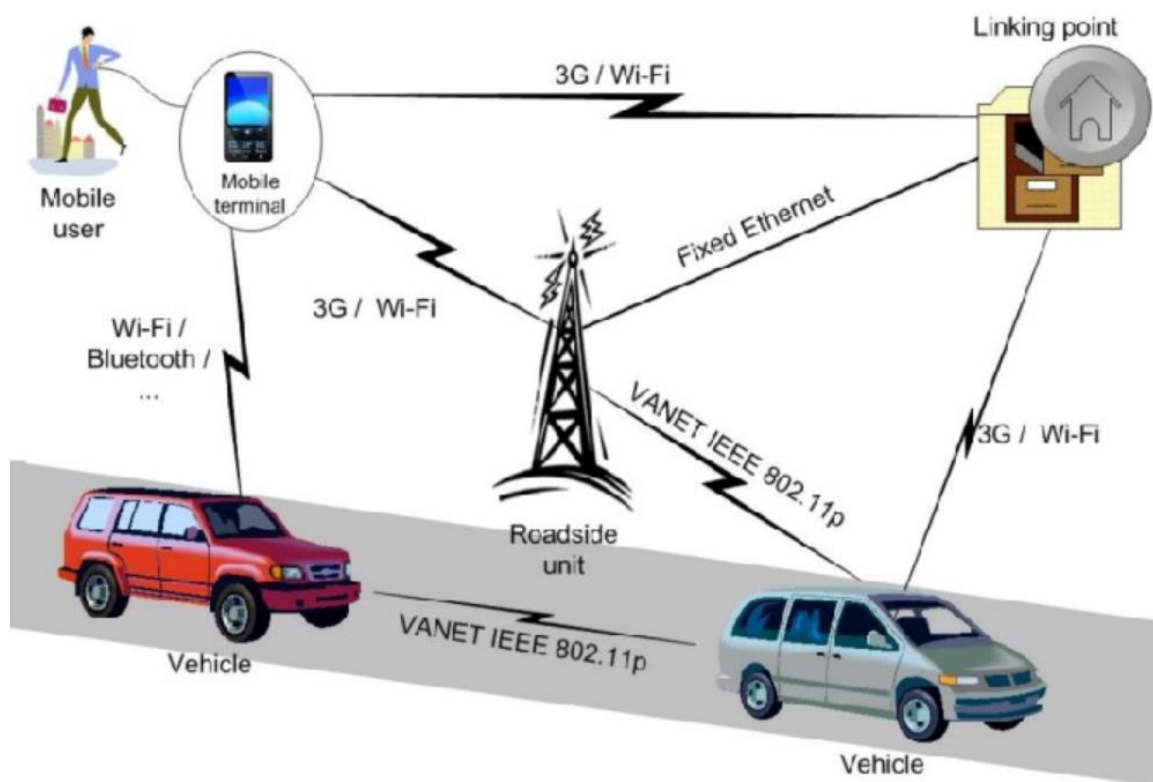
- Περιορισμοί εύρους ζώνης, διακυμάνσεις δυναμικού με αποτέλεσμα θόρυβο ή εξασθένιση σήματος ή ακόμη και παρεμβολές.
- Περιορισμένη δυνατότητα ισχύος και άρα επεξεργασίας ή αποθήκευσης
- Ευάλωτα σε θέματα ασφάλειας όπως υποκλοπή, πλαστογράφηση και επιθέσεις άρνησης εξυπηρέτησης.

Δεδομένου ότι η τοπολογία του δικτύου αλλάζει διαρκώς, το ζήτημα της δρομολόγησης πακέτων μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων καθίσταται δύσκολο έργο. Σε ένα δίκτυο

MANET, οι δρομολογητές μπορεί να είναι κινητοί και η διασύνδεση μεταξύ των υπολογιστών μπορεί να αλλάζει συχνά κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Το Διαδίκτυο διαθέτει μια οιονεί σταθερή υποδομή, όπου οι συσκευές τελικών χρηστών, όπως οι κεντρικοί υπολογιστές ή τα τηλέφωνα, συνδέονται σε αυτά τα δίκτυα σε σταθερές θέσεις, έτσι τους αποδίδονται διευθύνσεις με βάση την τοποθεσία τους, απλοποιώντας έτσι τη δρομολόγηση σε συστήματα διαδικτύου. Αυτό γίνεται με αναβαθμισμένα πακέτα πρωτοκόλλων δρομολόγησης πομπού – παραλήπτη ειδικά διαμορφωμένα για να αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις της δυναμικά μεταβαλλόμενης τοπολογίας για αυτά τα δίκτυα όπως το Mobile IPv6.

3.2 *Ad hoc Δίκτυο Οχημάτων (VANET)*

Μια ιδιαίτερη εκδοχή των δικτύων MANET είναι τα δίκτυα VANET στα οποία οι κόμβοι είναι τα ίδια τα οχήματα. Τα VANET επιτρέπουν την επικοινωνία V2V και V2I / V2X καθιστώντας τα έτσι απαραίτητα στις εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων [17].



Εικόνα 8 : Δίκτυο VANET

3.2.1 *Χρήσεις των VANET*

Τα δίκτυα VANET χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από την επιστημονική κοινότητα και την αυτοκινητοβιομηχανία λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για δημιουργία ευφυούς συστήματος

μεταφοράς. Πολλά σημαντικά έργα που αφορούν την ενδοεπικοινωνία οχημάτων βρίσκονται σε τροχιά υλοποίησης από διάφορες χώρες και πολυεθνικές εταιρίες παραγωγής οχημάτων όπως Daimler, Toyota, BMW κ.α. Μεταξύ άλλων, οι λόγοι χρήσης των δικτύων VANET είναι [18],

- Υποστήριξη οδηγού
 - Υποβοήθηση για τη στάθμευση
 - Θέσεις στάθμευσης
 - Πληροφορίες και τοποθεσίες εστιατορίων, σταθμών πετρελαίου κ.α.
- Υπηρεσίες ασφαλείας:
 - Προειδοποίηση σύγκρουσης ή κινδύνου
 - Πληροφορίες ροής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο
 - Μετεωρολογικές πληροφορίες
 - Οδικές πληροφορίες
 - Προνόμια οχημάτων έκτακτης ανάγκης
- Σύστημα πλοήγησης
- Εφαρμογές ψυχαγωγίας
 - Μουσική
 - Παιχνίδια
 - Ταινίες

3.2.2 Πλεονεκτήματα των δικτύων VANET

Τα δίκτυα VANETs παρουσιάζουν τους περιορισμούς που βρίσκονται στα δίκτυα MANETs, ωστόσο η χρήση τους στα αυτόματα οχήματα έχει εδραιωθεί λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους. Μερικά πλεονεκτήματα χρήσης των δικτύων VANET είναι,

- Δεδομένα όπως η γεωγραφική θέση, η απόσταση ή η μέση ταχύτητα μπορούν να μεταφερθούν στο σύστημα υποστήριξης μιας εταιρείας για να επιτρέψουν υπηρεσίες κινητής διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων, όπως η εφοδιαστική, οι ασφαλιστικές εταιρείες, οι υπηρεσίες "pay as you drive" κ.α.
- Οι οδηγοί αυτοκινήτων που έχουν πρόσβαση σε εξωτερικά δεδομένα ενδέχεται να ενδιαφέρονται να αξιοποιήσουν τα συστήματα των επιβατικών αυτοκινήτων τους ως συμβατικό χώρο εργασίας (πρόσβαση στη διαδικτυακή πύλη κάποιας εταιρείας, λήψη πληροφοριών κ.λπ.)

- Ένας υψηλός βαθμός διασύνδεσης των αυτοκινήτων με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, θα μπορούσε να καταστήσει τα οχήματα ως κόμβοι δικτύου που είναι σε θέση τόσο να προσφέρουν όσο και να καταναλώνουν υπηρεσίες διαδικτύου με απόλυτα αποκεντρωμένο τρόπο

3.2.3 Χαρακτηριστικά των δικτύων VANET

Στα VANETs, τα οχήματα επικοινωνούν μέσω ασύρματων συνδέσεων που είναι τοποθετημένοι σε κάθε όχημα – κόμβο. Κάθε κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί και ως συμμετέχων αλλά και ως δρομολογητής του δικτύου, καθώς οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω άλλων ενδιάμεσων κόμβων που βρίσκονται μέσα στην ακτίνα εμβέλειάς τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων VANET είναι,

- Ετερογενές εύρος επικοινωνίας
- Κίνηση των οχημάτων
- Γεωγραφικά περιορισμένη τοπολογία
- Χρονική μεταβολή της πυκνότητας των οχημάτων στο δίκτυο
- Αποσυνδεδεμένο δίκτυο
- Δυναμική τοπολογία
- Τα οχήματα είναι τα συστατικά μέρη που κατασκευάζουν το δίκτυο

Ο στόχος της αρχιτεκτονικής των VANET είναι να επιτρέψει τη σύνδεση μεταξύ οχημάτων ή μεταξύ οχημάτων και σταθερής οδικής μονάδας (RSU), δηλαδή σημείου πρόσβασης ασύρματου τοπικού δικτύου (LAN) παρέχοντας επικοινωνία με την κεντρική υποδομή, που οδηγεί στις ακόλουθες τρεις δυνατότητες:

- Δίκτυο V2V επιτρέποντας την άμεση επικοινωνία μεταξύ οχημάτων χωρίς να στηρίζεται σε σταθερή υποδομή υποστήριξης και μπορεί να χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές ασφάλειας και διάδοσης.
- Δίκτυο V2I επιτρέποντας σε ένα όχημα να επικοινωνεί με την οδική μονάδα RSU κυρίως για εφαρμογές πληροφόρησης και συλλογής δεδομένων.
- Υβριδική αρχιτεκτονική: συνδυάζει τόσο τις επικοινωνίες V2I όσο και τις V2V. Σε αυτό το σενάριο, ένα όχημα μπορεί να επικοινωνεί με την υποδομή του οδικού δικτύου είτε με single είτε με multi-hop τρόπο, ανάλογα με την απόσταση, δηλαδή εάν μπορεί ή όχι να έχει άμεση πρόσβαση στην οδική μονάδα RSU. Επιτρέπει τη σύνδεση μεγάλων αποστάσεων με το διαδίκτυο ή σύνδεση οχημάτων που βρίσκονται μακριά.

3.2.4 Προκλήσεις για τα δίκτυα VANET

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη των δικτύων VANET είναι

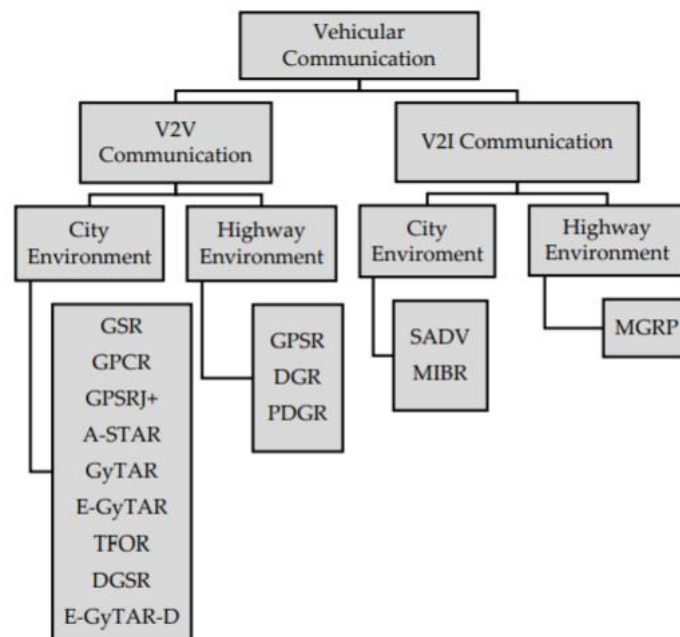
- Υψηλή κινητικότητα κόμβων: Συχνές αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Επικοινωνία υψηλής ταχύτητας σε πραγματικό χρόνο
- Ίδιο κανάλι για όλους τους κόμβους του δικτύου: Πολύ πυκνή συγκέντρωση δικτύων
- Αποκεντρωμένη φύση: Ανάγκη για νέες έννοιες συστημάτων και πρωτόκολλα διάδοσης πληροφοριών
- Νέες προσεγγίσεις για την ασφάλεια δεδομένων και επικοινωνιών: Αξιοπίστες και έμπιστες υπηρεσίες
- Χρειάζεται να αντιμετωπιστεί η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο υψηλής ταχύτητας ώστε να είναι δυνατή η προειδοποίηση σύγκρουσης ή η αυτόνομη οδήγηση οχημάτων
- Επεκτασιμότητα των πρωτοκόλλων: Μια σχετικά νέα προσέγγιση για τη βελτίωση της επεκτασιμότητας είναι η μείωση του αριθμού των προς μετάδοση μηνυμάτων με την αξιολόγηση της συνάφειας του περιεχομένου των αντίστοιχων μηνυμάτων. Εάν όλα τα οχήματα χρησιμοποιούν αυτή την προσέγγιση, η συνολική χρησιμότητα μπορεί να βελτιστοποιηθεί, οδηγώντας στη μέγιστη καθολική αξιοποίηση του δικτύου.
- Ασφάλεια
 - Η απλή εγκατάσταση μιας υποδομής δημόσιας δικλείδας (PKI), δηλαδή ενός συμβατικού κρυπτογραφικού μηχανισμού που είναι ένα κεντρικά οργανωμένο σύστημα εμπιστοσύνης, για την αύξηση της αξιοπιστίας δεν αρκεί. Απαιτείται πιστοποίηση, η οποία μπορεί να επικυρώσει και να ανακαλέσει άδειες χρήσης.
 - Πλαίσιο ασφάλειας LKN-ASF
 - Τόσο μια συμβατική προσέγγιση κατάταξης πιστοποιητικών ανάκλησης όσο και ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιεί άδειες επικύρωσης αποδείχθηκαν αρκετά αποτελεσματικά για τη διαχείριση αδειών σε κατανεμημένα περιβάλλοντα δικτύου.
 - Ασφαλής πρωτόκολλα δρομολόγησης
 - AODV
 - AODV-SEC

3.2.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης στα VANET

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης VANET μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες, πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα σε τοπολογία και πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει τοποθεσίας. Η δρομολόγηση βάσει της τοποθεσίας είναι γνωστή για την ευρωστία της όσον αφορά την επεκτασιμότητα του μεγέθους του δικτύου και επομένως αποτελεσματική για τα δίκτυα VANETs. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει τοποθεσίας χρησιμοποιούν τη γεωγραφική θέση του πομπού και του αποδέκτη για να εξασφαλίσουν την επικοινωνία μεταξύ τους. Κάθε κόμβος γνωρίζει τη θέση του μέσω του συστήματος GPS και μαθαίνει τη θέση των γειτνιαζόντων οχημάτων του δικτύου μέσω ανταλλαγής σημάτων. Η τοποθεσία του τελικού αποδέκτη βρίσκεται μέσω υπηρεσιών εντοπισμού θέσης. Εάν αυτή βρίσκεται εντός εμβέλειας τότε το σήμα αποστέλλεται απευθείας, ενώ αν βρίσκεται εκτός τότε το σήμα αναμεταδίδεται στους ενδιάμεσους κόμβους μέχρι να φτάσει στον αποδέκτη.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει τοποθεσίας αναπτύσσονται για περιβάλλοντα αυτοκινητόδρομου ή αστικά περιβάλλοντα. Το περιβάλλον αυτοκινητόδρομου περιέχει αρχιτεκτονική ευθύ δρόμου χωρίς εμπόδια. Το αστικό περιβάλλον περιέχει εμπόδια υπό τη μορφή κτιρίων, διασταυρώσεων και κατασκευών.

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει τοποθεσίας που σχεδιάστηκαν για V2V και V2I επικοινωνίες σε αστικό ή περιβάλλον αυτοκινητόδρομου [15]. Η ανάλυση των πρωτόκολλων ξεφεύγει από τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 9 : Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει τοποθεσίας για επικοινωνία στα ευφυή συστήματα μεταφορών

3.2.6 Ασφάλεια στα VANET

Τα δίκτυα VANET λόγω του δυναμικού και του συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος τους είναι αρκετά ευάλωτα, και για το λόγο αυτό δέχονται πολλές ειδικές επιθέσεις, συμπεριλαμβανομένων αλλά χωρίς να περιορίζονται στα ακόλουθα παραδείγματα:

- Πληροφορίες σχετικά με την κατάχρηση: Οι επιτιθέμενοι διαχέουν λανθασμένες πληροφορίες στο δίκτυο για να επηρεάσουν τη συμπεριφορά άλλων οδηγών (π.χ. για να εκτρέψουν την κυκλοφορία από έναν συγκεκριμένο δρόμο και έτσι να τον ελευθερώσουν).
- Εξαπάτηση με πληροφορίες αισθητήρων: Οι επιτιθέμενοι σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούν αυτή την επίθεση για να αλλάξουν την αντίληψή τους, την ταχύτητα, την κατεύθυνση κλπ., προκειμένου να αποφύγουν την ευθύνη, ιδίως σε περίπτωση ατυχήματος.
- Αναγνώριση ταυτότητας άλλων οχημάτων για την παρακολούθηση της θέσης τους. Αυτό είναι το σενάριο "Big Brother", όπου ένας καθολικός παρατηρητής μπορεί να παρακολουθεί τις τροχιές των στοχοθετημένων οχημάτων και να χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για διάφορους σκοπούς (π.χ. τον τρόπο με τον οποίο ορισμένες εταιρείες ενοικίασης αυτοκινήτων παρακολουθούν τα δικά τους αυτοκίνητα). Η διαχείριση ενός καθολικού παρατηρητή μπορεί να γίνει αξιοποιώντας την υποδομή του οδικού δικτύου ή τα οχήματα γύρω από τον στόχο του (π.χ. χρησιμοποιώντας έναν ιό που μολύνει τους γείτονες του στόχου και συλλέγει τα απαιτούμενα δεδομένα).
- Άρνηση παροχής υπηρεσιών: Ο επιτιθέμενος μπορεί να θέλει να μειώσει το VANET ή ακόμα και να προκαλέσει ατύχημα. Παραδείγματα επιθέσεων περιλαμβάνουν την παρεμπόδιση του καναλιού και την επιθετική έγχυση λανθασμένων μηνυμάτων.
- Μίμηση: Ο επιτιθέμενος προσποιείται ότι είναι ένα άλλο όχημα χρησιμοποιώντας ψευδείς ταυτότητες και μπορεί να παρακινηθεί από κακόβουλους ή ορθολογικούς στόχους.

Όπως προκύπτει από τα ανωτέρω, οι πτυχές ασφαλείας είναι οι πιο κρίσιμες προκλήσεις πριν εξαπλωθούν ευρέως τα VANET.

3.2.7 Πρότυπα των δικτύων VANET

Στα δίκτυα VANET υπάρχουν τρεις κατηγορίες προτύπων. Στο πρότυπο IEEE 802.11, το οποίο χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα ασύρματα δίκτυα, ανήκει μια νέα τροποποίηση, η

IEEE 802.11p, για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των δικτύων των οχημάτων. Αυτή η τροποποίηση ονομάζεται Ασύρματη πρόσβαση στο περιβάλλον οχημάτων, επίσης γνωστό ως WAVE και προορίζεται σε καθολική του παγκόσμια χρήση για την επικοινωνία οχημάτων.

Το WAVE είναι μόνο ένα μέρος μιας ομάδας προτύπων που σχετίζονται με όλα τα επίπεδα των πρωτοκόλλων για τις λειτουργίες V2V. Το πρότυπο IEEE 802.11p περιορίζεται από το πεδίο εφαρμογής του IEEE 802.11, το οποίο είναι αυστηρά πρότυπο επιπέδου MAC και PHY που προορίζεται να λειτουργήσει μέσα σε ένα ενιαίο κανάλι.

Όλες οι γνώσεις και οι πολυπλοκότητες που σχετίζονται με την λειτουργικότητα του V2V, καλύπτονται από τα πρότυπα IEEE 1609 της ανώτερης βαθμίδας. Προορίζεται να λειτουργεί με IEEE 802.11p.

Το τρίτο πρότυπο αναπτύσσεται από την Κοινότητα μηχανικών αυτοκινητοβιομηχανίας (SAE). Το πρότυπο SAE J2735 μπορεί να τοποθετηθεί στο επίπεδο εφαρμογής. Ορίζει πακέτα μηνυμάτων, πλαίσια δεδομένων και στοιχεία που χρησιμοποιούνται για ανταλλαγές ασφαλείας V2V και V2I.

3.2.7.1 Πρότυπο IEEE 802.11p

Τα συμβατικά ασύρματα LAN (WLAN) IEEE 802.11 (a, b, g, n) δεν είναι πραγματικά προσαρμοσμένα για χρήση σε δίκτυα με εξαιρετικά κινητούς κόμβους. Έτσι το πρότυπο IEEE 802.11p είναι το τυπικό σύστημα επικοινωνίας που αναπτύσσετε για αυτόνομα αυτοκίνητα. Η Ευρωπαϊκή Κοινοπραξία Επικοινωνίας Αυτοκινήτου συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία τυποποίησης του προτύπου επικοινωνίας IEEE 802.11p για αυτοκίνητα, η οποία είναι ισοδύναμη με τις τεχνολογίες Dedicated Short Range Communications (DSRC) που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ

- 5.9 GHz
- Σχέδιο διαμόρφωσης Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM): Το OFDM διαιρεί μια ροή δεδομένων εισόδου σε ένα σύνολο παράλληλων ροών bit και στη συνέχεια κάθε ροή δυαδικών ψηφίων χαρτογραφείται σε ένα σύνολο επικαλυπτόμενων ορθογώνιων υποφορέων για διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση δεδομένων.
- Το πρότυπο IEEE 802.11e ορίζει μηχανισμούς QoS για την τρέχουσα τεχνολογία WLAN
- Για υπηρεσίες με συγκεκριμένους περιορισμούς ποιότητας ή χρόνου, καθώς και για πολύ μεγάλα δίκτυα (>500 κόμβους), αυτή η τεχνολογία δεν εφαρμόζεται χωρίς τροποποίηση.

- Περιγράφει τις λειτουργίες και τις υπηρεσίες που απαιτούνται από τους σταθμούς που είναι συμβατοί με το WAVE για να λειτουργούν σε ένα ταχέως μεταβαλλόμενο περιβάλλον και να ανταλλάσσουν μηνύματα χωρίς να χρειάζεται να συμμετέχουν σε ένα βασικό σύνολο υπηρεσιών (BSS), όπως συμβαίνει στην περίπτωση χρήσης της παραδοσιακής IEEE 802.11.
- Καθορίζει την τεχνική σηματοδότησης WAVE και τις λειτουργίες διασύνδεσης που ελέγχονται από το IEEE 802.11 MAC.

Το πρότυπο DSRC που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ πρόκειται για ένα σύνολο προτύπων και πρωτοκόλλων που δημιουργήθηκαν ειδικά για χρήση σε VANET που επιτρέπουν επικοινωνίες μικρής έως μεσαίας εμβέλειας τόσο σε σενάρια V2V όσο και V2I, για διάφορες εφαρμογές, όπως ασφάλεια, διαχείριση κυκλοφορίας και ψυχαγωγία. Αυξάνει την ασφάλεια της κυκλοφορίας μέσω συστημάτων αποφυγής σύγκρουσης σε επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων. Σε τέτοιες εφαρμογές τα οχήματα μεταδίδουν περιοδικά μηνύματα που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία και την κινητικότητα, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση. Στη συνέχεια τα οχήματα γνωρίζουν την παρουσία άλλων οχημάτων στην περιοχή τους. Επομένως, κάθε όχημα μπορεί να υπολογίσει τις τροχιές των γύρω οχημάτων και τις πιθανές συγκρούσεις και μπορεί να προειδοποιήσει τον οδηγό αναλόγως. Το DSRC χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.11p επομένως τα χαρακτηριστικά του είναι,

- 5.9 GHz
- Σχέδιο διαμόρφωσης OFDM
- Εύρος καναλιού 10MHz: Το κανάλι ελέγχου (CCH) για επικοινωνίες ασφαλείας, δύο κανάλια για ειδική χρήση και τα υπόλοιπα είναι κανάλια εξυπηρέτησης (SCH) διαθέσιμα για ασφαλή ή μη, χρήση.

Άλλα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στην ασύρματη επικοινωνία των οχημάτων είναι τα GPRS/ UMTS και 3G το οποίο χρησιμεύει μόνο για V2I επικοινωνίες λόγω περιορισμών υψηλού κόστους από τους φορείς τηλεφωνίας καθιστώντας το ακατάλληλο για VANET.

3.2.7.2 Πρότυπο IEEE 1609

Η οικογένεια προτύπων IEEE 1609 ορίζει τα ακόλουθα μέρη:

- Αρχιτεκτονική
- Μοντέλο επικοινωνίας
- Δομή διαχείρισης
- Μηχανισμοί ασφαλείας και

- Φυσική πρόσβαση για ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας (<27 Mb / s), μικρής εμβέλειας (<1000m) και χαμηλής λανθάνουσας κατάστασης στο περιβάλλον οχημάτων.

Τα πρωταρχικά αρχιτεκτονικά στοιχεία που ορίζονται από αυτά τα πρότυπα είναι η μονάδα επί του οχήματος (OBU), η οδική μονάδα (RSU) και η διεπαφή WAVE.

Το πρότυπο IEEE 1609.3 καλύπτει τη ρύθμιση και τη διαχείριση της σύνδεσης WAVE. Το πρότυπο IEEE 1609.4 βρίσκεται ακριβώς πάνω από το IEEE 802.11p και επιτρέπει τη λειτουργία των ανώτερων επιπέδων OSI σε πολλαπλά κανάλια, χωρίς να απαιτείται γνώση των παραμέτρων PHY. Τα πρότυπα καθορίζουν επίσης τον τρόπο λειτουργίας των εφαρμογών που χρησιμοποιούν WAVE στο περιβάλλον WAVE. Παρέχουν επεκτάσεις στην πρόσβαση φυσικού καναλιού που ορίζονται στο WAVE.

3.2.7.3 Πρότυπο SAE J2735

Το τρίτο πρότυπο που σχετίζεται με την επικοινωνία των οχημάτων είναι το J2735, που καθορίζεται από την SAE. Αυτό το πρότυπο SAE καθορίζει ένα πακέτο μηνυμάτων, τα πλαίσια δεδομένων και στοιχεία δεδομένων του ειδικά για χρήση από εφαρμογές που προορίζονται για τη χρήση των συστημάτων επικοινωνίας (DSRC / WAVE). Το πεδίο εφαρμογής αυτού του προτύπου επικεντρώνεται στο πακέτο μηνυμάτων και στα πλαίσια δεδομένων του DSRC. Αυτό το πρότυπο καθορίζει επομένως την οριστική δομή μηνύματος και παρέχει επαρκείς πληροφορίες για την ορθή ερμηνεία των μηνυμάτων από την άποψη ενός προγραμματιστή που υλοποιεί τα μηνύματα σύμφωνα με τα πρότυπα της DSRC.

Τα πακέτα μηνυμάτων που καθορίζονται στο J2735 ορίζουν το περιεχόμενο μηνύματος που παρέχεται από το σύστημα επικοινωνίας στο επίπεδο εφαρμογής και ορίζει έτσι το περιεχόμενο του μηνύματος στο φυσικό επίπεδο OSI. Το πρότυπο J2735 εξαρτάται από τα κατώτερα στρώματα πρωτοκόλλων DSRC για την παράδοση των μηνυμάτων από εφαρμογές στο ένα άκρο του συστήματος επικοινωνίας (OBU του οχήματος) προς το άλλο άκρο (RSU). Τα κατώτερα στρώματα αναλαμβάνονται από το IEEE 802.11p και τα πρωτόκολλα του ανώτερου στρώματος καλύπτονται από τη σειρά προτύπων IEEE 1609.x.

Το πακέτο μηνυμάτων περιέχει:

- 15 Μηνύματα
- 72 πλαίσια δεδομένων
- 146 Στοιχεία Δεδομένων
- 11 καταχωρήσεις εξωτερικών δεδομένων

Ο σημαντικότερος τύπος μηνύματος είναι το βασικό μήνυμα ασφαλείας – συχνά ανεπίσημα ονομάζεται μήνυμα "καρδιακός παλμός" επειδή ανταλλάσσεται συνεχώς με κοντινά οχήματα.

Η συχνή μετάδοση μηνυμάτων "καρδιακού παλμού" επεκτείνει τις πληροφορίες του οχήματος σχετικά με τα κοντινά οχήματα που περιέχουν αυτόνομους αισθητήρες οχημάτων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Προσωρινή ταυτότητα
- Χρόνος
- Γεωγραφικό πλάτος
- Γεωγραφικό μήκος
- Ανύψωση
- Ακρίβεια θέσης
- Ταχύτητα και μετάδοση
- Ονομασία
- Επιτάχυνση
- Γωνία τιμονιού
- Κατάσταση συστήματος φρένων
- Μέγεθος οχήματος

Τα άλλα είδη μηνυμάτων είναι τα εξής:

- Μήνυμα A la carte: αποτελείται αποκλειστικά από στοιχεία μηνύματος που καθορίζει ο αποστολέας, επιτρέποντας ευέλικτη ανταλλαγή δεδομένων.
- Μήνυμα έκτακτης ανάγκης: χρησιμοποιείται για τη μετάδοση προειδοποιήσεων στα γύρω οχήματα που λειτουργεί ένα όχημα έκτακτης ανάγκης στην περιοχή.
- Γενικό μήνυμα μεταφοράς: παρέχει ένα βασικό μέσο για την ανταλλαγή δεδομένων σε όλη τη διεπαφή οχήματος-δρόμου.
- Αναγνωριστικό δεδομένων οχημάτων ανίχνευσης: περιέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του οχήματος για τις εφαρμογές που εξετάζουν τις συνθήκες μετακίνησης στο δρόμο.
- Κοινό μήνυμα ασφάλειας: χρησιμοποιείται όταν ένα όχημα που συμμετέχει στην ανταλλαγή του βασικού μηνύματος ασφαλείας μπορεί να υποβάλει συγκεκριμένα αιτήματα σε άλλα οχήματα για πρόσθετες πληροφορίες που απαιτούνται από εφαρμογές ασφαλείας.

Τα συστήματα επικοινωνίας οχημάτων είναι ένα αναδυόμενο είδος δικτύων στα οποία τα οχήματα και οι οδικές μονάδες είναι οι κόμβοι επικοινωνίας παρέχοντας το ένα στο άλλο πληροφορίες που σχετίζονται με την ασφάλεια, κινδύνους ή κατάσταση κυκλοφορίας. Τα αυτόνομα οχήματα εξοπλισμένα με συστήματα επικοινωνίας μπορεί να είναι

αποτελεσματικότερα στην αποφυγή ατυχημάτων και καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης.

4

Τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων

4.1 Προηγούμενες αντίστοιχες έρευνες

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οδηγών ήταν ανέκαθεν ο τρόπος επικοινωνίας των οχημάτων. Στη μελλοντική πραγματικότητα ωστόσο των αυτόνομων οχημάτων, και ιδιαίτερα στην περίοδο ταυτόχρονης συνύπαρξης οδηγών με αυτόνομα οχήματα, μια περίοδος που εκτιμάται θα κρατήσει πάνω από 25 χρόνια, η επικοινωνία μεταξύ αυτόνομων οχημάτων με ανθρώπινους οδηγούς αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα [19], [20].

Πέραν της τεχνολογικής προόδου, η ανάπτυξη της τεχνολογίας εξαρτάται από τη ζήτηση των καταναλωτών: την προθυμία των επιβατών να πληρώσουν για αυτόνομη μετακίνηση. Έρευνες δείχνουν σημαντικές ανησυχίες σχετικά με την αυτονομία της ιδιωτικής ζωής και την ασφάλεια των οχημάτων [21] και μέχρι να αποδειχθούν αξιόπιστα σε όλες τις συνθήκες, πολλοί επιβάτες θα έχουν το «άγχος της πρόσβασης», δηλαδή ότι το όχημά τους δεν μπορεί να φτάσει στους επιθυμητούς προορισμούς [22]. Αν και οι σημερινές τεχνολογίες επιτρέπουν την αυτόνομη λειτουργία του οχήματος σε περίπου 90% των συνθηκών, η επίτευξη 99% λειτουργικότητας, δηλαδή ότι τα οχήματα δεν μπορούν να φτάσουν περίπου το 1% των

επιθυμητών προορισμών ή περίπου 10 φορές το χρόνο για έναν τυπικό οδηγό, θα είναι εκθετικά δυσκολότερο, ενώ η επίτευξη 99.9% λειτουργικότητας φαντάζει άθλος της τεχνολογικής ανάπτυξης.

Τα προαναφερθέντα είναι η αιτία για την οποία, παρά την τεχνολογική ανάπτυξη των αυτόνομων συστημάτων, η αλληλεπίδραση της συνύπαρξης αυτόνομων οχημάτων και οδηγών είναι ένας τομέας στον οποίο αξίζει να δοθεί μεγάλη βαρύτητα. Οι οδηγοί δεν μπορούν να προβλέψουν τις ενέργειες του αυτόνομου οχήματος καθώς δεν συμπεριφέρονται σύμφωνα με τις προσδοκίες τους. Για την ασφαλή και αποδοτική ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, πρέπει να διασφαλιστεί ότι αυτά τα οχήματα μπορούν να αλληλεπιδράσουν με άλλους χρήστες του οδικού δικτύου με τρόπο διαισθητικό και προσδοκώμενο. Αυτό θα επιτρέψει και στους οδηγούς των οχημάτων αλλά και στους χρήστες των γειτνιαζόντων οχημάτων να συντονίζουν τις δράσεις τους αναλόγως [23].

Προς επίτευξη αυτού του στόχου, έχει μελετηθεί λεπτομερώς η αλληλεπίδραση οδηγών με πεζούς [24] , [25]. Χρησιμοποιώντας δεδομένα κυκλοφορίας που αφορούν την αλληλεπίδραση μεταξύ πεζών και συμβατικών οχημάτων εξήχθησαν αποτελέσματα που αφορούν το χρονοδιάγραμμα ενεργειών και τα μοτίβα που προηγούνται της απόφασης του πεζού να διασταυρώσει το δρόμο ή όχι. Τα δεδομένα προέρχονται είτε από παρατήρηση στο πεδίο είτε από βίντεο.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ οδηγών είτε σε κανονική ροή κυκλοφορίας [26] είτε σε διασταυρώσεις χωρίς σήμανση [27] έχει επίσης μελετηθεί εντατικά. Αποτελέσματα αυτών ήταν η απόσπαση πληροφοριών σχετικά με τη ροή αποφάσεων και η μοντελοποίηση τους με στόχο τη μαθηματική αναπαράσταση του προβλήματος.

Έρευνα της NHTSA έδειξε πως το 2010 οι συγκρούσεις σε διασταυρώσεις οφείλονταν σε ανεπαρκή προσοχή του οδηγού κατά 44.1% σε σύγκριση με το 7.3% σε κανονικό δρόμο [28]. Είναι λοιπόν φανερό ότι η αλληλεπίδραση οδηγών σε διασταύρωση χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Η ανάπτυξη των συστημάτων αυτόνομων οχημάτων κατέστησε επιτακτική τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης της συμπεριφοράς των οχημάτων, μέσω των οποίων προσομοιώνονται διάφορα σενάρια της κυκλοφορίας βάσει κάποιων μετρικών παραμέτρων όπως είναι η θέση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση, ο χρόνος μέχρι τη σύγκρουση (TTC) κ.α.

Αν και η προσομοίωση της οδικής κυκλοφορίας ξεκίνησε πριν από πολλές δεκαετίες, η συνεχής αύξηση του αριθμού των οχημάτων στο δρόμο και η ανάγκη για ανάπτυξη νέων υποδομών μεταφορών, καθώς και η αυξανόμενη συνάφεια των νέων τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε οχήματα, όπως το VANET, καθιστούν τους προσομοιωτές κυκλοφορίας ένα συνεχώς αναπτυσσόμενο ερευνητικό πεδίο.

Η ακριβής προσομοίωση ωστόσο, της συμπεριφοράς της κυκλοφορίας των οχημάτων στο δρόμο, απαιτεί λεπτομερή παρατήρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των οδηγών σε σενάρια πραγματικής κυκλοφορίας. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν ρητή επικοινωνία, όπως σήμα με τα μάτια, χειρονομίες ή σήματα οχημάτων, και πολλαπλά μέσα σιωπηρών μέσων, όπως η ταχύτητα προσέγγισης σε μια διασταύρωση, τα οποία χρησιμοποιούνται από τους οδηγούς για να επικοινωνούν και να προβλέπουν την πρόθεση ή / και να επηρεάζουν την συμπεριφορά του άλλου [29].

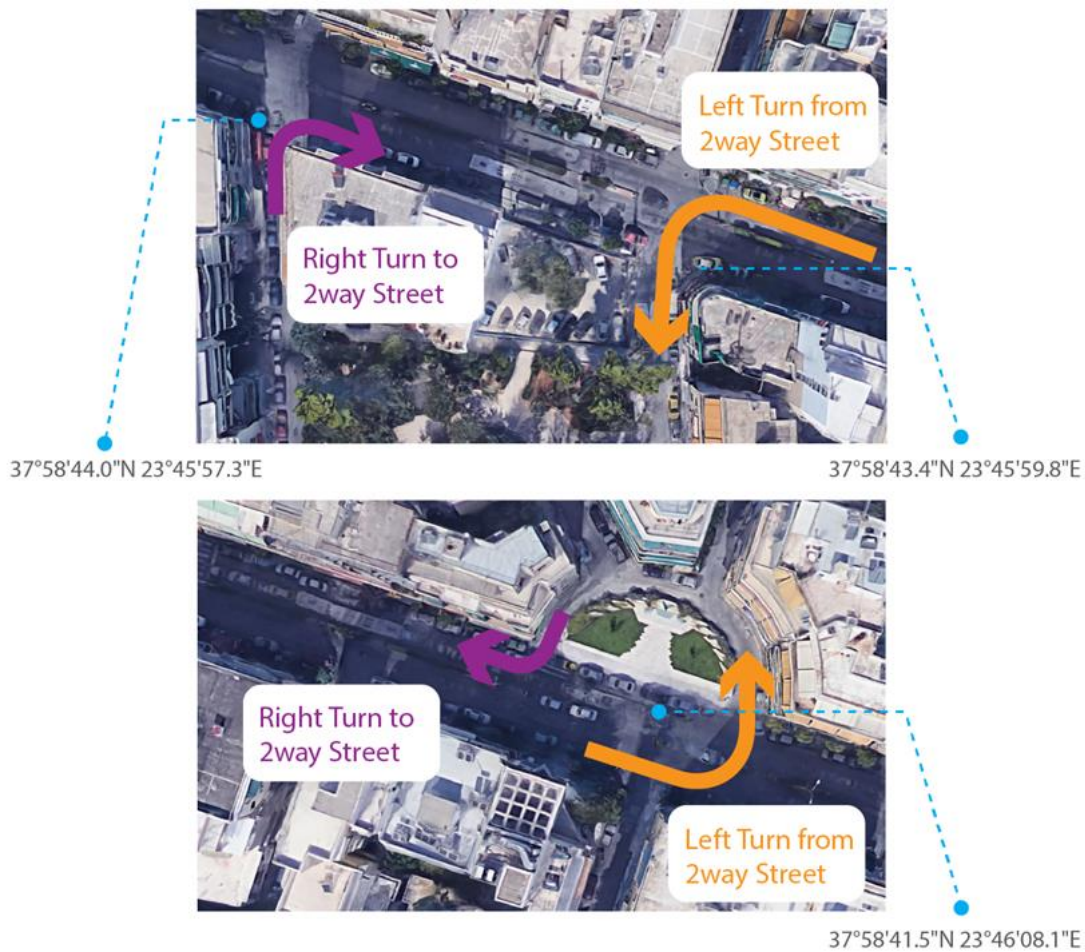
Έτσι, για σκοπούς εκπόνησης αυτής της εργασίας, παρατηρήθηκαν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οδηγών κατά την διεκπεραίωση στροφής σε διάφορα σενάρια διασταυρώσεων χωρίς σήμανση, προκειμένου να εξαχθούν οι άτυποι κανόνες που ισχύουν σε αυτές τις περιπτώσεις, για μετέπειτα σχεδιασμό και μοντελοποίηση των κατάλληλων στρατηγικών αλληλεπίδρασης σε ένα αυτόνομο όχημα.

5

Διαδικασία διεξαγωγής της μελέτης eye tracking αλληλεπίδρασης των οδηγών

5.1 Μεθοδολογία

Προκειμένου να παρακολουθήσουμε την αλληλεπίδραση των οδηγών των οχημάτων στις διασταυρώσεις, διεξήχθη μελέτη παρακολούθησης της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια βίντεο, συνοδευόμενη από σχόλια των ίδιων των οδηγών κατά και μετά την εκτέλεση της μελέτης.



Εικόνα 10 : Σενάρια στροφών στα οποία εξετάστηκε η αλληλεπίδραση των οδηγών

Συγκεκριμένα, ζητήθηκε από διάφορους οδηγούς να οδηγήσουν το δικό τους αυτοκίνητο σε μια προσχεδιασμένη συγκεκριμένη διαδρομή, σε μία αστική περιοχή της Αθήνας όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, καθώς το όλο πείραμα κινηματογραφούνταν μέσω γυαλιά παρακολούθησης των οφθαλμών των ματιών (eye tracking). Η διαδρομή είχε συνολικό μήκος 0.75 χιλιόμετρα και επαναλαμβανόταν 5 φορές από τον κάθε συμμετέχοντα οδηγό. Το συνολικό μήκος της διαδρομής ήταν 3.75 χιλιόμετρα και η μέση διάρκεια οδήγησης 18 λεπτά ανά συμμετέχοντα. Η διαδρομή συμπεριλάμβανε μεταξύ άλλων, αριστερή στροφή από δρόμο δύο λωρίδων σε πάροδο και δεξιά στροφή από πάροδο σε δρόμο δύο λωρίδων. Οι διασταυρώσεις ήταν χωρίς σήμανση, δηλαδή δε συνοδεύονταν από φώτα τροχαίας. Η διαδρομή επιλέχθηκε σε στρατηγικό σημείο, τέτοιο που η πυκνότητα και η ποικιλία διαφόρων οχημάτων, επομένως και αλληλεπιδράσεων, θα ήταν ικανοποιητική για την έρευνα μεγάλου εύρους περιπτώσεων. Στην Εικόνα 11 φαίνονται παραδείγματα παρακολούθησης της κυκλοφορίας της μελέτης που διεξήχθη.



Εικόνα 11 : Παραδείγματα βίντεο παρακολούθησης βλέμματος σε αριστερή στροφή από κύριο δρόμο προς πάροδο (αριστερά) και δεξιά στροφή από πάροδο σε κύριο δρόμο (δεξιά)

Επομένως τα χαρακτηριστικά της μελέτης των αλληλεπιδράσεων των οδηγών ήταν,

Χαρακτηριστικά μελέτης	
Μήκος μονής διαδρομής ανά οδηγό	0.75 km
Μήκος συνολικής διαδρομής ανά οδηγό	3.75km
Αριθμός επαναλήψεων διαδρομής ανά οδηγό	5
Μέση διάρκεια συνολικής διαδρομής ανά οδηγό	18min
Είδος διασταυρώσεων	Δεξιά / Αριστερή στροφή από / προς πάροδο σε / από κύριο δρόμο
Μέσο παρατήρησης	Γυαλιά eye tracking και σχόλια οδηγών κατά την παρακολούθηση των αντίστοιχων βίντεο
Αριθμός συμμετεχόντων	21
Μέση ηλικία συμμετεχόντων	39.1 χρόνια
Μέση εμπειρία οδήγησης	18.5 χρόνια
Τοποθεσία μελέτης	Περιοχή Ζωγράφου, Αθήνα, Ελλάδα

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά μελέτης αλληλεπίδρασης οδηγών

Στη συνέχεια αναλύθηκε η παρακολούθηση βλέμματος (eye gaze) των οδηγών στα βίντεο καθώς και τα σχόλιά τους, προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του συμμετέχοντα και άλλων οδηγών. Ως αρχή της αλληλεπίδρασης θεωρήθηκε η στιγμή κατά την οποία ο συμμετέχοντας

- χρειάστηκε να περιμένει για το κατάλληλο κενό στην ερχόμενη κυκλοφορία οχημάτων πρώτου στρίψει,
- ξεκίνησε να στρίβει γνωρίζοντας ότι τα ερχόμενα οχήματα θα μετέβαλλαν την κίνησή τους ανάλογα.

Σε κάθε αλληλεπίδραση, καταγράφονταν και κατηγοριοποιήθηκαν οι εξής παράμετροι:

- (1) το είδος της διασταύρωσης
- Αριστερή στροφή από κύριο δρόμο προς πάροδο
 - Αριστερή στροφή από πάροδο προς κύριο δρόμο
 - Δεξιά στροφή από πάροδο προς κύριο δρόμο
 - Στροφή από / προς μονόδρομο
 - Ευθύ τμήμα δρόμου

Η τελευταία κατηγορία «ευθύ τμήμα δρόμου» αποτελεί ειδική περίπτωση αλληλεπίδρασης κατά την οποία άλλοι οδηγοί διέκοπταν την ομαλή οδήγηση του συμμετέχοντα και της οποίας η μελέτη της θα επέφερε εξίσου ενδιαφέρον συμπεράσματα με τις άνωθεν κατηγορίες.

- (2) το είδος της κυκλοφορίας
- Με κίνηση
 - Χωρίς κίνηση
- (3) το είδος της παρεμπόδισης
- Στροφή μπροστά από τα ερχόμενα οχήματα
 - Στροφή πίσω και αφού περάσουν τα εμπλεκόμενα οχήματα
 - Άλλοι οδηγοί διέκοψαν την κανονική οδήγηση του συμμετέχοντα
- (4) Ο τύπος του άμεσα εμπλεκόμενου οχήματος
- Κανονικό επιβατικό αυτοκίνητο / Μεσαίου μεγέθους
 - Φορτηγό – Λεωφορείο / Μεγάλου μεγέθους
 - Μοτοσυκλέτα / Μικρού μεγέθους
 - Ταξί
- (5) το είδος των σημάτων αλληλεπίδρασης από τον συμμετέχοντα
- Χειρονομία / Νεύμα
 - Προβολείς οχήματος
 - Αλληλεπίδραση με τρίτο / έμμεσα εμπλεκόμενο άτομο
 - Εξώθηση
 - Ένδειξη φλας
 - Κίνηση οχήματος: Επιτάχυνση / Επιβράδυνση
 - Συνδυασμός των πιο πάνω
- (6) το είδος των σημάτων αλληλεπίδρασης από άλλους οδηγούς
- Χειρονομία / Νεύμα

- Προβολείς οχήματος
- Αλληλεπίδραση με τρίτο / έμμεσα εμπλεκόμενο άτομο
- Σήμα από τρίτο άτομο
- Εξώθηση
- Ένδειξη φλας
- Κίνηση οχήματος: Επιτάχυνση / Επιβράδυνση / Σταμάτημα
- Κόρνα
- Συνδυασμός των πιο πάνω

(7) Σχόλια οδηγών

Στη συνέχεια αναλύθηκε η ακολουθία των σημάτων / αλληλεπιδράσεων που προηγήθηκε μιας στροφής σε διασταύρωση, όπως φάνηκε από την παρατήρηση των βίντεο προκειμένου να μοντελοποιηθεί λεπτομερώς η συμπεριφορά των οδηγών σε μετέπειτα προσομοίωση της κυκλοφορίας.

6

Αποτελέσματα της μελέτης παρατήρησης αλληλεπίδρασης των οδηγών

Κατά την κατηγοριοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των οδηγών κρίθηκε εύλογος ο περιορισμός των ειδών που μπορεί να λάβει κάθε κατηγορία ανά περίπτωση ώστε να εξαχθούν μόνο επωφελή συμπεράσματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης. Επικεντρωθήκαμε στις περιπτώσεις αριστερής στροφής από κύριο δρόμο και δεξιάς στροφής σε κύριο δρόμο.

6.1 Ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης αλληλεπιδράσεων των οδηγών

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες αλληλεπιδράσεις, το είδος των εμπλεκόμενων οχημάτων και οι παρατηρούμενες αντιδράσεις από άλλους οδηγούς ανά ελιγμό.

Σε 146 από τις 188 παρατηρούμενες αριστερές στροφές και σε 126 από τις 179 παρατηρούμενες σωστές στροφές, ξεκίνησε μια αλληλεπίδραση από τους συμμετέχοντες. Σε 62 και 60 περιπτώσεις αντίστοιχα, ο άλλος οδηγός αντέδρασε. Σε 23 από τις 25 αλληλεπιδράσεις με οδηγούς μεγάλων οχημάτων, ο άλλος οδηγός αντέδρασε στην

αλληλεπίδραση που ξεκίνησε ο συμμετέχων. Μόνο 7 από τους 58 αναβάτες μοτοσυκλετών αντέδρασαν στην αλληλεπίδραση που ξεκίνησε ο συμμετέχων.

	Περιπτώσεις	Αλληλεπιδράσεις που ξεκίνησε ο συμμετέχων	Αντιδράσεις από άλλους οδηγούς
Αριστερή στροφή από κύριο δρόμο	188	146 (64 επιβατικά αυτοκίνητα, 36 ταξί, 16 μεγάλα οχήματα, 30 μοτοσυκλέτες)	62 (26 επιβατικά αυτοκίνητα, 18 ταξί, 14 μεγάλα οχήματα, 4 μοτοσυκλέτες)
Δεξιά στροφή σε κύριο δρόμο	179	126 (63 επιβατικά αυτοκίνητα, 26 ταξί, 9 μεγάλα οχήματα, 28 μοτοσυκλέτες)	60 (33 επιβατικά αυτοκίνητα, 15 ταξί, 9 μεγάλα οχήματα, 3 μοτοσυκλέτες)

Πίνακας 2 : Αλληλεπιδράσεις και αντιδράσεις μεταξύ των οδηγών ανά περίπτωση

Τα σήματα του συμμετέχον κατά την αλληλεπίδρασή του με άλλους οδηγούς φαίνονται στον Πίνακα 3. Το σήμα " Καμία παρατήρηση " αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου οι συμμετέχοντες ξεκίνησαν να στρίβουν γνωρίζοντας ότι οι άλλοι οδηγοί θα επιβράδυναν. Ένα αξιοπρόσεχτο σχόλιο ήταν: "Είμαι βέβαιος ότι με έχει δει, οπότε μπορώ να τολμήσω την κίνησή μου γιατί γνωρίζω ότι θα υποκύψει".

Η προβολή του συμμετέχοντα, η χρήση των προβολέων και η χειρονομία / νεύμα ακολουθήθηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις από αντιδράσεις των άλλων οδηγών όταν αυτά τα σήματα χρησιμοποιήθηκαν από τον συμμετέχοντα. Η ένδειξη φλας δεν ήταν τόσο αποτελεσματική, ειδικά για τις δεξιές στροφές, όταν ο ερχόμενος οδηγός που έρχεται από τα αριστερά, δεν μπορούσε να αντιληφθεί τον δεξιό δείκτη. Ένας συμμετέχοντας ανέφερε το έντονο βλέμμα του προς τους άλλους οδηγούς ως μέσο για να επιβάλει την πρόθεσή του για να πάρει προτεραιότητα.

	Αριστερή στροφή από κύριο δρόμο		Δεξιά στροφή σε κύριο δρόμο	
	Ο συμμετέχων ξεκίνησε την αλληλεπίδραση (N=146)	Ο συμμετέχων έστριψε μπροστά από τα εμπλεκόμενα οχήματα (N=62)	Ο συμμετέχων ξεκίνησε την αλληλεπίδραση (N=126)	Ο συμμετέχων έστριψε μπροστά από τα εμπλεκόμενα οχήματα (N=60)
Ένδειξη φλας	119	40	66	21
Ένδειξη φλας + Προβολή	17	17	10	10
Ένδειξη φλας + Προβολή + Προβολείς οχήματος	2	2		
Ένδειξη φλας + Χειρονομία / Νεύμα	1	1		
Ένδειξη φλας + Χειρονομία / Νεύμα + Προβολή	1	1		
Προβολή	1		18	12
Χειρονομία / Νεύμα			3	2
Καμία παρατήρηση	5	1	29	15

Πίνακας 3 : Σήματα από τον συμμετέχοντα

Τα σήματα των άλλων οδηγών κατά την αλληλεπίδρασή τους με το συμμετέχοντα φαίνονται στον Πίνακα 4. Η επιβράδυνση ή το σταμάτημα των άλλων οδηγών ακολουθούνταν πάντα από στροφή του συμμετέχοντα και είσοδος του στο δρόμο μπροστά από αυτούς. Το ίδιο ισχύει και όταν οι άλλοι οδηγοί έκαναν χειρονομία / νεύμα ή όταν χρησιμοποιούσαν την ένδειξη φλας. Τα σήματα από τους προβολείς των άλλων οχημάτων δεν οδηγούσαν πάντα στην είσοδο του συμμετέχοντα στο δρόμο μπροστά από αυτούς, οπότε η ερμηνεία αυτού του σήματος καθορίζεται κάθε φορά αναλόγως της περίπτωσης. Η κόρνα και η επιτάχυνση από τους άλλους οδηγούς δεν ακολουθήθηκαν από στροφή του συμμετέχοντα, έτσι θα μπορούσαν να ερμηνευτούν ως η πρόθεση του άλλου οδηγού να μην υποκύψει.

	Αριστερή στροφή από κύριο δρόμο	Δεξιά στροφή σε κύριο δρόμο
--	---------------------------------	-----------------------------

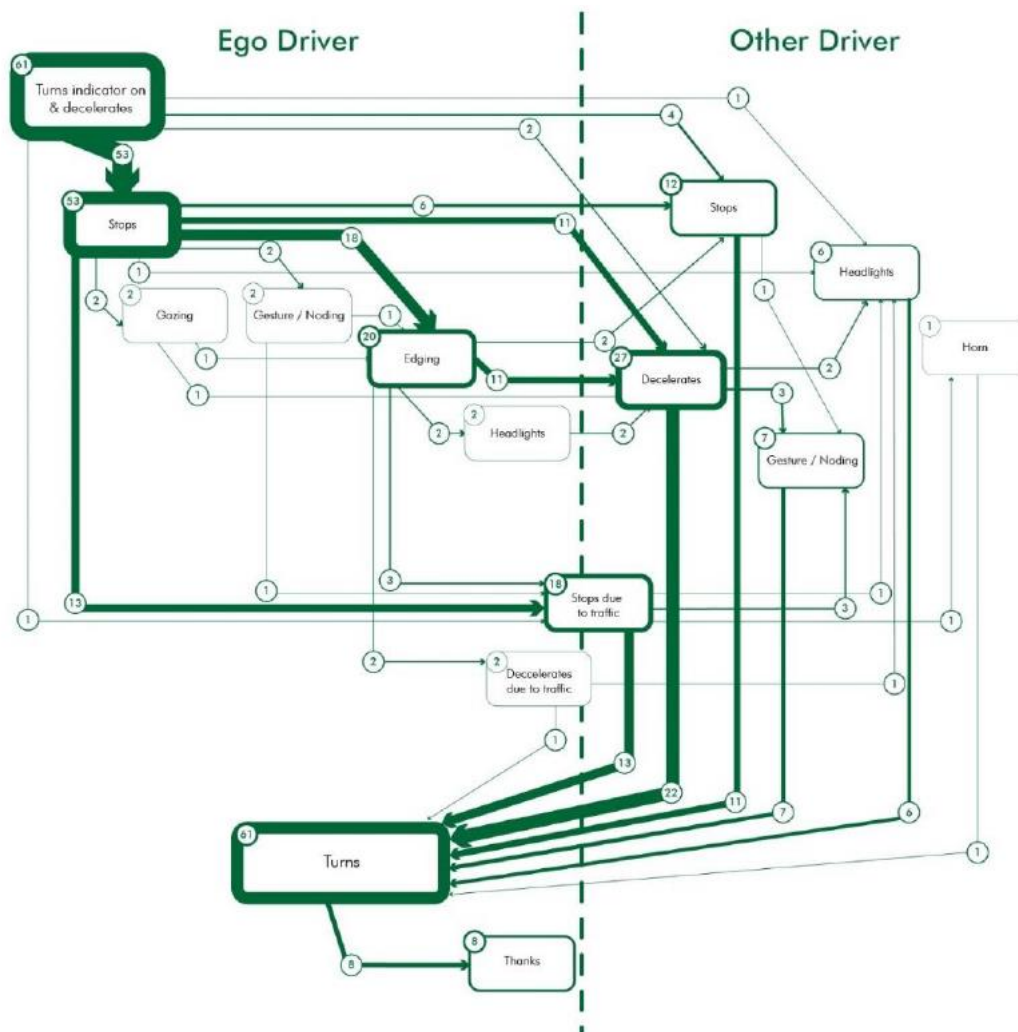
	Ο συμμετέχων ξεκίνησε την αλληλεπίδραση (N=146)	Ο συμμετέχων έστριψε μπροστά από τα εμπλεκόμενα οχήματα (N=62)	Ο συμμετέχων ξεκίνησε την αλληλεπίδραση (N=126)	Ο συμμετέχων έστριψε μπροστά από τα εμπλεκόμενα οχήματα (N=60)
Χειρονομία / Νεύμα			1	1
Προβολείς οχήματος	7	4	2	1
Κόρνα	1			
Επιτάχυνση			2	
Επιβράδυνση	22	22	22	22
Επιβράδυνση + Χειρονομία	3	3	2	2
Επιβράδυνση + Προβολείς οχήματος	1	1		
Επιβράδυνση + Προβολείς οχήματος + Χειρονομία			1	1
Σταμάτημα	25	25	24	24
Σταμάτημα + Χειρονομία	4	4	1	1
Σταμάτημα + Προβολείς οχήματος	1	1		
Σταμάτημα + Κόρνα	1	1		
Ένδειξη φλας			4	3
Ευκαιρία στροφής λόγω άλλου συμβάντος			3	2
Καμία παρατήρηση	81	1	64	2

Πίνακας 4 : Σήματα από τους άλλους οδηγούς

6.2 Ακολουθία των ενεργειών κατά την αλληλεπίδραση των οδηγών

Σε εκτενέστερη ανάλυση της μελέτης παρατήρησης αλληλεπιδράσεων των οδηγών εξήχθησε η ακολουθία των σημάτων που προηγούνται της απόφασης του συμμετέχοντα να στρίψει από ή σε κύριο δρόμο.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η ακολουθία των σημάτων για τις 61 αριστερές στροφές στις οποίες οι άλλοι οδηγοί υπέκυψαν στην πρόθεση του συμμετέχοντα να στρίψει. Στο αριστερό μέρος του σχήματος φαίνονται οι ενέργειες των συμμετεχόντων, στις παρενθέσεις εμφανίζεται ο αριθμός των περιπτώσεων κάθε ενέργειας βάσει των παρατηρήσεων. Παρομοίως, στο δεξί μέρος φαίνονται οι ενέργειες των άλλων οδηγών. Τα βέλη απεικονίζουν την αλληλουχία των ενεργειών.

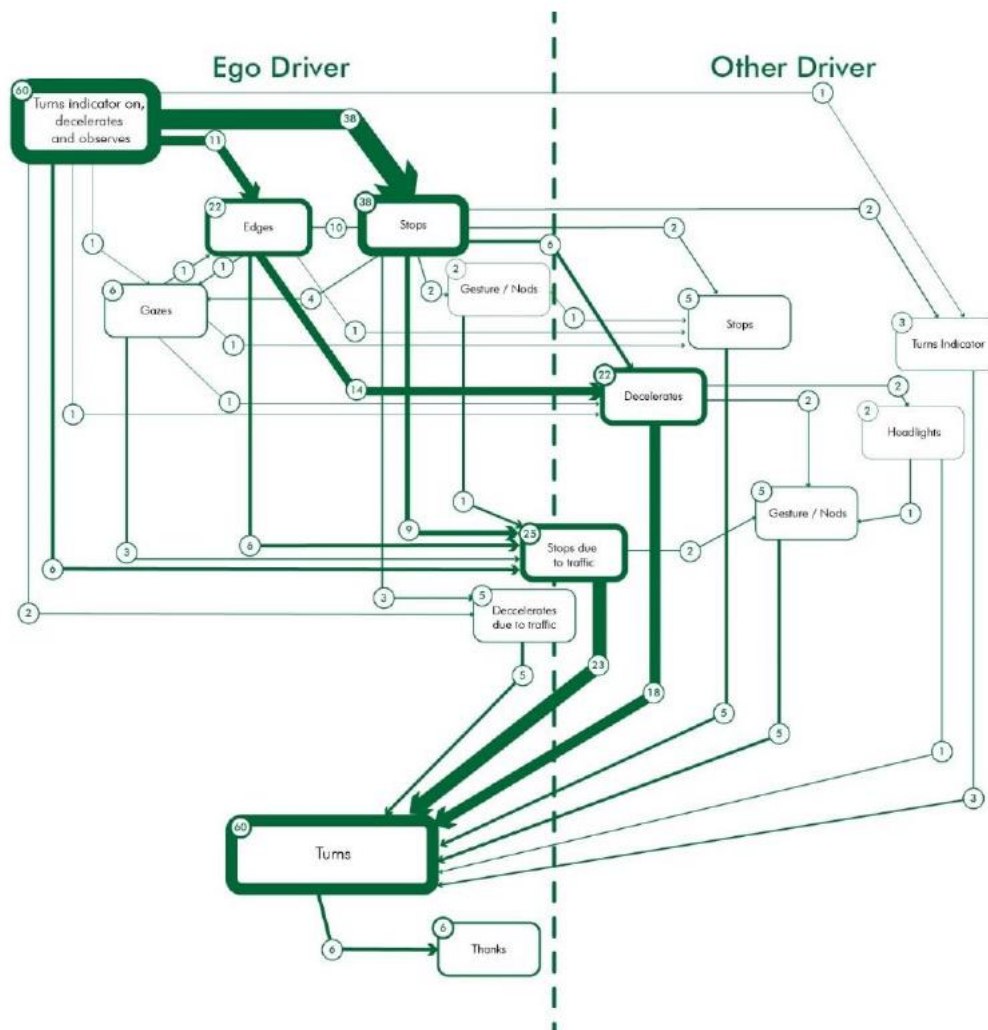


Σχήμα 4 : Ακολουθία ενεργειών στις αλληλεπιδράσεις των οδηγών κατά τις αριστερές διασταυρώσεις

Σύμφωνα με το Σχήμα 6, μια τυπική ακολουθία ενεργειών των αλληλεπιδράσεων που σχετίζονται με μια αριστερή στροφή είναι ως εξής: ο συμμετέχων ενεργοποίησε το δείκτη στροφής και επιβράδυνε. Αν ο ερχόμενος οδηγός αντιδρούσε και σταματούσε το όχημα καθώς ο συμμετέχων επιβράδυνε, τότε ο συμμετέχων πραγματοποιούσε τη στροφή. Διαφορετικά ο συμμετέχων σταματούσε πλήρως και περίμενε. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο συμμετέχων συχνά προσέγγιζε σταδιακά τη στροφή, δηλαδή πρόβαλε ελαφρά προς τα εμπρός προσπαθώντας ενδεχομένως να αναγκάσει τον ερχόμενο οδηγό να ενδώσει και να σταματήσει. Μερικές φορές, ο συμμετέχων αναβόσβησε τους προβολείς στον ερχόμενο οδηγό, έκανε χειρονομία, νεύμα ή προσπάθησε να επιτύχει την επαφή με τα μάτια του άλλου οδηγού οδηγού. Όταν ο άλλος οδηγός αποφάσισε να υποκύψει, επιβράδυνε. Μερικές φορές, ο άλλος οδηγός αναβόσβησε τους προβολείς ή έκανε χειρονομία / νεύμα προς τον συμμετέχοντα. Στη συνέχεια, ο συμμετέχων πραγματοποιούσε τη στροφή.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η ακολουθία των σημάτων για τις 60 δεξιές στροφές στις οποίες οι άλλοι οδηγοί υπέκυψαν στην πρόθεση του συμμετέχοντα να στρίψει.

Σύμφωνα με το Σχήμα 7, μια τυπική ακολουθία ενεργειών κατά την αλληλεπίδραση που σχετίζεται με τη δεξιά στροφή είναι η εξής: ο συμμετέχων επιβράδυνε, ενεργοποίησε το δείκτη στροφής καθώς παρατηρούσε την κυκλοφορία για τυχόν ερχόμενα οχήματα. Συχνά ο συμμετέχων σταματούσε πλήρως. Μερικές φορές ο συμμετέχων πρόβαλε ελαφρά προς τα εμπρός, μέσα στον δρόμο. Πιο σπάνια, ο συμμετέχων παρακολουθούσε έντονα τους ερχόμενους οδηγούς, προσπαθώντας να πετύχει επαφή με τα μάτια και έκανε χειρονομία ή νεύμα. Όταν ο άλλος οδηγός αποφάσισε να αντιδράσει, συνήθως επιβράδυνε ή σταματούσε πλήρως. Τότε ο συμμετέχων πραγματοποιούσε τη στροφή.



Σχήμα 5 : Ακολουθία ενεργειών στις αλληλεπιδράσεις των οδηγών κατά τις δεξιές στροφές

6.3 Ποιοτική ανάλυση της μελέτης των αλληλεπιδράσεων των οδηγών

Προκειμένου να διευκολυνθεί η επεξήγηση της ποιοτικής ανάλυσης που ακολουθήθηκε για να εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με την παρατήρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των οδηγών, εισήχθηκε η εξής κωδικοποίηση των εμπλεκόμενων σε ένα γεγονός, οδηγών.

(1) Δεξιά στροφή – είσοδος σε κύριο δρόμο από πάροδο

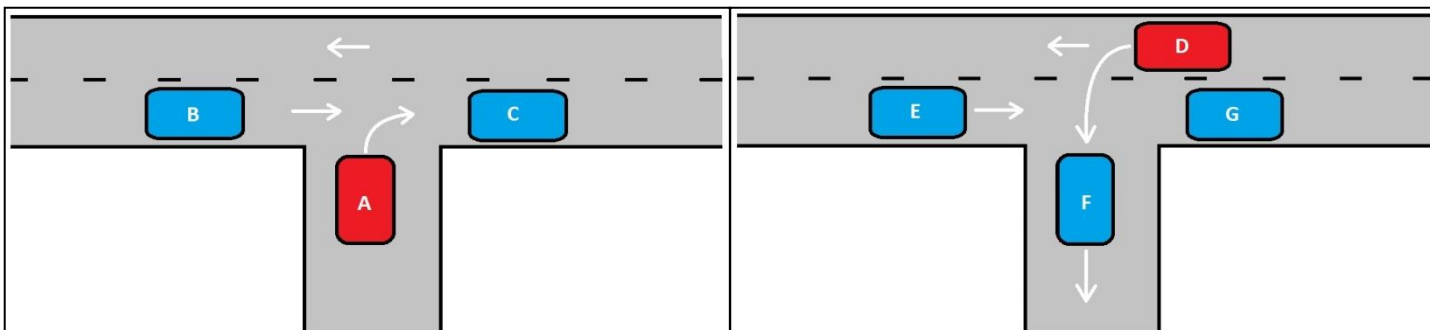
- Α οδηγός: Ο συμμετέχοντας, ο οδηγός του οχήματος που εξετάζουμε
- Β οδηγός: Ο οδηγός του άμεσα εμπλεκόμενου οχήματος, δηλαδή του ερχόμενου προς τη διασταύρωση οχήματος.

- C οδηγός: Ο οδηγός του έμμεσα εμπλεκόμενου οχήματος, δηλαδή του οχήματος που προπορεύεται του B οδηγού.

(2) Αριστερή στροφή από κύριο δρόμο σε πάροδο

- D οδηγός: Ο συμμετέχοντας, ο οδηγός του οχήματος που εξετάζουμε
- E οδηγός: Ο οδηγός του άμεσα εμπλεκόμενου οχήματος, δηλαδή του ερχόμενου προς τη διασταύρωση οχήματος.
- F οδηγός: Ο οδηγός του έμμεσα εμπλεκόμενου οχήματος που προπορεύεται του D οδηγού.
- G οδηγός: Ο οδηγός του έμμεσα εμπλεκόμενου οχήματος που προπορεύεται του E οδηγού.

Αντίστοιχη κωδικοποίηση ισχύει και για τα οχήματα των οδηγών. Αρκετές φορές θα αναφερόμαστε στα άμεσα εμπλεκόμενα οχήματα D και E ως A και B αντίστοιχα, ως μια καθολική κωδικοποίηση που αναφέρεται στο συμμετέχοντα και τον ερχόμενο οδηγό με τους οποίους θα υπάρξει άμεση αλληλεπίδραση, ανεξαρτήτως των σεναρίων διασταύρωσης. Στην Εικόνα 12 φαίνονται οι κωδικοποιήσεις των οδηγών / οχημάτων.



Εικόνα 12 : Κωδικοποίηση των οδηγών / οχημάτων που εμπλέκονται σε μία δεξιά στροφή (αριστερή εικόνα) και μία αριστερή στροφή (αριστερή εικόνα)

Βάσει των παρατηρήσεων των βίντεο eye tracking των οδηγών καθώς και από τον μετέπειτα σχολιασμό των κινήσεών τους από τους ίδιους τους οδηγούς, παρακολουθώντας και αναλύοντας τα βίντεό τους εξήχθησαν κάποιες ποιοτικές παρατηρήσεις που αφορούν τη συμπεριφορά των οδηγών κατά την οδήγηση και αλληλεπίδραση με άλλους οδηγούς. Η συμπεριφορά των οδηγών συμπεριλαμβάνει τυπικά και άτυπα σήματα, παρατηρήσεις μοτίβων ή/και ακολουθιών, η παρουσία των οποίων ενδεχομένως να καθορίζει άμεσα τις ενέργειες των οδηγών. Οι παρατηρήσεις θα βοηθήσουν στη συνέχεια στο σχεδιασμό της προσομοίωσης της ανθρώπινης συμπεριφοράς κατά την οδήγηση.

6.3.1 Παρατηρήσεις για οδήγηση σε ευθύ δρόμο

1. Για την ανάλυση των βίντεο, ενδιαφερόμαστε μόνο για τα σήματα σε περιπτώσεις διασταυρώσεων και όχι για τα σήματα από άλλους οδηγούς σε περιπτώσεις κανονικής κυκλοφορίας αφού τα σήματα αυτά μπορούν να λάβουν διάφορες έννοιες. Άλλη η βαρύτητα σήματος κόρνας από Β-οδηγό στην περίπτωση οδήγησης με ομαλή ταχύτητα σε ευθύ δρόμο, ένα σήμα χωρίς ξεκάθαρο αποδέκτη και άλλη η βαρύτητα σήματος κόρνας σε είσοδο του συμμετέχοντα σε κύριο δρόμο.
2. Παρατηρείται κορνάρισμα των οδηγών στις περιπτώσεις που το προπορευόμενο όχημα αργεί να αντιδράσει. Στην προκειμένη περίπτωση το κορνάρισμα αποτελεί σήμα επικοινωνίας μεταξύ των οδηγών για να δηλώσει δυσαρέσκεια για την εξέλιξη ενός γεγονότος.
3. Σε μονόδρομο, όταν ο δρόμος στενεύει επικίνδυνα, παρατηρήθηκε οι οδηγοί να κοιτάζουν τα δεξιά και αριστερά περιθώρια προκειμένου να εκτιμήσουν την απόσταση πριν επιχειρήσουν να περάσουν.
4. Οι οδηγοί **προσέχουν περισσότερο τη δεξιά πλευρά του δρόμου** που υπάρχουν σταθμευμένα οχήματα, επειδή μπορεί ανά πάσα στιγμή να εμφανιστεί πεζός, να ανοίξει πόρτα ή να εκκινήσει κάποιο σταθμευμένο όχημα.
5. Όταν υπάρχει κίνηση στο δρόμο μπροστά από τους συμμετέχοντες τότε παρατηρήθηκε να δίνουν πιο εύκολα προτεραιότητα σε πεζούς να διασταυρώσουν ή άλλους οδηγούς να εισέλθουν στη λωρίδα τους.

6.3.2 Γενικές παρατηρήσεις για στροφές από/σε κύριο δρόμο σε/από πάροδο

6. Οι Α-οδηγοί προτιμούν να αδειάσει εντελώς ο δρόμος για να εισέλθουν/εξέλθουν σε/από κύριο δρόμο.
7. Σύμφωνα με παρατηρήσεις των οδηγών, σπάνια θα πραγματοποιήσουν είσοδο/έξοδο σε/από κύριο δρόμο εάν δεν λάβουν οπτική επιβεβαίωση από τον άμεσα εμπλεκόμενο οδηγό.
8. Οι αποφάσεις πραγματοποίησης μιας στροφής επηρεάζονται άμεσα από την εκτίμηση που κάνουν οι Α-οδηγοί για την προσοχή των Β-οδηγών. Δύσκολα θα πραγματοποιήσουν μία στροφή εάν ο Β-οδηγός μιλάει στο τηλέφωνο.
9. Παρατηρείται ότι οι μοτοσυκλέτες σπάνια σταματούν για να δώσουν προτεραιότητα στον Α-οδηγό.

10. Συχνά οι Α-οδηγοί των οχημάτων εκμεταλλεύονται προσφορά προτεραιότητας που δόθηκε σε τρίτα πρόσωπα όπως πεζούς ή έμμεσα εμπλεκόμενα οχήματα για να πραγματοποιήσουν είσοδο/έξοδο σε/από κύριο δρόμο.
11. Οι αποφάσεις κάποιων οδηγών επηρεάζονται από το χρόνο αναμονής στη διασταύρωση. Συγκεκριμένα ένας Α-οδηγός ανέφερε ότι διασταύρωσε επιθετικά εν τέλει το δρόμο επειδή περίμενε αρκετή ώρα.
12. Όταν σε διασταύρωση δρόμου υπάρχει περιορισμένη ορατότητα, τότε παρατηρείται οι Α-οδηγοί να προχωρούν σταδιακά προς τα εμπρός για να αυξήσουν την ορατότητά τους, προτού πάρουν την απόφαση να εισέλθουν ⇒ προβολή.
13. Όταν οι δύο άμεσα εμπλεκόμενοι οδηγοί συμφωνήσουν με νόημα στην πραγματοποίηση μιας ενέργειας όπως στροφής του ενός, πρέπει εντούτοις να προσέχουν ακόμη για πιθανή εμπλοκή στο συμβάν και από τρίτο άτομο (πχ πεζός, οδηγός μοτοσυκλέτας).
14. Συμμετέχον οδηγός που ετοιμάζεται να διασταυρώσει το δρόμο, ζητάει άδεια νεύοντας το χέρι του απ' το ερχόμενο όχημα για να διασταυρώσει, και περιμένει την επιβεβαίωση αυτού (επίσης με νεύμα) για να το πράξει.

6.3.2.1 Παρατηρήσεις για τις περιπτώσεις αριστερής στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο

15. Σε περίπτωση στροφής προς την αντίθετη λωρίδα όπου υπάρχει κίνηση (traffic) και ο G-οδηγός είναι σταματημένος, τότε παρατηρείται μεγαλύτερη ευκολία πρωτοβουλίας του D-οδηγού για να στρίψει. Επομένως η απόφαση του D-οδηγού επηρεάζεται άμεσα από την κίνηση της αντίθετης λωρίδας. Αυτή η παρατήρηση θα παίζει σημαντικό ρόλο στη μετέπειτα μοντελοποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς.
16. Παρατηρείται διαφορά στη λήψη πρωτοβουλίας για στροφή προς την αντίθετη λωρίδα, μεταξύ των περιπτώσεων που το ερχόμενο D-όχημα είναι μοτοσυκλέτα (ή ποδήλατο αφού αντιμετωπίζονται κατά παρόμοιο τρόπο), αυτοκίνητο, ή μεγάλο όχημα. Φαίνεται ότι οι πιθανότητες απόφασης για πραγματοποίηση στροφής αυξάνονται ανάλογα με την αύξηση όγκου και με τη μείωση ταχύτητας και ευελιξίας του D-οχήματος, παράγοντας που πιθανό να συνδέεται με την εκτίμηση ασφάλειας της κάθε περίπτωσης. Για παράδειγμα οι μοτοσυκλέτες αποδεικνύεται, σύμφωνα με σχόλια των οδηγών, ότι είναι πιο επιρρεπής σε ατυχήματα.

6.3.2.2 Παρατηρήσεις για τις περιπτώσεις στροφής από πάροδο σε κύριο δρόμο

17. Παρατηρείται ότι οι οδηγοί δεν προτιμούν να κόψουν μια μοτοσυκλέτα επειδή σε επόμενο χρόνο, σύμφωνα με παρατηρήσεις των οδηγών, πιθανό η μοτοσυκλέτα θα τους δυσκολέψει προσπαθώντας να τους προσπεράσει.
18. Σε αρκετές περιπτώσεις, εάν εμποδίζεται η όραση προς τα διερχόμενα οχήματα, τότε οι Α-οδηγοί παρατηρείται να παρακολουθούν το δρόμο μέσα από τα γυαλιά των οχημάτων που τους παρεμποδίζουν.
19. Στις περιπτώσεις που το ερχόμενο Β-όχημα βρίσκεται σε απόσταση ικανοποιητική για να εισέλθει ένα Α-όχημα σε κύριο δρόμο χωρίς να το εμποδίσει, τότε εάν μετά από το Β-όχημα δεν ακολουθεί άλλο όχημα, παρατηρείται ότι οι Α-οδηγοί περιμένουν να εισέλθουν μετά από το ερχόμενο Β-όχημα. Σύμφωνα με παρατηρήσεις των οδηγών, αυτό συμβαίνει επειδή δεν παρεμποδίζουν κάποιο όχημα στο δρόμο που βρίσκονται ήδη σταματημένοι οι ίδιοι, επομένως προτιμούν την πιο ασφαλή επιλογή. Παρατηρήθηκε ακόμη ένας Α-οδηγός που εισήλθε σε κύριο δρόμο επιθετικά, ενώ το ερχόμενο Β-όχημα βρισκόταν αρκετά κοντά, επειδή σύμφωνα με τον Α-οδηγό πίσω από το ερχόμενο όχημα ακολουθούσαν αρκετά οχήματα που θα το καθυστερούσαν να εισέλθει, ενισχύοντας έτσι την πιο πάνω παρατήρηση, ότι τα οχήματα πίσω από το ερχόμενο όχημα επηρεάζουν την απόφαση του Α-οδηγού. Ωστόσο, στις περιπτώσεις στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο οι Α-οδηγοί επηρεάζονται περισσότερο από την κίνηση πίσω από αυτούς, αφού παρεμποδίζουν την ομαλή λειτουργία κίνησης της λωρίδας τους, παρά την κίνηση πίσω από τα ερχόμενα οχήματα.
20. Παρατηρείται ότι σε περίπτωση που υπάρχει προπορευόμενο όχημα που επιθυμεί να εκτελέσει παρόμοια ενέργεια με αυτή του Α-οδηγού, τότε ο δεύτερος ελαχιστοποιεί την απόσταση των δύο οχημάτων προκειμένου να εκμεταλλευτεί την ενέργεια που θα προηγηθεί για να εισέλθει σε κύριο δρόμο είτε ακολουθώντας το προπορευόμενο όχημα εάν αυτό θα εισέλθει στην ίδια λωρίδα, είτε ως κάλυψη, εάν αυτό εισέλθει στην αντίθετη λωρίδα.
21. Όταν παρουσιάζεται κίνηση (traffic) στον κύριο δρόμο, τότε παρατηρείται οι οδηγοί, του κύριου δρόμου να δημιουργούν κενό (gap) μπροστά από τις παρόδους, προκειμένου να μην εμποδίζουν πιθανή στροφή των οχημάτων που βρίσκονται στην πάροδο. Το άνοιγμα δημιουργείται και από τα προπορευόμενα αλλά και από τα επερχόμενα οχήματα.
22. Παρατηρήθηκε οι Α-οδηγοί προσέχουν όχι μόνο τα ερχόμενα Β-οχήματα αλλά ελέγχουν και την παρουσία κοντινών C-οχημάτων για να βεβαιώσουν ότι τους χωράει να εισέλθουν, πριν κάνουν την κίνησή τους.

23. Όταν το ερχόμενο Β-όχημα επιβραδύνει και δηλώνει με φλας δείκτη στροφής ότι προτίθεται να στρίψει, τότε παρατηρείται, οι Α-οδηγοί να εισέρχονται στον κύριο δρόμο με μεγαλύτερη ευκολία. Το ίδιο συμβαίνει όταν πεζοί διακόπτουν την ομαλή κυκλοφορία της λωρίδας για να διασταυρώσουν.
24. Παρατηρήθηκε οι οδηγοί να μετριάζουν και να εκτιμούν την ασφάλεια για τη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα εάν ο Α-οδηγός παρεμποδίζει την κυκλοφορία κίνησης των οχημάτων της δεξιάς λωρίδας προκειμένου να εισέλθει στον κύριο δρόμο στην απέναντι λωρίδα, τότε τα ερχόμενα οχήματα της αντίθετης λωρίδας του δίνουν προτεραιότητα αφού κρίνουν επικίνδυνη την παραμονή και άρα την παρεμπόδιση των οχημάτων στην άλλη λωρίδα.

6.3.3 Παρατηρήσεις μεμονωμένων περιπτώσεων

25. Παρατηρήθηκαν περιπτώσεις που οι συμμετέχοντες οδηγοί έλαβαν σήμα για να πράξουν μια ενέργεια, πχ εκκίνηση, επιβράδυνση, στροφή, είσοδος σε πάροδο κτλ, από τρίτο πρόσωπο, πχ πεζό, που δε συμμετείχε άμεσα στο γεγονός.
26. Παρατηρήθηκε ότι όταν οι συμμετέχοντες οδηγοί έχουν ξανακάνει την ίδια διαδρομή, τότε εντοπίζουν πιθανά εμπόδια και ιδιαιτερότητες και μεριμνούν ώστε να αποτρέψουν να ξανασυμβούν στην επανάληψη. Για παράδειγμα σε σημεία χαμηλής ορατότητας, στην επανάληψη μερίμνησαν να κοιτάζουν την κίνηση του κύριου δρόμου από διαφορετικό σημείο. Γενικότερα ένα αυτόνομο όχημα χρειάζεται να λαμβάνει αποφάσεις βάσει μελλοντικών κινήσεων ή καταστάσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση της τεχνητής νοημοσύνης αναγνωρίζοντας μοτίβα του παρελθόντος.
27. Τα σήματα από φλας δεικτών στροφής από άλλους οδηγούς, δεν πρέπει από μόνα τους να αποτελούν μοναδική ικανή συνθήκη για πραγματοποίηση μιας ενέργειας, πχ είσοδος σε κύριο δρόμο, αφού παρατηρήθηκαν περιπτώσεις που τα φλας ενεργοποιήθηκαν εσφαλμένα προκαλώντας σύγχυση στην ομαλή κυκλοφορία οχημάτων ή ακόμη και ατύχημα.
28. Ένας οδηγός ανέφερε ότι παρατήρησε πως όταν τα φλας δεικτών στροφής των λεωφορείων δείχνουν προς τη στάση τότε είναι σταματημένα ή επιβραδύνουν, ενώ προς την πλευρά του δρόμου θα επιταχύνουν.
29. Δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και σε ζώα, όχι μόνο πεζούς.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση της μελέτης eye tracking των οδηγών, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε σε μια πιο εύρωστη

μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της ανθρώπινης οδήγησης για την επίτευξη της αλληλεπίδρασής τους με ένα αυτόνομο όχημα.

7

Σχεδιασμός του μοντέλου προσομοίωσης

αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος – οδηγού

Η ανάπτυξη ενός ρεαλιστικού πρωτοτύπου σεναρίου και η ανάλυση των αποτελεσμάτων του για τη μελέτη αλληλεπίδρασης των οδηγών είναι σχεδόν αδύνατη, δεδομένου ότι θα πρέπει να κατασκευαστούν, να λειτουργήσουν και να παρατηρηθούν δεκάδες πρωτότυπα οχήματα. Επομένως, είναι απαραίτητο να προσομοιώσουμε πρώτα αυτό το πολύπλοκο σύστημα.

Η μοντελοποίηση των μεταφορών έχει να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων για τον προγραμματισμό και τη διαχείριση της τρέχουσας και της μελλοντικής υποδομής.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των πακέτων προσομοίωσης της κυκλοφορίας είναι,

- Ευελιξία και γρήγορη ανατροφοδότηση
- Ασφάλεια
- Διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας και ταχύτητας
- Εύρωστη απεικόνιση
- Εξοικονόμηση κόστους και χρόνου

Τα μειονεκτήματα των προσομοιώσεων αφορούν κυρίως την ανάγκη υπολογιστικής και επεξεργαστικής ισχύς.

Στόχος της ανάλυσης λοιπόν που προηγήθηκε, είναι ο σχεδιασμός ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει την αλληλεπίδραση αυτόνομου οχήματος με έναν οδηγό. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα διαμορφώσουν την αξιοπιστία του μοντέλου.

Για την επίτευξη της προσομοίωσης εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά των έτοιμων πακέτων προσομοιωτών κυκλοφορίας που κυκλοφορούν στην αγορά. Τα μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας χωρίζονται τρεις κατηγορίες αναλόγως του επίπεδου λεπτομέρειας που απαιτείται,

- Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μακροσκοπικής κλίμακας
- Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μικροσκοπικής κλίμακας
- Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μέσης κλίμακας

7.1 Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μακροσκοπικής

κλίμακας

Τα μοντέλα μακροσκοπικής προσομοίωσης περιγράφουν την εξέλιξη των ροών κυκλοφορίας σε χρόνο και χώρο, με βάση τις σχέσεις μεταξύ όγκου κυκλοφορίας, ταχύτητας και πυκνότητας, όπου η πυκνότητα ορίζεται ως ο αριθμός των οχημάτων ανά χιλιόμετρο δρόμου. Η ροή της κυκλοφορίας αντιπροσωπεύεται ως ένα σύνολο που λαμβάνει υπόψη όλα τα προαναφερθέντα μέτρα, αντί για μια ομάδα μεμονωμένων οχημάτων. Το κύριο πλεονέκτημα των μακροσκοπικών μοντέλων είναι ότι, δεδομένου ότι έχουν λιγότερες παραμέτρους από τα μεσοσκοπικά ή μικροσκοπικά μοντέλα, επιτυγχάνουν υψηλότερη υπολογιστική αποτελεσματικότητα. Ωστόσο, αυτή η υπολογιστική απόδοση αντισταθμίζεται από το χαμηλό επίπεδο λεπτομέρειας [30].

7.2 Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μέσης κλίμακας

Τα μοντέλα μέσης κλίμακας προκύπτουν ως μια ισορροπημένη ενδιάμεση λύση μεταξύ των μακροσκοπικών και μικροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης [31]. Μερικά από αυτά ομαδοποιούν οχήματα και τα αντιμετωπίζουν ως μεμονωμένες οντότητες, παρέχοντας υψηλά επίπεδα λεπτομέρειας για, αλλά χαμηλή ακρίβεια όσον αφορά τις αλληλεπιδράσεις και τη συμπεριφορά τους [32]. Μια άλλη προσέγγιση διακριτοποιεί το δρόμο σε μικρότερα τμήματα, τα οποία μπορεί να είναι κενά ή να περιέχουν όχημα. Κάποια σειρά απλών κανόνων συμπεριφοράς καθορίζει πόσα τμήματα δρόμου θα μετακινηθεί κάθε όχημα σε κάθε βήμα προσομοίωσης [33]. Ορισμένα άλλα μοντέλα εφαρμόζουν μια προσέγγιση όπου ο δρόμος

διαμορφώνεται ως δύο τμήματα: ένα τμήμα που μετακινείται και ένα τμήμα αναμονής. Τα οχήματα στο κινούμενο τμήμα διαμορφώνονται μεμονωμένα με τη δική τους ταχύτητα, ενώ αυτά που βρίσκονται στο τμήμα αναμονής περιμένουν. Ωστόσο, η συμπεριφορά τους δεν διευκρινίζεται περαιτέρω. Αυτή η ατομική ταχύτητα προσδιορίζεται μέσω μιας μακροσκοπικής συνάρτησης ταχύτητας-πυκνότητας, συνδυάζοντας έτσι τις μικροσκοπικές τεχνικές (μεμονωμένη μοντελοποίηση οχημάτων) με μακροσκοπικά μέτρα του ενιαίου συνόλου [34].

7.3 Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας μικροσκοπικής

κλίμακας

Τα μικροσκοπικά μοντέλα αναλύουν την κίνηση κάθε επιμέρους οχήματος που περιέχεται στο δίκτυο. Σε αντίθεση με τα μακροσκοπικά μοντέλα – όπου η κυκλοφορία θεωρείται ως ένα σύνολο οχημάτων, και όπου κάποιες διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για το μοντέλο ως ένα ενιαίο σύνολο – σε μικροσκοπικά μοντέλα, η συμπεριφορά κάθε οχήματος διαμορφώνεται από τη δική του εξίσωση, συνάρτηση της θέσης του, και την επιτάχυνση.

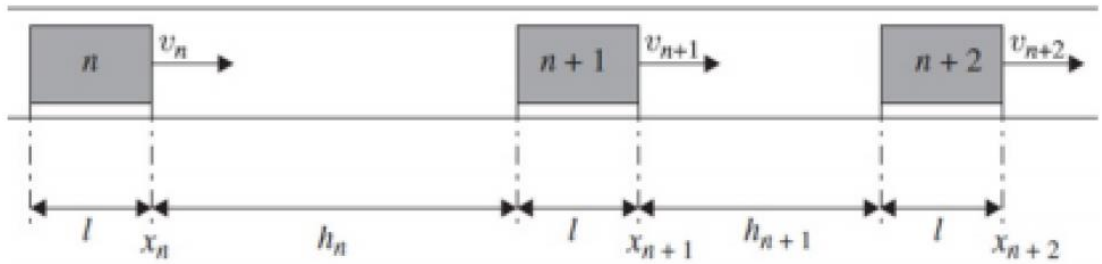
Για τις ανάγκες αυτής της έρευνας θα χρησιμοποιηθεί μοντέλο προσομοίωσης μικροσκοπικής κλίμακας, αφού προσφέρει μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Ένα μοντέλο προσομοίωσης μικροσκοπικής κλίμακας χωρίζεται ανάλογα της συμπεριφοράς του οδηγού σε

- Μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων
- Μοντέλο αλλαγής λωρίδας

7.3.1 Μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων

Η αλληλεπίδραση του οδηγού με το δίκτυο (οχήματα, εμπόδια, σήματα ...) περιγράφεται ως μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων, στο οποίο κάθε όχημα έχει ένα προπορευόμενο όχημα που επηρεάζει την ταχύτητα και την επιτάχυνση του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13 : Μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων

7.3.2 Μοντέλο αλλαγής λωρίδας

Η μοντελοποίηση δρόμων με μια μοναδική λωρίδα σε κάθε κατεύθυνση μπορεί να είναι αρκετά απλή. Ωστόσο, οι περισσότεροι δρόμοι έχουν δύο ή περισσότερες λωρίδες. Όταν ένα όχημα αλλάζει από μια λωρίδα στην άλλη, έχει σημαντική επίδραση στη ροή της κυκλοφορίας. Αυτό το μοντέλο προσομοιώνει κατάλληλα τη συμπεριφορά του οχήματος κατά την αλλαγή λωρίδας.

Τα προγράμματα που κρίθηκαν καταλληλότερα για τους σκοπούς αυτής της έρευνας είναι οι προσομοιωτές κυκλοφορίας μικροσκοπικής κλίμακας SUMO και VISSIM. Συγκεκριμένα,

- (1) SUMO (Simulation for Urban Mobility): είναι ένας προσομοιωτής κυκλοφορίας σε μικροσκοπική κλίμακα που εκτελεί ενέργειες σε συνεχή χώρο και διακριτό χρόνο, και διαθέτει μια γραφική διεπαφή για τον έλεγχο της εκτέλεσης της προσομοίωσης. Τα δίκτυα δρόμων μπορούν είτε να δημιουργηθούν είτε να εισαχθούν από διάφορα αρχεία χαρτογράφησης ή τους χάρτες που παράγονται από εργαλεία όπως VISSIM ή VISUM. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του προσομοιωτή είναι ότι οι διαδρομές του οχήματος υπολογίζονται πριν από την έναρξη μιας προσομοίωσης. Ωστόσο, οι μεταβολές στη συμπεριφορά των αυτοκινήτων και η τροποποίηση των διαδρομών τους σύμφωνα με τις πληροφορίες είναι κρίσιμες για την εμφάνιση των επιπτώσεων μιας προειδοποίησης μεταξύ των οχημάτων.
- (2) VISSIM: Ο προσομοιωτής κυκλοφορίας VISSIM είναι ένα εξαιρετικά πλήρες εργαλείο που διαθέτει μια λεπτομερή γραφική αναπαράσταση σεναρίων, συμπεριλαμβανομένων των αυτοκινήτων, των τρένων, των λεωφορείων και των φορτηγών, καθώς και των ατόμων και των γύρω κτιρίων. Μπορεί να συνδυαστεί με άλλα προγράμματα. Μερικά σημαντικά μειονεκτήματα είναι ότι οι οδικοί χάρτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με τη μετάφραση τους με τη βοήθεια ενός άλλου εργαλείου, το οποίο ονομάζεται VISUM. Εκτός από αυτό, η βασική έκδοση του VISSIM επιτρέπει τα οχήματα να κινούνται μόνο κατά μήκος διαδρομών που

καθορίζονται πριν από την προσομοίωση. Μόνο με μεγάλη προσπάθεια προγραμματισμού, οι διαδρομές ενός οχήματος μπορούν να τροποποιηθούν κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης.

Παρόλο που και τα δύο αυτά μοντέλα προσομοιώσεων είναι ικανά για τις ανάγκες της μελέτης αλληλεπίδρασης, ως τελικό εργαλείο επιλέχθηκε ο προσομοιωτής κυκλοφορίας VISSIM λόγω των πολλών δυνατοτήτων του.

7.4 Δημιουργία του σεναρίου προσομοίωσης κυκλοφορίας μικροσκοπικής κλίμακας με το μοντέλο VISSIM

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί προκειμένου μέσω της προσομοίωσης VISSIM να εξαχθούν αποτελέσματα για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία είναι σύμφωνα με το [35],

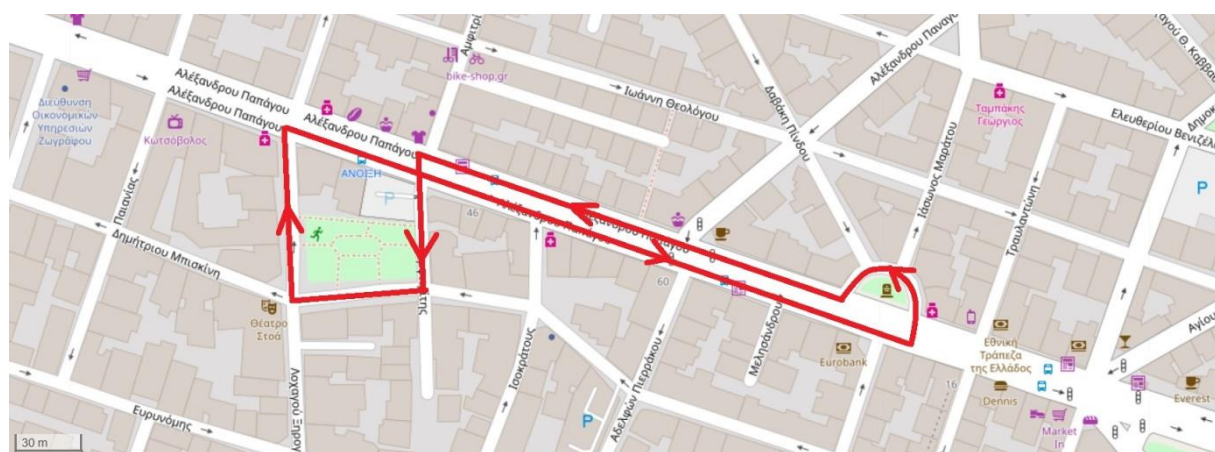
- (1) Δημιουργία του αρχικού μοντέλου προσομοίωσης
 - (i) Δημιουργία δεδομένων δικτύου
 - Είτε χρησιμοποιώντας έτοιμο χάρτη, πχ μέσω Open Street Map (OSM)
 - Είτε φτιάχνοντας το δίκτυο χειροκίνητα
 - (ii) Δημιουργία δεδομένων κυκλοφορίας
 - Είσοδος στο δίκτυο διαφόρων ειδών οχημάτων ή/και πεζών
 - Προσδιορισμός των διαδρομών των οχημάτων
 - Προφίλ ταχυτήτων / επιταχύνσεων των οχημάτων
 - (iii) Δημιουργία σεναρίων αλληλεπίδρασης
 - Είσοδος παραμέτρων συστήματος
 - Σχεδιασμός πειραμάτων κυκλοφορίας
- (2) Εκτέλεση προσομοίωση κυκλοφορίας VISSIM
- (3) Κριτήρια αξιολόγησης και αποτελέσματα της προσομοίωσης

7.4.1 Δημιουργία του αρχικού μοντέλου προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθεί, θα είναι μια όσο το δυνατό ρεαλιστική απεικόνιση του σεναρίου κυκλοφορίας της Εικόνας 6 που εξετάστηκε κατά την μελέτη eye tracking και αλληλεπίδρασης των οδηγών.

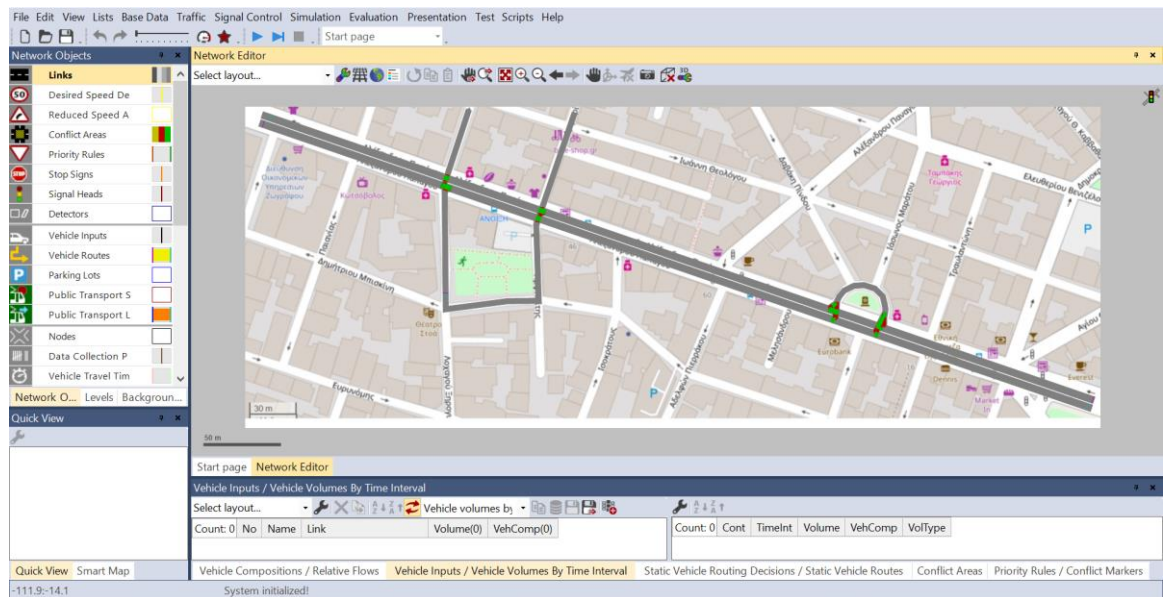
7.4.1.1 Δημιουργία δεδομένων δικτύου

Για τη δημιουργία του δικτύου έγινε χρήση του OSM, ενός online εργαλείου χαρτογράφησης μέσω του οποίου μπορούν να εγκατασταθούν στον προσομοιωτή VISSIM οι χάρτες μιας τοποθεσίας προς διευκόλυνση της δημιουργίας δικτύου. Έτσι εξήχθη σε μορφή χάρτη η περιοχή της μελέτης αλληλεπίδρασης οδηγών. Στην Εικόνα 14 φαίνεται η διαδρομή που ακολούθησαν τα υπό εξέταση αυτοκίνητα, ίδια με αυτή των συμμετεχόντων οδηγών. Στην προσομοίωση, λήφθηκε υπόψη η κλίμακα της τοποθεσίας για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.



Εικόνα 14 : Χάρτης της τοποθεσίας μελέτης αλληλεπίδρασης των οδηγών που χρησιμοποιήθηκε στον προσομοιωτή VISSIM

Έτσι, έχοντας ως φόντο την πραγματική τοποθεσία εκτέλεσης των πειραμάτων, προστέθηκαν οι δρόμοι για τους οποίους θα εξετασθεί η ροή κυκλοφορίας των οχημάτων [36]. Το δίκτυο προσομοίωσης όπως και το περιβάλλον χρήσης του μοντέλου VISSIM παρουσιάζονται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15 : Δίκτυο προσομοίωσης και περιβάλλον χρήσης μοντέλου VISSIM

7.4.1.2 Δημιουργία δεδομένων κυκλοφορίας

Επόμενο βήμα στο μοντέλο προσομοίωσης της ροής κυκλοφορίας είναι η πρόσθεση οχημάτων και διαδρομών τους στο δίκτυο.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως η προσομοίωση αλληλεπίδρασης όλων των συνδυασμών οχημάτων – ειδών διασταυρώσεων που επηρέασαν στη λήψη αποφάσεων των συμμετεχόντων στην πρωτότυπη μελέτη eye tracking των οδηγών και η ανάλυσή τους, απαιτεί ενδελεχή έρευνα. Για το λόγο αυτό η προσομοίωση και η ανάλυση των αλληλεπιδράσεων των οδηγών εκτελέστηκε με τους εξής περιορισμούς:

- Αλληλεπίδραση οδηγών μόνο κανονικών αυτοκινήτων, χωρίς μοτοσυκλέτες, φορτηγά κτλ.
- Αλληλεπίδραση μόνο των εμπλεκόμενων οδηγών κατά τη δεξιά στροφή από πάροδο σε κύριο δρόμο, και αριστερή στροφή από κύριο δρόμο σε πάροδο.
- Παραδεχόμαστε ότι το άμεσα εμπλεκόμενο όχημα είναι αυτόνομο και προσομοιώνουμε τη συμπεριφορά του ως σαν να επηρεάζεται η κανονική του λειτουργία μόνο κατά την αλληλεπίδρασή του με το όχημα ελέγχου μας, δηλαδή όταν και τα δύο αυτά οχήματα βρίσκονται σε κρίσιμη περιοχή πιθανής σύγκρουσης (conflict area).
- Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση με πεζούς. Η επίδραση των πεζών θα καθοριστεί στη συνέχεια ως μια στοχαστική μεταβλητή η οποία ενδεχομένως να επηρεάζει (1) ή όχι (0) τη συμπεριφορά των οδηγών ως προς μια συγκεκριμένη ενέργεια. Αυτό γίνεται με τη χρήση fuzzy συστημάτων.

- Δεχόμαστε την παραδοχή κανονικών συνθηκών κυκλοφορίας. Για παράδειγμα οδήγηση εντός των γραμμών κυκλοφορίας σε κανονικούς δρόμους.

Συγκεκριμένα τα σημεία μελέτης της αλληλεπίδρασης των οδηγών παρουσιάζονται στην Εικόνα 16. Το σημείο Α είναι το σημείο μελέτης της δεξιάς στροφής από πάροδο σε κύριο δρόμο ενώ το σημείο Β είναι το σημείο μελέτης της αριστερής στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι τύποι οχημάτων και οδηγών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης τους. Υπάρχουν δύο τύποι οδηγών και οι μεταβλητές που τίθενται για τους δύο τύπους οδηγών είναι η επιθυμητή μέση ταχύτητά τους, το σημείο εκκίνησης τους, η διαδρομή και η πυκνότητα τους, δηλαδή ο αριθμός των οχημάτων ανά ώρα. Οι δύο τύποι οδηγών είναι,

- (1) Οδηγοί αλληλεπίδρασης – Άλλοι οδηγοί: Εκφράζουν τα οχήματα της κανονικής κυκλοφορίας του δρόμου που εξετάζουμε. Τα οχήματα των οδηγών αλληλεπίδρασης δεν ελέγχονται. Έτσι η ταχύτητά τους καθορίζεται κάθε φορά αυτόματα βάσει του μοντέλου ακολουθίας αυτοκινήτων του προσομοιωτή VISSIM. Επίσης, βάσει της πυκνότητάς τους, τα οχήματα αλληλεπίδρασης εμφανίζονται τυχαία στο δίκτυο ακολουθώντας στοχαστική κατανομή.
- (2) Οδηγοί ελέγχου: Εκφράζουν τα υπό εξέταση οχήματα. Τα οχήματα των οδηγών ελέγχονται καθορίζοντας πλήρως τη συμπεριφορά τους κατά την αλληλεπίδρασή τους με άλλους οδηγούς. Έτσι για τα οχήματα ελέγχου καθορίζεται η επιθυμητή μέση ταχύτητα, που ωστόσο ενδεχομένως να αλλάζει ελεγχόμενα κατά την αλληλεπίδραση τους.

Όπως προαναφέρθηκε, για λόγους απλούστευσης της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν μόνο κανονικά αυτοκίνητα μέσης ταχύτητας 40km/h. Το ποσοστό επί της συνολικής ροής εκφράζει το ποσοστό του κάθε τύπου οχημάτων επί της συνολικής ροής της κυκλοφορίας στην προσομοίωση, και το μέγεθος 100% εκφράζει το γεγονός πως τόσο οι οδηγοί αλληλεπίδρασης, όσο και οι οδηγοί ελέγχου φέρουν εξ 'ολοκλήρου οχήματα κανονικού μεγέθους – κανονικά αυτοκίνητα.

Τύπος οδηγών	Τύπος οχήματος	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Ποσοστό επί της συνολικής ροής (%)
Οδηγοί αλληλεπίδρασης – Άλλοι οδηγοί	Μεσαίο όχημα – αυτοκίνητο	40	100.0
Οδηγοί ελέγχου	Μεσαίο όχημα –	40	100.0

	αυτοκίνητο		
--	------------	--	--

Πίνακας 5 : Τύποι οχημάτων και οδηγών τους προσομοίωσης αλληλεπίδρασης τους

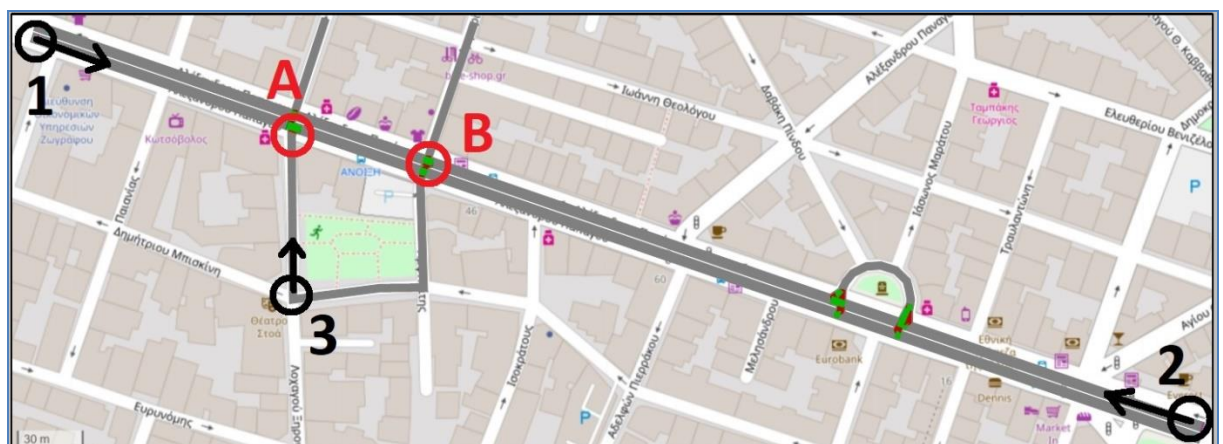
Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των σημείων εκκίνησης που εμφανίζονται στην Εικόνα 16. Οι οδηγοί αλληλεπίδρασης εκκινούν από το σημείο 1 προς το σημείο 2 με πυκνότητα 800 οχήματα ανά ώρα και από το σημείο 2 προς το σημείο 1 με πυκνότητα 1000 οχήματα ανά ώρα. Οι οδηγοί ελέγχου εκκινούν από το σημείο 3, ακολουθώντας τη διαδρομή που εμφανίζεται στην Εικόνα 14, με πυκνότητα 320 οχήματα ανά ώρα.

Σημείο εκκίνησης	Πυκνότητα οχημάτων (οχήματα / ώρα)	Τύπος οδηγών
1	800	Οδηγοί αλληλεπίδρασης – Άλλοι
2	1000	Οδηγοί αλληλεπίδρασης – Άλλοι
3	250	Οδηγοί ελέγχου

Πίνακας 6 : Σημεία εκκίνησης οχημάτων προσομοίωσης αλληλεπίδρασης οδηγών

Οι τιμές των πιο πάνω παραμέτρων αντιπροσωπεύουν αντικειμενικά τα σενάρια κυκλοφορίας της συγκεκριμένης τοποθεσίας.

Επίσης τέθηκε προτεραιότητα των οχημάτων που βρίσκονται στον κύριο δρόμο διπλής κυκλοφορίας: από σημείο 1 προς το σημείο 2 και αντίστροφα, σε σχέση με τα οχήματα που βρίσκονται στους υπόλοιπους δρόμους: πάροδοι μονής κυκλοφορίας.



Εικόνα 16 : Σημεία εκκίνησης (μαύρο) και μελέτης αλληλεπίδρασης (κόκκινο) των οδηγών

7.4.1.3 Δημιουργία σεναρίων αλληλεπίδρασης

Προτού προχωρήσουμε στο σχεδιασμό των σεναρίων αλληλεπίδρασης, χρειάζεται να θέσουμε τις γενικές παραμέτρους που ορίζουν την προσομοίωση.

- (1) Περίοδος: Η χρονική περίοδος που θα προσομοιωθεί συμπεριλαμβανομένης της περιόδου αρχικοποίησης. Μονάδα μέτρησης τα δευτερόλεπτα προσομοίωσης. Ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει είναι 4500s.
- (2) Ανάλυση προσομοίωσης: Εκφράζει το πόσες φορές σε ένα δευτερόλεπτο προσομοίωσης υπολογίζεται η θέση των οχημάτων. Όσο μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει αυτή η μεταβλητή, τόσο πιο ομαλή είναι η προσομοίωση. Συνήθως λαμβάνει τιμές μεταξύ 5 και 10.
- (3) Τυχαίος σπόρος (random seed): Η προσομοίωση τρέχει με τα ίδια αρχεία εισόδου και οι τυχαίοι σπόροι παράγουν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Για αξιόπιστα αποτελέσματα συνιστάται ο προσδιορισμός του αριθμητικού μέσου βάσει των αποτελεσμάτων πολλαπλών δοκιμών προσομοίωσης με διαφορετικές ρυθμίσεις τυχαίων σπόρων.
- (4) Ταχύτητα προσομοίωσης: Ο αριθμός των δευτερολέπτων προσομοίωσης ως προς τα πραγματικά δευτερόλεπτα.

Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων που τέθηκαν για την προσομοίωση.

Παράμετροι προσομοίωσης	
Περίοδος (simulation seconds)	30.000
Ανάλυση προσομοίωσης (time steps / Sim. sec.)	7
Τυχαίος σπόρος	42
Ταχύτητα προσομοίωσης (Sim sec. / s)	10

Πίνακας 7 : Παράμετροι προσομοίωσης

Το μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων που χρησιμοποιείται στο περιβάλλον VISSIM είναι το ψυχο-φυσικό μοντέλο που συστάθηκε αρχικά από τον Wiedemann το 1974 [37]. Από τότε το μοντέλο αναβαθμίζεται συνεχώς και προσαρμόζεται στα δεδομένα.

Δίνεται η δυνατότητα να τροποποιηθεί εξωτερικά η συμπεριφορά των οχημάτων της προσομοίωσης μέσω του εργαλείου DriverModel.dll. Επιλέχθηκε ωστόσο να χρησιμοποιηθεί το κλασσικό μοντέλο ακολουθίας αυτοκινήτων Wiedemann σε συνδυασμό με τον έλεγχο μέσω Matlab για συγκεκριμένες περιπτώσεις. Έτσι η κυκλοφορία των οχημάτων της προσομοίωσης VISSIM είναι η κλασσική και αναμενόμενη κατά την οποία οι οδηγοί δεν δύνανται να πάρουν πρωτοβουλίες. Δηλαδή δεν είναι ευφυή συστήματα αλλά ακολουθούν κάποιους μαθηματικούς κανόνες που τους υπαγορεύουν την απόσταση ή την ταχύτητά τους σε σχέση με άλλα οχήματα. Μόλις αυτά εισέλθουν σε μια κρίσιμη περιοχή που καθορίζεται

από τα όρια που επηρεάζονται από μία διασταύρωση, τότε ενεργοποιείται ο έλεγχος Matlab και τα οχήματα ακολουθούν τους κανόνες του προγράμματος του μοντέλου μας.

Η δημιουργία των σεναρίων αλληλεπίδρασης στα οποία θα εξεταστεί, ελεγχθεί και αναλυθεί η συμπεριφορά των οδηγών ελέγχου ως προς τα υπόλοιπα οχήματα παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

8

Σχεδιασμός αλγόριθμου για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος – άλλων οδηγών

Αξιοποιώντας κατάλληλα τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της μελέτης eye tracking που προηγήθηκε, ήμασταν σε θέση να σχεδιάσουμε ένα αλγόριθμο για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης ενός αυτόνομου οχήματος με άλλους οδηγούς, για εφαρμογή του στην προσομοίωση VISSIM για τα σενάρια διασταυρώσεων που εξετάσαμε.

Η προσομοίωση θα αφορά τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ενός οχήματος που οδηγείται από άνθρωπο, δηλαδή ο οδηγός ελέγχου είναι άνθρωπος, ως προς την αλληλεπίδρασή του με άλλα αυτόνομα οχήματα, αξιοποιώντας τα συμπεράσματα της μελέτης που προηγήθηκε.

Από την ανάλυση των ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων της μελέτης, εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα που αφορούν τις ενέργειες του οδηγού προτού πραγματοποιήσει μία στροφή:

- (1) Ο οδηγός ελέγχου αρχικά εξετάζει το γειτνιάζον περιβάλλον του αναγνωρίζοντας το σενάριο κυκλοφορίας. Για τις περιπτώσεις που εξετάζουμε, αυτό μπορεί να είναι
 - Δεξιά στροφή από πάροδο σε κύριο δρόμο
 - Αριστερή στροφή από κύριο δρόμο σε πάροδο

- (2) Ο οδηγός ελέγχου αναγνωρίζει τα άμεσα ή έμμεσα εμπλεκόμενα οχήματα ως προς την ενέργεια που πρόκειται να πραγματοποιήσει όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 12.
- (3) Ο χρόνος αναμονής του οχήματος ελέγχου στη διασταύρωση παίζει σημαντικό ρόλο στη λήψη απόφασης.
- (4) Ο οδηγός ελέγχου χρειάζεται να επιβεβαιώνει πως ο άμεσα εμπλεκόμενος οδηγός αναγνώρισε την πρόθεσή του, πριν πραγματοποιήσει την ενέργεια του. Επομένως χρειάζεται να επέλθει κοινή συμφωνία για την υλοποίηση της ενέργειας. Το γεγονός ότι για την περίπτωση που εξετάζουμε, παραδεχόμαστε ότι οι άμεσα εμπλεκόμενοι οδηγοί είναι αυτόνομα οχήματα, σε πραγματικά σενάρια, η επιβεβαίωση της αναγνώρισης της πρόθεσης του οδηγού μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εκπομπή κάποιου σήματος, πχ οπτικού, ακουστικού κ.α. Ωστόσο ακόμη και όταν επέλθει η συμφωνία μεταξύ των δύο οδηγών για την πραγματοποίηση μίας ενέργειας, ο οδηγός ελέγχου χρειάζεται να προσέχει και από τους υπόλοιπους, τους έμμεσα εμπλεκόμενους οδηγούς – πεζούς.
- (5) Η αλληλεπίδραση επηρεάζεται άμεσα από τυπικούς και άτυπους κανόνες μη λεκτικής επικοινωνίας και από την κατάσταση της κυκλοφοριακής συμφόρησης στο δρόμο

Αποδεικνύεται ότι η συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης δύο οδηγών που πλησιάζουν σε μία διασταύρωση, μπορεί να προσομοιωθεί κατάλληλα μέσω μίας συνάρτησης χρησιμότητας (Utility function). Στη συνέχεια λοιπόν, παρουσιάζονται η λειτουργία της συνάρτησης χρησιμότητας, όπως και τα βήματα που εκτελεί ο αλγόριθμος της προσομοίωσης, προκειμένου να λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις.

8.1 Χρήση της θεωρίας παιγνίων στη λήψη αποφάσεων

αυτόνομων συστημάτων

Το πρόβλημα του ταυτόχρονου προσανατολισμού και χαρτογράφησης (SLAM) με σκοπό το σχεδιασμό της πορείας που χρειάζεται να ακολουθήσει ένα αυτόνομο όχημα για να φτάσει στον προορισμό του, είναι αντικείμενο μελέτης αρκετά χρόνια, και έχει φτάσει σε ένα αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο εφαρμογής. Ωστόσο τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα αυτόνομα οχήματα κατά την αλληλεπίδρασή τους με άλλα οχήματα είναι πολύ δυσκολότερα τόσο ως προς τη μοντελοποίηση τους όσο και τη λύση τους.

Στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης, τα αυτόνομα οχήματα δεν αρκεί μόνο η ανατροφοδότηση από αισθητήρες ή χάρτες για τη λήψη αποφάσεων. Πρέπει να αντιμετωπίσουν άλλους παράγοντες, όπως ανθρώπινους οδηγούς και πεζούς και τελικά άλλα αυτόνομα οχήματα σε

πραγματικό χρόνο, όλα τα οποία μπορεί να είναι τουλάχιστον εξίσου "έξυπνα" και λογικά, σε ένα συνεχή ανταγωνισμό με αυτούς για χώρο, χρόνο και προτεραιότητα στο δρόμο [38].

Πρόσφατες μελέτες [39] έχουν δείξει ότι σε δοκιμές των αυτόνομων μίνι λεωφορείων, οι πεζοί εν γνώσει τους παρεμποδίζουν τα αυτόνομα οχήματα περίπου μία φορά κάθε τρεις ώρες. Μόλις οι οδηγοί του δρόμου συνειδητοποιήσουν ότι τα συστήματα ασφαλείας AV έχουν προγραμματιστεί να σταματούν εάν υπάρχει εμπόδιο στην πορεία τους, μπορούν γρήγορα να επωφεληθούν από αυτό και να πάρουν την προτεραιότητα μπροστά από το αυτόνομο όχημα, εμποδίζοντάς το και ωθώντας το να σταματήσει. Αν αυτό γίνει κοινή γνώση παντού, τότε τα αυτόνομα οχήματα θα έχουν κάνει μικρή ή καθόλου πρόοδο επειδή θα αναγκάζονται να ενδίδουν σε κάθε αλληλεπίδραση.

Έτσι η πρόβλεψη των προθέσεων των οδηγών ή πεζών που εμπλέκονται σε μια ενέργεια μπορεί να είναι ακόμη και μη υπολογίσιμη αφού θα χρειάζεται να προβλέπεται η μελλοντική συμπεριφορά πράγμα σχεδόν αδύνατο αφού το ανθρώπινο μυαλό είναι ίσως το πιο περίπλοκο αντικείμενο στον κόσμο.

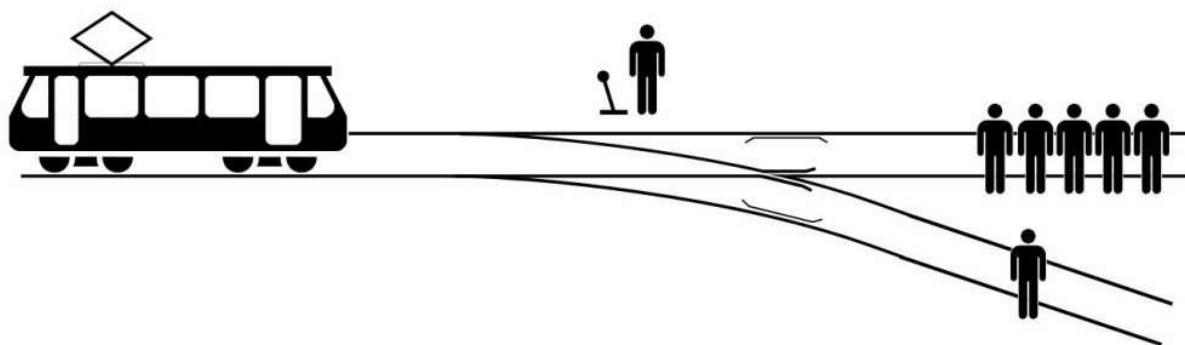
Η Θεωρία Παιγνίων παρέχει κάποιο πλαίσιο για τη διαχείριση τέτοιων αυτόνομων αποφάσεων. Ως θεωρία παιγνίων καλούμε το αντικείμενο μελέτης που αναλύει τη συμπεριφορά δύο ή περισσότερων ευφυών, λογικών συστημάτων ως προς τη συνεργασία ή σύγκρουσή τους στη λήψη αποφάσεων. Ένα σύστημα καλείται λογικό όταν λαμβάνει αποφάσεις για επίδιωξη των στόχων του. Σε ένα παίγνιο, τα αυτόνομα συστήματα λαμβάνουν αποφάσεις που επηρεάζουν τη χρησιμότητα και το κόστος των υπόλοιπων εμπλεκόμενων όπως γίνεται στην περίπτωση των αυτόνομων οχημάτων.

Κλασικό παράδειγμα, σχετικό με τις αποφάσεις που καλούνται να πάρουν τα αυτόνομα οχήματα, είναι το «παίγνιο της κότας» [38] στο οποίο δύο οδηγοί αυτοκινήτων κατευθύνονται ο ένας προς τον άλλο με ταχύτητα και αυτός που θα υποκύψει πρώτος στρίβοντας το τιμόνι είναι η «κότα», ωστόσο το κόστος και για τους δύο οδηγούς θα είναι πολύ μεγαλύτερο εάν δεν υποκύψει κανένας τους. Η θεωρία παιγνίων όμως, φαίνεται να είναι ατελής ως συντακτική θεωρία όταν υπάρχουν πολλαπλά και αντικρουόμενα προβλήματα, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση που ένας οδηγός έχει να αντιμετωπίσει πολλά οχήματα και πεζούς, με διαφορετική συμπεριφορά ο καθένας, ταυτόχρονα. Οι λύσεις στα προβλήματα θεωρίας παιγνίων συνήθως είναι υπολογιστικά εφικτές χρησιμοποιώντας συναρτήσεις κόστους ή χρησιμότητας. Στα πολλαπλά προβλήματα ωστόσο, είναι δύσκολη η κατάστρωση και η διατύπωση των προβλημάτων, πόσο μάλλον οι λύσεις τους.

8.2 Η λειτουργία της συνάρτησης χρησιμότητας

Η χρησιμότητα, αναφέρεται στην αξία που μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει ένα αγαθό ή μία ιδιότητα, ενώ η θεωρία της χρησιμότητας συχνά συναντάται στα πεδία των μαθηματικών, των οικονομικών και της ψυχολογίας για τα σενάρια της θεωρίας παιγνίων. Βασίζεται στο γεγονός ότι διαφορετικά αγαθά – ιδιότητες μπορεί να έχουν διαφορετική αξία ως προς το αντικείμενο που εξετάζουμε [40]. Για παράδειγμα, η προτίμηση των πορτοκαλιών σε σχέση με τα μήλα, προσδίδει για την ίδια ποσότητα, προστιθέμενη αξία – ωφέλεια στα πορτοκάλια.

Η χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας θεωρείται ιδανική σε προβλήματα ηθικής όπως αυτά που θα κληθεί να πάρει αρκετές φορές ένα αυτόνομο όχημα. Παράδειγμα αποτελεί το πρόβλημα του τρόλεϊ [41]. Τα φρένα ενός επιβατικού τρόλεϊ έχουν χαλάσει και υπάρχει ένας χειριστής ο οποίος θα κληθεί να επιλέξει να μην κάνει τίποτα με αποτέλεσμα να οδηγηθεί προς την πλευρά που θα σκοτώσει 5 ανθρώπους ή να ενεργοποιήσει το διακόπτη που θα αλλάξει πορεία στο τρόλεϊ και θα οδηγηθεί προς την κατεύθυνση που θα πεθάνει ένα μόνο άτομο. Έτσι έγκειται το ηθικό δίλημμα του να επιτρέψεις το θάνατο ή να προκαλέσεις το θάνατο.



Εικόνα 17 : Το πρόβλημα του τρόλεϊ

Η θεωρία χρησιμότητας είναι σε θέση να διαχειριστεί τέτοιου είδους προβλήματα ζυγίζοντας τα θετικά και τα αρνητικά κάθε πιθανού αποτελέσματος για την επιλογή της απόφασης που θα επιφέρει τη μεγαλύτερη ωφέλεια ή το μικρότερο κόστος. Αυτό στην πράξη σημαίνει πως η λιγότερο κακή επιλογή μπορεί και πάλι να έχει αποτέλεσμα την απώλεια ζωής.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία της συνάρτησης χρησιμότητας, και για ποιο λόγο η χρήση της φαντάζει ιδανική για το είδος του προβλήματος που προσπαθούμε να λύσουμε.

8.2.1 Η θεωρία της χρησιμότητας βασισμένη σε fuzzy λογική

Έστω X , το σύνολο των πιθανών εναλλακτικών λύσεων από το οποίο μπορεί να επιλέξει ένα σύστημα λήψης αποφάσεων. Κάποιες λύσεις είναι προτιμότερες από άλλες ή έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο κέρδος από άλλες [42].

Έστω $x \succcurlyeq y$ ότι δηλαδή η λύση x είναι τουλάχιστον προτιμότερο από τη λύση y , όπου $x, y \in X$. Το σύμβολο \succcurlyeq υποδηλώνει τη σειρά προτίμησης σε ένα σύνολο. Η προτίμηση βέβαια είναι σχετική. Εξαρτάται από την εφαρμογή των ιδιοτήτων που συγκρίνουμε.

Η χρησιμότητα, ή το κέρδος κάποιων ιδιοτήτων – αγαθών όμως, δεν μπορεί να μετρηθεί σε απόλυτες μονάδες παρά μόνο να εκτιμηθεί σχετικά έτσι ώστε να επιτρέπει συγκρίσεις. Έτσι αναπαριστούμε τη σχέση που εκφράζει τη σειρά προτίμησης κάποιων ιδιοτήτων, μέσω μίας συνάρτησης για την οποία θα ισχύει $x \succcurlyeq y \Rightarrow u(x) \geq u(y)$.

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας δεν είναι μοναδικές. Οποιαδήποτε σύνθεση συνάρτησης χρησιμότητας με αυστηρά αυξανόμενη σχέση είναι μια συνάρτηση χρησιμότητας που αντιπροσωπεύει την ίδια σχέση προτιμήσεων. Για ένα πεπερασμένο σύνολο X , υπάρχει πάντα μια τέτοια συνάρτηση ενώ δεν ισχύει το ίδιο για μη πεπερασμένο σύνολο.

Φυσικά σε πραγματικά σενάρια, τα αποτελέσματα ενός παιγνίου, ενδεχομένως να εξαρτώνται όχι μόνο από τις πράξεις του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων αλλά και από άλλα πολλά στοχαστικά γεγονότα.

Η χρήση fuzzy (ασαφών) συνόλων στη μοντελοποίηση επιτρέπει την εξέταση μη πλήρως καθορισμένων και δομημένων φαινομένων όπως είναι αυτό της αλληλεπίδρασης των οδηγών. Σε τέτοια φαινόμενα, η λογική δεν είναι δυαδική αλλά διαβαθμισμένη, καθώς υπάρχουν αρκετά ενδιάμεσα επίπεδα μεταξύ της εκτέλεσης ή μη μιας ενέργειας, που οφείλονται στην αβεβαιότητα ενός φαινομένου όπως η πρόβλεψη μελλοντικής συμπεριφοράς [43]. Παραδείγματα που εκφράζουν τη στοχαστική συμπεριφορά των οδηγών είναι όταν ένας οδηγός για οποιοδήποτε λόγο ενδεχομένως να βιάζεται, η ιδιοσυγκρασία του οδηγού, δηλαδή εάν είναι πιο επιθετικός σε σχέση με άλλους οδηγούς, η εκτίμηση ρίσκου κάθε οδηγού, όταν αποσπάται η προσοχή του στο δρόμο κ.α. Έτσι στη συνάρτηση χρησιμότητας εισάγουμε την εκτέλεση κάποιων ενεργειών ως πιθανότητα και όχι δυαδικότητα.

Έστω Z το σύνολο όλων των πιθανών αποτελεσμάτων και $\Delta(Z)$ το σύνολο των κατανομών πιθανοτήτων των αποτελεσμάτων του Z , από τις οποίες ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων χρειάζεται να εκφράσει τις προτιμήσεις του. Αυτή τη φορά δε θα εκφράσουμε τις προτιμήσεις

με μια συνάρτηση χρησιμότητας όπως προηγουμένως αλλά με τη λεγόμενη αναπαράσταση χρησιμότητας.

Εάν \succsim ικανοποιεί συγκεκριμένα αξιώματα, τότε μπορεί να αποδειχθεί ότι υπάρχει μία συνάρτηση χρησιμότητας $u : Z \rightarrow \mathfrak{R}$ για την οποία ισχύει $\forall p, q \in \Delta(Z), p \succsim q \Leftrightarrow E_p(u(z)) \geq E_q(u(z))$. Έτσι ένας λογικός λήπτης αποφάσεων μπορεί να παίρνει αποφάσεις που μεγιστοποιούν μία συγκεκριμένη αναμενόμενη χρησιμότητα.

8.2.2 Σχεδιασμός της συνάρτησης χρησιμότητας του προβλήματος μοντελοποίησης

Έχοντας λοιπόν το θεωρητικό υπόβαθρο της λειτουργίας της συνάρτησης χρησιμότητας, μπορούμε να καταστρώσουμε τη συνάρτηση χρησιμότητας που θα ικανοποιεί τις συνθήκες του προβλήματος μοντελοποίησης της αλληλεπίδρασης των οδηγών.

Στηριζόμενοι στην ανάλυση της μελέτης αλληλεπίδρασης οδηγών που προηγήθηκε, αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση χρησιμότητας του προβλήματος χρειάζεται να συμπεριλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- (1) Μια παράμετρος που θα εκφράζει τη διαφορά χρόνου ή/και απόστασης, επομένως ταχύτητας των οχημάτων A και B μέχρι να φτάσουν στη διασταύρωση – σύγκρουση, ή διαφορετικά time to collision (TTC). Παραδείγματα σεναρίων που αφορούν αυτή τη μεταβλητή, με σειρά αυτό που δίνει τη μικρότερη πιθανότητα ο B οδηγός να δώσει προτεραιότητα στον A, προς αυτό που δίνει μεγαλύτερη πιθανότητα, είναι:
 - (i) Ο B οδηγός θα φτάσει πρώτος στη διασταύρωση και έρχεται με μεγάλη ταχύτητα επιταχυνόμενα.
 - (ii) Ο B οδηγός θα φτάσει πρώτος στη διασταύρωση και έρχεται με μεγάλη ταχύτητα αλλά επιβραδυνόμενα.
 - (iii) Ο B οδηγός θα φτάσει πρώτος στη διασταύρωση και έρχεται με μικρή ταχύτητα.
 - (iv) Ο A οδηγός θα φτάσει πρώτος στη διασταύρωση.
- (2) Παράμετρος που εκφράζει κανόνες κοινωνικής συμμόρφωσης, το κοινωνικό καθήκον. Αυτοί οι κανόνες είναι άτυποι και πηγάζουν από παρατηρήσεις ή ακόμη και σχόλια των συμμετεχόντων στην έρευνα οδηγών. Αφορούν συμπεριφορές που με την εξέλιξη της οδηγικής νοοτροπίας, απορροφήθηκαν από την κοινωνία ως κοινωνικά ή ομαδικά πρότυπα [44], [45]. Αρχές που δείχνουν πώς οι άνθρωποι αναμένεται να

συμπεριφέρονται σε συγκεκριμένες κοινωνικές καταστάσεις. Στη μελέτη αλληλεπίδρασης οδηγών σε μια διασταύρωση συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ένας Α οδηγός, σταματημένος σε μία πάροδο δείχνοντας την πρόθεσή του προς τους ερχόμενους οδηγούς του κύριου δρόμου, να εισέλθει, για όσο περισσότερο χρόνο έδινε προτεραιότητα στα ερχόμενα οχήματα να περάσουν, τόσο αυξανόταν η πιθανότητα ένας Β οδηγός να υποκύψει και να σταματήσει δίνοντας τελικά την προτεραιότητα στον Α οδηγό. Ισχύει και το αντίθετο σενάριο, δηλαδή για όσο χρόνο ένας Β οδηγός έδινε προτεραιότητα στους Α οδηγούς να εισέλθουν στον κύριο δρόμο, τόσο μειωνόταν η πιθανότητα να υποκύψει και σε επόμενο οδηγό. Παραδείγματα σεναρίων που αφορούν αυτή τη μεταβλητή, με σειρά αυτό που δίνει τη μικρότερη πιθανότητα ο Β οδηγός να δώσει προτεραιότητα στον Α, προς αυτό που δίνει μεγαλύτερη πιθανότητα, είναι:

- (i) Πέρασαν ήδη 3 συνεχόμενα Α οχήματα.
 - (ii) Πέρασαν ήδη 2 συνεχόμενα Α οχήματα.
 - (iii) Πέρασε ένα Α όχημα.
 - (iv) Νέο ζευγάρι Α και Β οχήματος
 - (v) Πέρασε ένα Β όχημα.
 - (vi) Πέρασαν ήδη 2 συνεχόμενα Β οχήματα.
 - (vii) Πέρασαν ήδη 3 συνεχόμενα Β οχήματα.
- (3) Κόστος χρόνου / απόστασης, δηλαδή ποια θα είναι η χρονική καθυστέρηση για κάθε ένα από τους εμπλεκόμενους οδηγούς στην περίπτωση που υποκύψει στη διεκδίκηση προτεραιότητας ο Α ή αντίστοιχα ο Β οδηγός. Εισάγοντας αυτή την παράμετρο στη συνάρτηση χρησιμότητας, λαμβάνεται υπόψη και η ύπαρξη κίνησης στο δρόμο. Για παράδειγμα σε περίπτωση κίνησης μπροστά, αυτή η παράμετρος θα λαμβάνει χαμηλές τιμές αυξάνοντας τις πιθανότητες ο Β οδηγός να δώσει προτεραιότητα στον Α, αφού δεν χάνει σημαντικό χρόνο αφήνοντάς τον να περάσει. Αντιθέτως, σε περίπτωση που ο δρόμος μπροστά είναι ελεύθερος, τότε μειώνεται η πιθανότητα ο Β οδηγός να δώσει προτεραιότητα στον Α. Παραδείγματα σεναρίων που αφορούν αυτή τη μεταβλητή είναι:
- (i) Υπάρχει κίνηση μπροστά από το Β όχημα
 - (ii) Δεν υπάρχει κίνηση μπροστά από το Β όχημα
 - (iii) Πίσω από το Β όχημα ακολουθούν άλλα οχήματα
 - (iv) Δεν ακολουθούν άλλα οχήματα πίσω από το Β όχημα

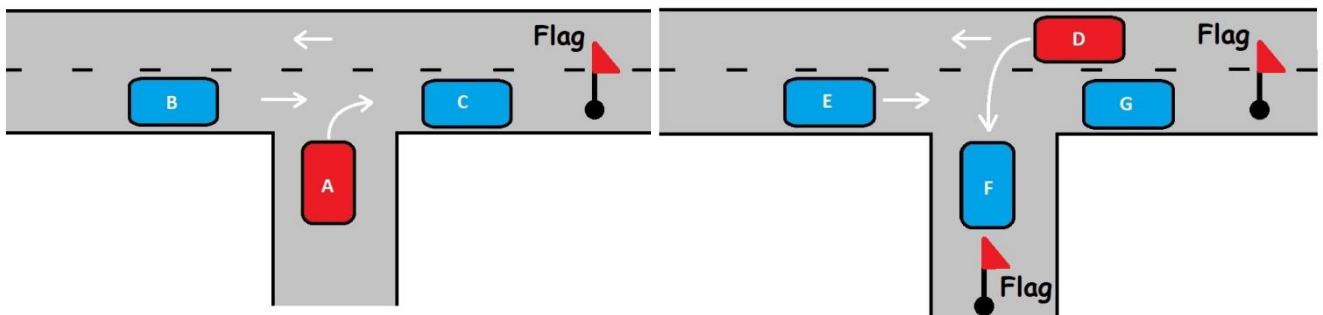
Παρατηρείται πως και οι 3 πιο πάνω παράμετροι σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με το χρόνο. Έτσι ο χρόνος έχει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό της συνάρτησης χρησιμότητας. Απαιτείται λοιπόν η εύρεση μιας συνάρτησης που θα ικανοποιεί τους πιο πάνω περιορισμούς και θα δίνει αποτελέσματα που θα μοντελοποιούν ρεαλιστικά τη συμπεριφορά προτεραιότητας των οδηγών σε μία διασταύρωση.

Προτείνεται ως μία συνάρτηση που μπορεί να περιγράψει αξιόπιστα και καθολικά την αλληλεπίδραση των οδηγών η εξής:

$$yieldingCost = \frac{t_A}{t_B + t_A} \in (0, 1)$$

Η συνάρτηση yieldCost εκφράζει το κόστος που θα έχει ενδεχόμενη απόδοση προτεραιότητας, από τον B στον A οδηγό επί τις εκατό (%). Επομένως αύξηση του yieldCost ισοδυναμεί με μείωση της πιθανότητας απόδοσης προτεραιότητας στον A οδηγό.

Στη συνάρτηση yieldCost, οι μεταβλητές t_A και t_B αντιπροσωπεύουν την εκτίμηση του συνολικού χρόνου των οχημάτων A και B ή αντίστοιχα D και E μέχρι να φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο δρόμο, που ονομάζουμε Flag όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Το σημείο Flag λήφθηκε σε τέτοια στρατηγική απόσταση από τα οχήματα A ή B ώστε η χρήση του να υποδεικνύει την ύπαρξη ή μη κίνησης στο δρόμο. Δηλαδή, συνεκτιμώντας τις ταχύτητες των οχημάτων A και B, εάν ο χρόνος αυτών να φτάσουν μέχρι το σημείο Flag είναι μεγαλύτερος του αναμενόμενου, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρχει μεγάλη πυκνότητα οχημάτων C για την περίπτωση δεξιάς στροφής ή G και F για την περίπτωση αριστερής στροφής και επομένως κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το σημείο Flag ορίστηκε στα 35m από το όχημα A ή B.



Εικόνα 18 : Σημεία Flag για τα σενάρια δεξιάς και αριστερής στροφής

Ο συνολικός χρόνος t_A και t_B λήφθηκε έτσι που να συμπεριλαμβάνει την παράμετρο της κοινωνικής συμμόρφωσης. Έτσι υπάρχουν τρία πιθανά σενάρια για τα οποία οι μεταβλητές t_A και t_B παίρνουν διαφορετικές τιμές.

8.2.2.1 Το όχημα A παραμένει το ίδιο για 2 ή περισσότερα διερχόμενα οχήματα B

Οι τιμές των t_A και t_B για αυτή την περίπτωση, διαμορφώνονται ως:

$$t_A = TimeToFlagA$$

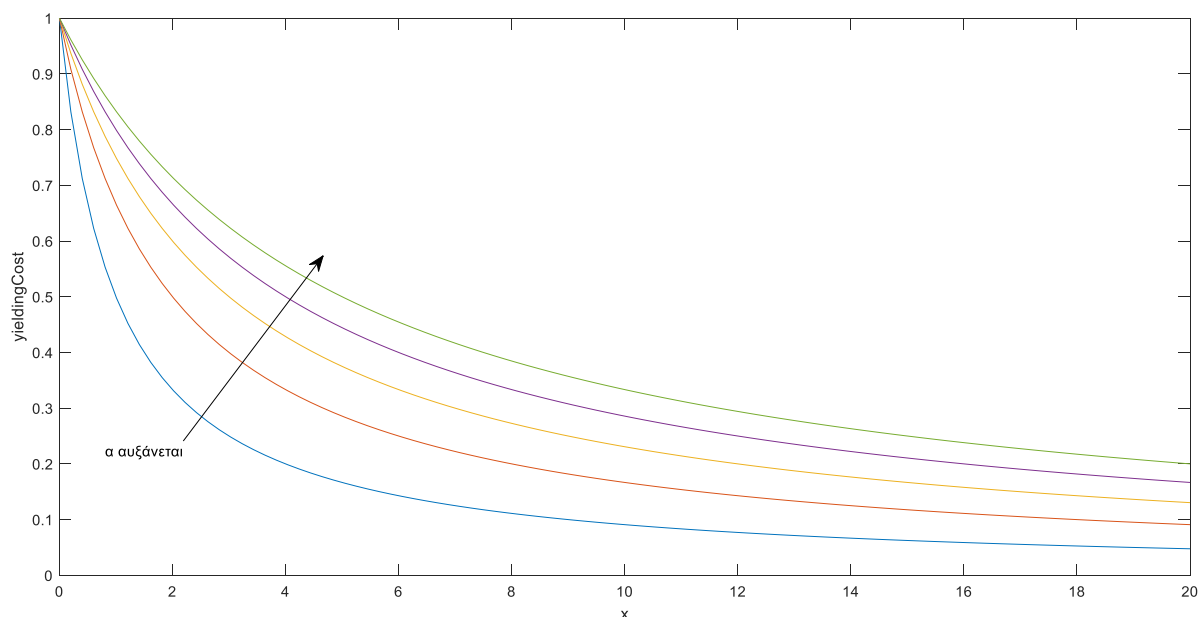
$$t_B = TimeToFlagB + PreviousTimeToFlagB \quad \text{όπου,}$$

- $TimeToFlag$ είναι ο χρόνος μέχρι το κάθε όχημα δυνητικά να φτάσει στο σημείο Flag,
- $PreviousTimeToFlag = \sum_{i=0}^k TimeToFlag_i$ είναι το σύνολο των χρόνων μέχρι το σημείο Flag κάθε διερχόμενου οχήματος B/A για όσο παραμένει σταματημένο το ίδιο όχημα A/B δίνοντας προτεραιότητα στα άλλα. Μέσω αυτής της μεταβλητής λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος κοινωνικής συμμόρφωσης.

Με αυτή τη δομή, η μεταβλητή t_A παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ η μεταβλητή t_B αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου και έτσι η συνάρτηση yieldCost λαμβάνει την εξής μορφή,

$$yieldingCost = \frac{a}{x + a}, \quad \begin{array}{l} a \text{ σταθερό} \\ x \text{ μεταβλητό} \end{array}$$

Στο Διάγραμμα 1 φαίνεται η σχέση της μεταβλητής yieldCost συναρτήσει του x, για διάφορες τιμές του a. Από αυτό, φαίνεται η ρεαλιστική συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης των οδηγών, κατά την οποία για όσο ένας οδηγός A παραμένει σταματημένος δίνοντας συνεχώς προτεραιότητα στα οχήματα B, τόσο περισσότερο μειώνεται το κόστος για έναν B οδηγό του να δώσει προτεραιότητα στον A, κυρίως λόγω των άτυπων κανόνων κοινωνικής συμμόρφωσης. Έτσι η πιθανότητα να πάρει την προτεραιότητα ο A οδηγός, αυξάνεται.



Διάγραμμα 1 : Μεταβλητή *yieldCost* συναρτήσει του *x* για την περίπτωση που το όχημα *A* παραμένει σταθερό

8.2.2.2 Το όχημα *B* παραμένει το ίδιο για 2 ή περισσότερα διερχόμενα οχήματα *A*

Οι τιμές των t_A και t_B για αυτή την περίπτωση, διαμορφώνονται ως:

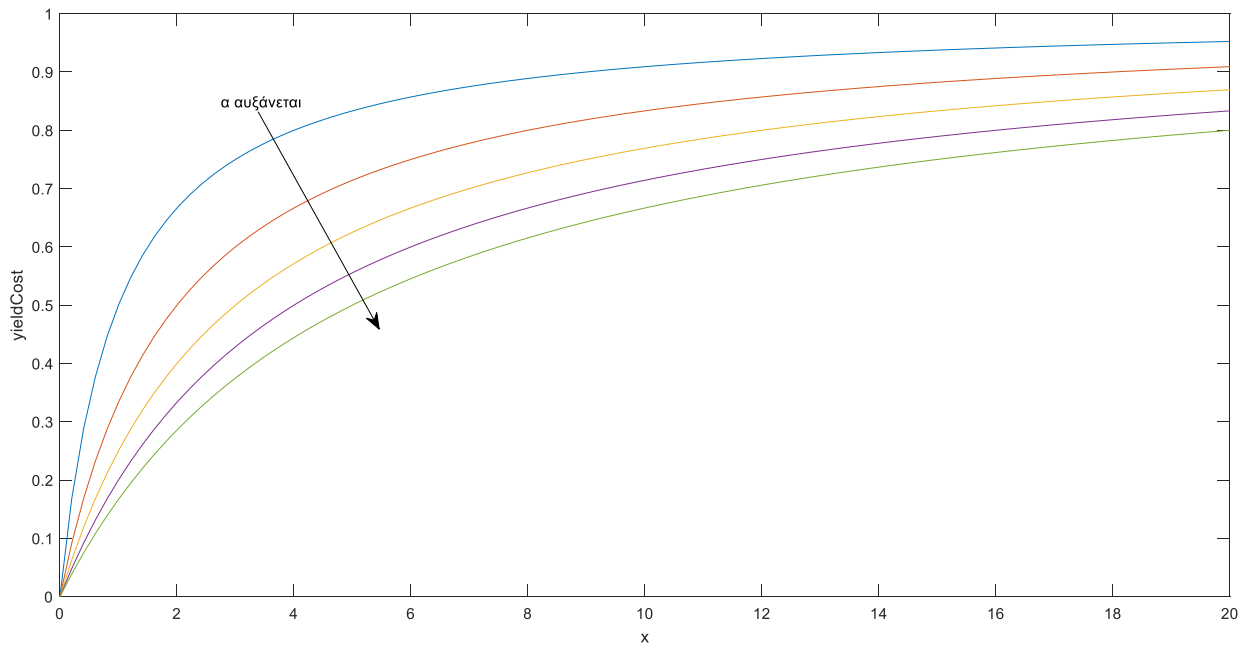
$$t_A = TimeToFlagA + PreviousTimeToFlagA$$

$$t_B = TimeToFlagB$$

Με αυτή τη δομή, η μεταβλητή t_B παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ η μεταβλητή t_A αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου και έτσι η συνάρτηση *yieldCost* λαμβάνει την εξής μορφή,

$$yieldingCost = \frac{x}{a + x}, \quad \begin{array}{l} a \text{ σταθερό} \\ x \text{ μεταβλητό} \end{array}$$

Στο Διάγραμμα 2 φαίνεται η σχέση της μεταβλητής *yieldCost* συναρτήσει του *x*, για διάφορες τιμές του *a*. Από αυτό, φαίνεται η ρεαλιστική συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης των οδηγών, κατά την οποία για όσο ένας οδηγός *B* παραμένει σταματημένος δίνοντας συνεχώς προτεραιότητα στα οχήματα *A*, τόσο περισσότερο αυξάνεται το κόστος για το *B* οδηγό να συνεχίσει να δίνει προτεραιότητα στους *A* οδηγούς λόγω των άτυπων κανόνων κοινωνικής συμμόρφωσης. Έτσι η πιθανότητα να πάρει την προτεραιότητα ο επόμενος *A* οδηγός, μειώνεται.



Διάγραμμα 2 : Μεταβλητή yieldCost συναρτήσει του x για την περίπτωση που το όχημα B παραμένει σταθερό

8.2.2.3 Αλληλεπίδραση νέου ζευγαριού, δηλαδή νέο όχημα A και B στη διασταύρωση

Οι τιμές των t_A και t_B για αυτή την περίπτωση, διαμορφώνονται ως:

$$t_A = TimeToFlagA$$

$$t_B = TimeToFlagB$$

Έτσι η συνάρτηση yieldCost για κάθε νέο ζευγάρι στη διασταύρωση, λαμβάνει συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες που επικρατούν εκείνη τη χρονική στιγμή, δηλαδή εάν υπάρχει κίνηση, εάν ένα από τα δύο οχήματα έρχεται με μεγάλη ταχύτητα κτλ.

Τελικά, η συνάρτηση χρησιμότητας μας δίνει μια εποπτική εικόνα της κατάστασης που επικρατεί σε κάθε αλληλεπίδραση οδηγών σε μία διασταύρωση, μοντελοποιώντας τη συμπεριφορά τους, παράγοντας ένα αριθμητικό αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει αμφιμονοσήμαντα την πιθανότητα ο οδηγός B να δώσει προτεραιότητα στον οδηγό A, στη βάση πάντα στοχαστικών γεγονότων μέσω fuzzy λογικής.

8.2.3 Σχέση που συνδέει τη συνάρτηση χρησιμότητας με την πιθανότητα

απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό

Λαμβάνοντας λοιπόν τιμές για τη συνάρτηση χρησιμότητας, σε κάθε περίπτωση αλληλεπίδρασης οδηγών σε μία διασταύρωση, χρειάζεται πλέον να δώσουμε μια προς μια αντιστοίχιση ώστε κάθε τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας να ισοδυναμεί στην πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό από τον Β (GrantPermissionProb).

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο δοκιμής και πλάνης προσαρτήσαμε τιμές πιθανότητας απόδοσης προτεραιότητας που παράγουν ρεαλιστικά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνονται στον Πίνακα 8. Η πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας συμβολίζεται ως $P(\text{GrantPermissionProb}=1)$ και μετριέται επί τοις εκατό (%).

Δεξιά στροφή			
yieldCost	P(GrantPermissionProb=1) (%)		
<0.2	80		
0.2 – 0.3	65		
0.3 – 0.5	45		
0.5 – 0.6	Ένα όχημα Β	Χωρίς κίνηση μπροστά	Με κίνηση μπροστά
	5	35	90
0.6 – 0.7	5	25	60
0.7 – 0.8	5	15	40
>0.8	5	10	30
Αριστερή στροφή			
yieldCost	P(GrantPermissionProb=1) (%)		
<0.1	95		
0.1 – 0.2	75		
0.2 – 0.3	55		
0.3 – 0.5	40		
0.5 – 0.6	Ένα όχημα Β	Χωρίς κίνηση μπροστά	Με κίνηση μπροστά
	5	30	90
0.6 – 0.7	5	20	70

0.7 – 0.8	5	10	40
> 0.8	5	5	30

Πίνακας 8 : Αντιστοιχία συνάρτησης χρησιμότητας – πιθανότητας απόδοσης προτεραιότητας στον οδηγό Α

Στον Πίνακα 8 παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στις τιμές των πιθανοτήτων για τις περιπτώσεις αριστερής και δεξιάς στροφής, προκειμένου να αναπαρασταθούν όσο ρεαλιστικά γίνεται. Παρατηρήθηκε ότι για τιμές της συνάρτησης yieldCost μεγαλύτερες του 0.5, η προτεραιότητα μεταξύ του Α και Β οδηγού είναι αμφίβολη και για το λόγο αυτό χωρίζεται σε 3 διαφορετικές περιπτώσεις,

- Όταν προσεγγίζει τη διασταύρωση ένα μόνο όχημα Β, τότε ο Α οδηγός σπάνια επιλέγει να βγει στον κύριο δρόμο
- Όταν μπροστά από το Β όχημα υπάρχει κίνηση, με αποτέλεσμα το κόστος του Β οδηγού να δώσει προτεραιότητα στον Α οδηγό είναι ελάχιστη, τις περισσότερες φορές των περιπτώσεων επιλέγει να δώσει προτεραιότητα
- Για όλες τις άλλες περιπτώσεις, η πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό είναι ανάλογη των συνθηκών.

8.3 Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος – άλλων οδηγών

Έχοντας κατασταλάξει στη λογική με την οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος μοντελοποίησης της αλληλεπίδρασης αυτόνομου οχήματος με άλλους οδηγούς, απομένει να καταστρώσουμε το λογικό διάγραμμα που θα επεξηγεί βήμα προς βήμα τη λογική του δόμησης.

Ο πρόγραμμα τρέχει συνεχώς για κάθε δευτερόλεπτο προσομοίωσης εκτελώντας κατ'επανάληψη τα ακόλουθα βήματα, μέχρι το πέρας που ορίσαμε αρχικά.

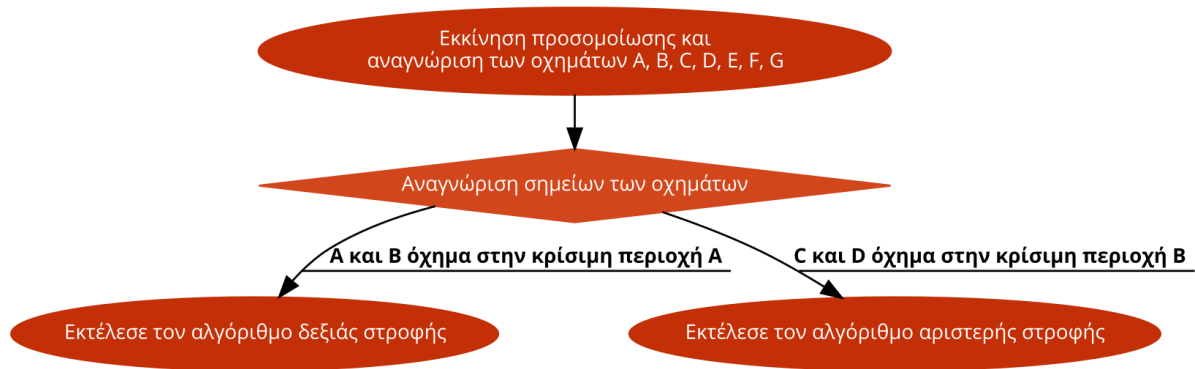
8.3.1 Αναγνώριση οχημάτων προσομοίωσης

Στο Σχήμα 8 φαίνεται το αρχικό πρόγραμμα αναγνώρισης της αλληλεπίδρασης των οχημάτων. Σε αυτό το βήμα ο αλγόριθμος αναγνωρίζει την παρουσία των οχημάτων Α, Β, C, D, E, F, G και προσαρτά σε ένα διάγραμμα τα χαρακτηριστικά κάθε οχήματος:

- Ταυτότητα οχήματος
- Είδος οχήματος
- Ταχύτητα οχήματος
- Θέση οχήματος

- Δρόμος στον οποίο βρίσκεται το όχημα
- Επιτάχυνση οχήματος

Στη συνέχεια, βάσει των απόλυτων θέσεων των οχημάτων, το βασικό πρόγραμμα χωρίζεται σε δύο υποπρογράμματα, δεξιάς ή αριστερής στροφής.



Σχήμα 6 : Λογικό διάγραμμα – αναγνώριση οχημάτων προσομοίωσης

8.3.2 Υποπρόγραμμα δεξιάς στροφής

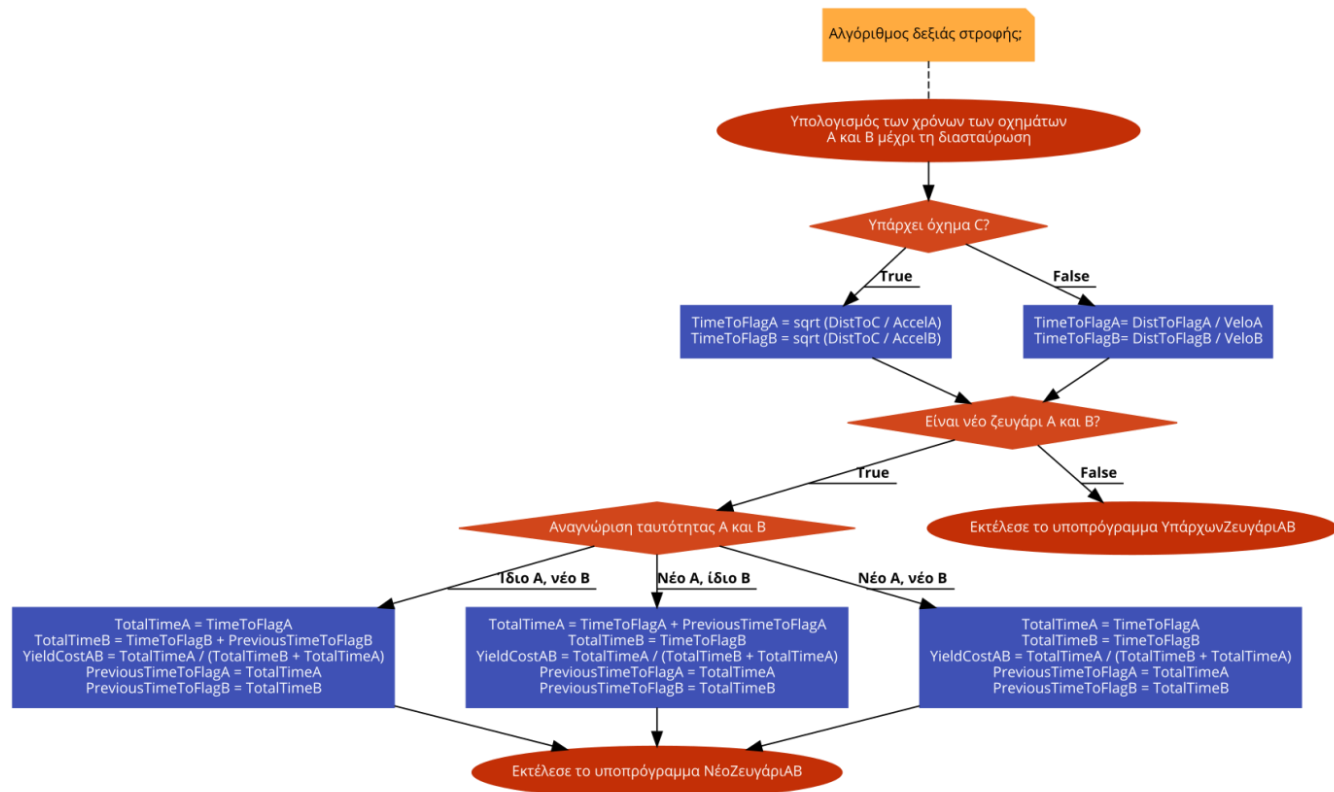
Σε περίπτωση που η αλληλεπίδραση οχημάτων πραγματοποιείται σε δεξιά στροφή, τότε ενεργοποιείται το υποπρόγραμμα δεξιάς στροφής. Σε αυτό, αρχικά υπολογίζονται οι χρόνοι TimeToFlag δηλαδή οι χρόνοι των οχημάτων A και B μέχρι αυτά να φτάσουν στο αντίστοιχο σημείο Flag συνυπολογίζοντας το εάν υπάρχει κίνηση μπροστά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνάρτηση yieldCost, για το συγκεκριμένο ζευγάρι οχημάτων A και B, αναλόγως της περίπτωσης στην οποία ανήκει,

- Το όχημα A παραμένει το ίδιο για 2 ή περισσότερα διερχόμενα οχήματα B
- Το όχημα B παραμένει το ίδιο για 2 ή περισσότερα διερχόμενα οχήματα A
- Αλληλεπίδραση νέου ζευγαριού, δηλαδή νέο όχημα A και νέο όχημα B στη διασταύρωση

Ο αλγόριθμος εκτελεί το υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών A, B όταν τα δύο οχήματα A και B εντοπιστούν για πρώτη φορά μέσα στην κρίσιμη περιοχή που ορίζουν τα όρια της δεξιάς στροφής. Εάν, κατά τη χρονική επανάληψη του αλγόριθμου αλληλεπίδρασης, τα δύο εμπλεκόμενα οχήματα είναι τα ίδια με αυτά της προηγούμενης επανάληψης τότε εκτελείται

το υποπρόγραμμα του υπάρχον ζευγαριού A, B.



Σχήμα 7 : Υποπρόγραμμα δεξιάς στροφής

8.3.2.1 Υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών A και B

Αφότου υπολογιστεί η συνάρτηση χρησιμότητας yieldCost για το ζευγάρι A και B, το υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών A και B προσαρτά σε αυτό την αντίστοιχη πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον A οδηγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Οι τιμές της πιθανότητας απόδοσης προτεραιότητας, καθορίζονται από τον Πίνακα 8. Σε επόμενη χρονική επανάληψη ο αλγόριθμος οδηγείται στην εκτέλεση του υποπρογράμματος υπάρχοντος ζευγαριού A και B.

8.3.2.2 Υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού οδηγών A και B

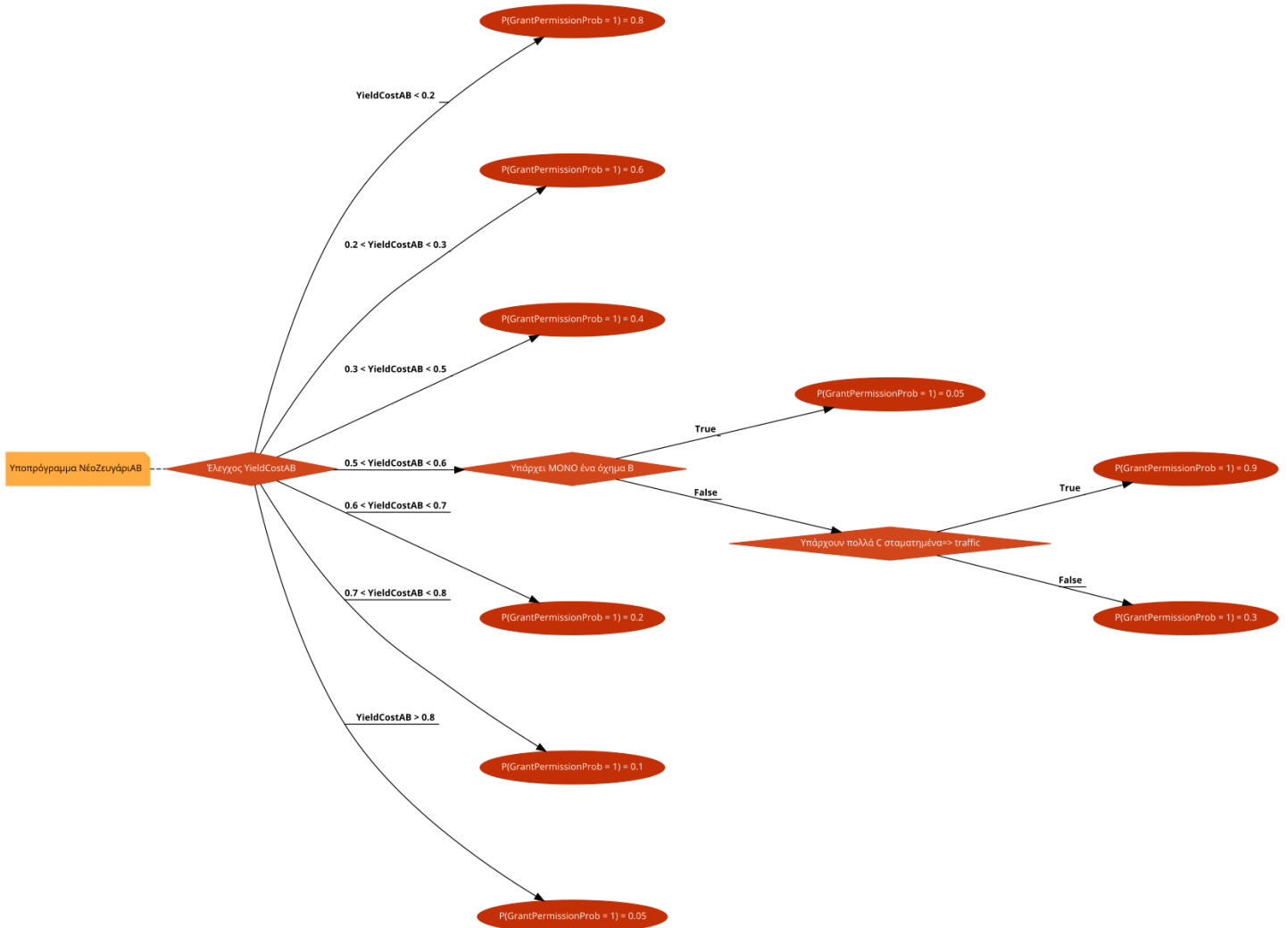
Μόλις το συγκεκριμένο ζευγάρι οδηγών A, B, λάβει την πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας που τους αναλογεί βάσει των χαρακτηριστικών τους, ο αλγόριθμος εκτελεί το υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού A, B. Σε αυτό, εξετάζεται η τιμή της μεταβλητής GrantPermissionProb. Εάν αυτή ισοδυναμεί με 1, αυτό σημαίνει επιτυχία και ο B οδηγός σταματάει δίνοντας την προτεραιότητα στον A οδηγό να εισέλθει στον κύριο δρόμο. Εάν υπάρχει όχημα C στο δρόμο που θέλει να στρίψει ο οδηγός A, τότε αυτός πηγαίνει με ταχύτητα ανάλογη με την απόσταση μεταξύ των οχημάτων A και C και της επιτρεπόμενης

$$U_A = \frac{X_C - X_A}{X_C} * U_{allowed}$$

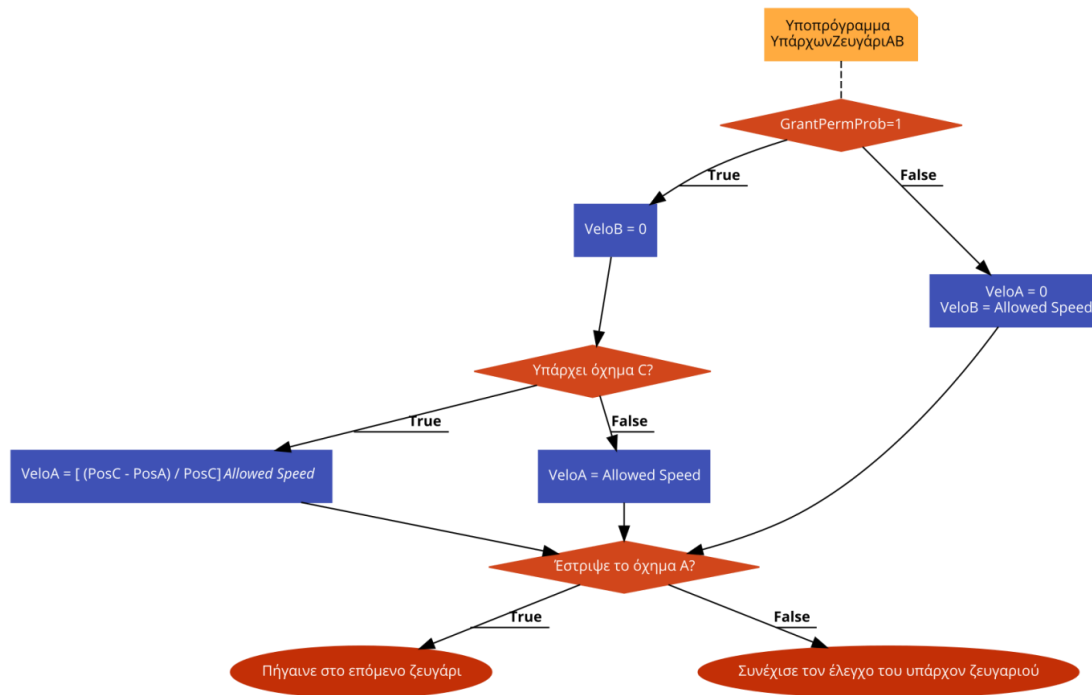
ταχύτητας σε αυτό τον δρόμο, , ενώ εάν εν υπάρχει όχημα C, τότε το A όχημα επιταχύνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει την επιτρεπόμενη ταχύτητα του δρόμου $U_A = U_{allowed}$

Όταν η μεταβλητή GrantPermProb ισοδυναμεί με 0, αυτό σημαίνει πως απέτυχε η προσπάθεια ο οδηγός A να πάρει προτεραιότητα, έτσι παραμένει σταματημένος στην πάροδο καθώς ο B οδηγός προχωράει κανονικά.

Όταν παρθούν οι αποφάσεις για τις νέες ταχύτητες των οχημάτων A και B, τότε το υποπρόγραμμα επαναλαμβάνεται για νέα οχήματα B έως ότου το όχημα A εισέλθει στον κύριο δρόμο και να επαναληφθεί η διαδικασία για νέο ζευγάρι οδηγών A και B. Το υποπρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 8 : Υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οχημάτων A και B



Σχήμα 9 : Υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού οδηγών Α και Β

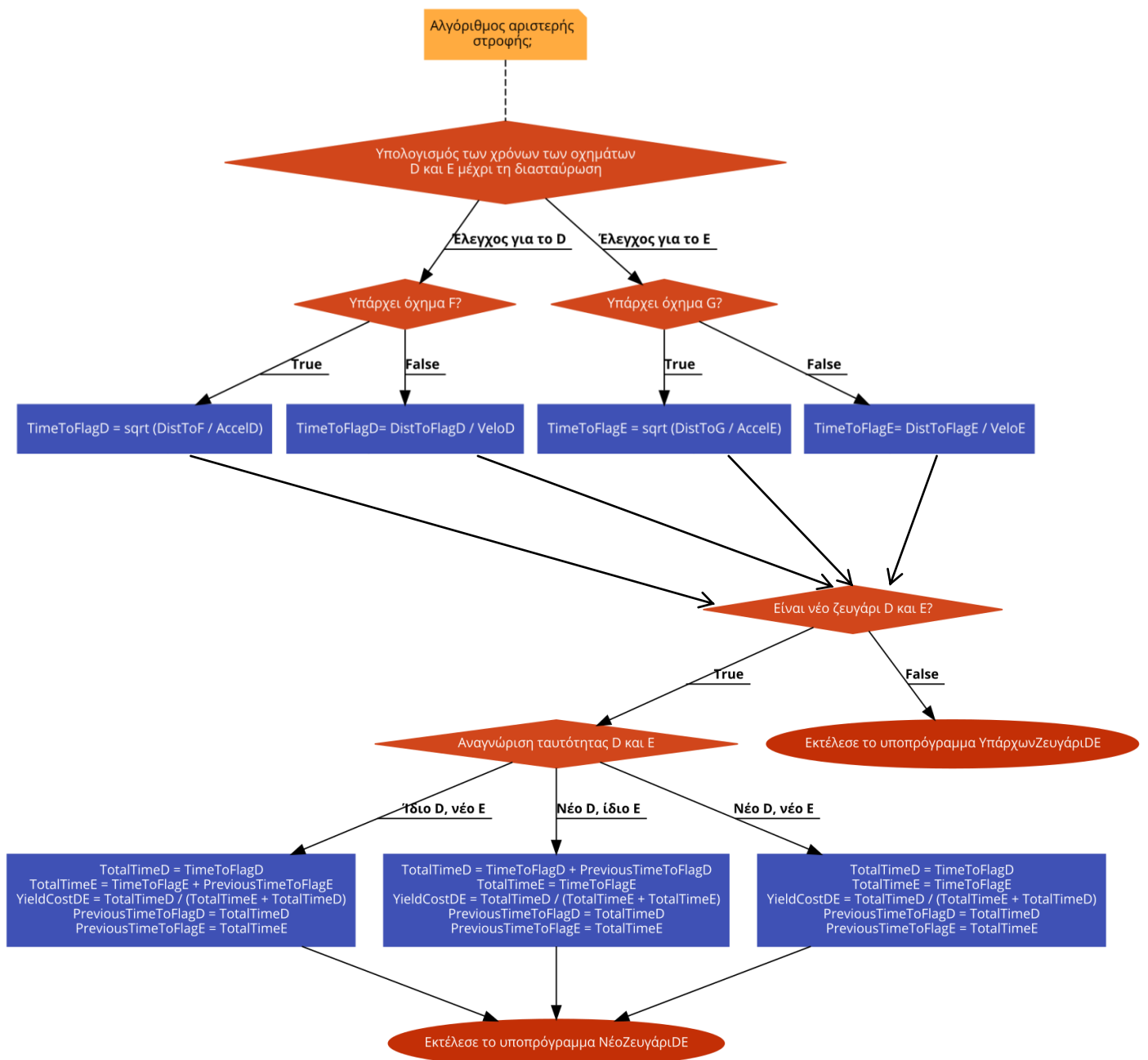
8.3.3 Υποπρόγραμμα αριστερής στροφής

Σε περίπτωση που η αλληλεπίδραση οχημάτων πραγματοποιείται σε αριστερή στροφή, τότε ενεργοποιείται το υποπρόγραμμα αριστερής στροφής. Σε αυτό, αρχικά υπολογίζονται οι χρόνοι TimeToFlag δηλαδή οι χρόνοι των οχημάτων D και E μέχρι αυτά να φτάσουν στο αντίστοιχο σημείο Flag συνυπολογίζοντας το εάν υπάρχει κίνηση μπροστά από αυτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνάρτηση yieldCost, για το συγκεκριμένο ζευγάρι οχημάτων D και E, αναλόγως της περίπτωσης στην οποία ανήκει,

- Το όχημα D παραμένει το ίδιο για 2 ή περισσότερα διερχόμενα οχήματα E
- Το όχημα E παραμένει το ίδιο για 2 ή περισσότερα διερχόμενα οχήματα D
- Αλληλεπίδραση νέου ζευγαριού, δηλαδή νέο όχημα D και νέο όχημα E στη διασταύρωση

Ο αλγόριθμος εκτελεί το υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών D, E όταν τα δύο οχήματα D και E εντοπιστούν για πρώτη φορά μέσα στην κρίσιμη περιοχή που ορίζουν τα όρια της αριστερής στροφής. Εάν, κατά τη χρονική επανάληψη του αλγόριθμου αλληλεπίδρασης, τα δύο εμπλεκόμενα οχήματα είναι τα ίδια με αυτά της προηγούμενης επανάληψης τότε εκτελείται το υποπρόγραμμα του υπάρχον ζευγαριού D, E.

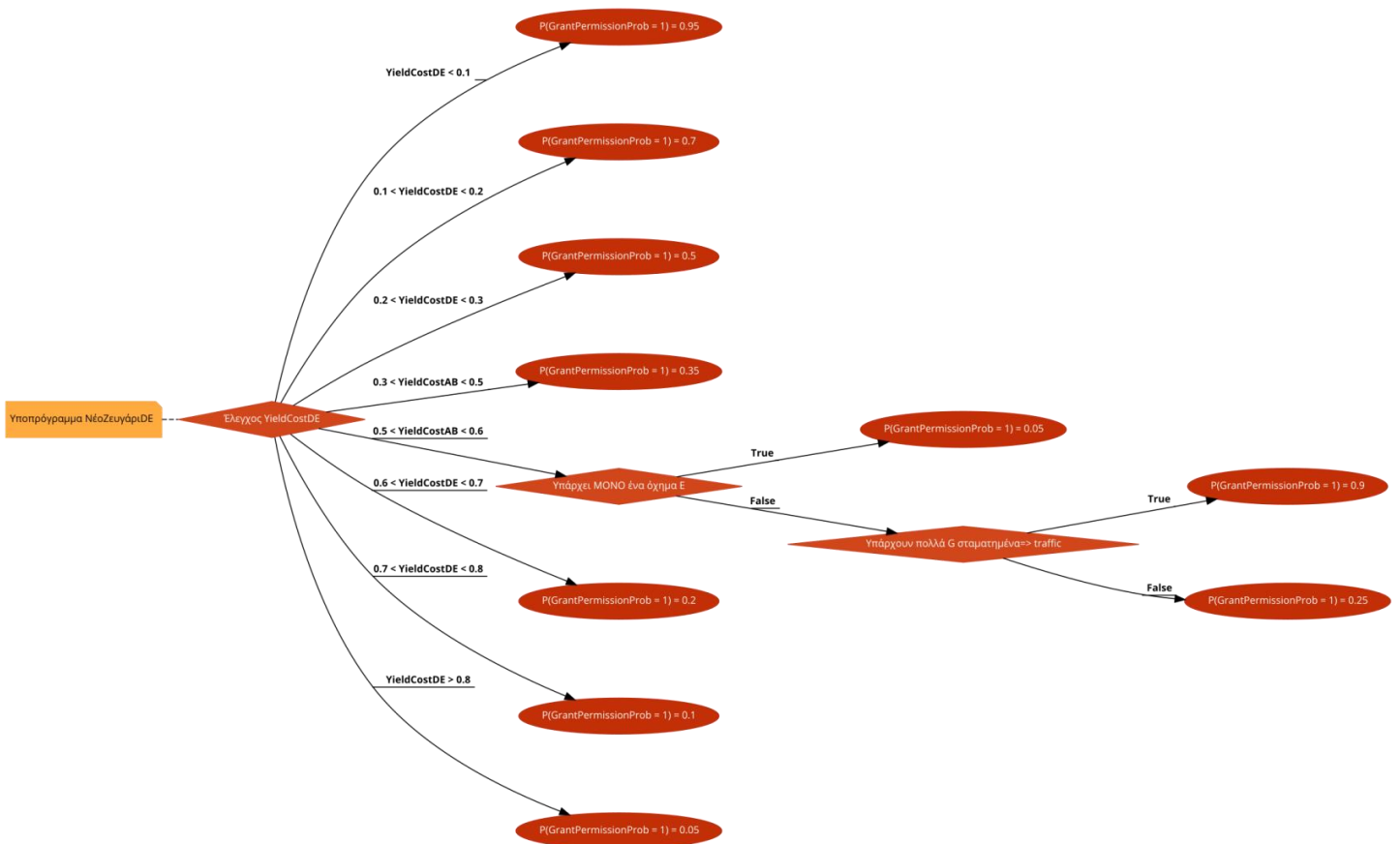


Σχήμα 10 : Υποπρόγραμμα αριστερής στροφής

8.3.3.1 Υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών D και E

Αφού υπολογιστεί η συνάρτηση χρησιμότητας yieldCost για το ζευγάρι D και E, το υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών D και E προσαρτά σε αυτό την αντίστοιχη πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον D οδηγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Οι τιμές της πιθανότητας απόδοσης προτεραιότητας, καθορίζονται από τον Πίνακα 8. Σε επόμενη

χρονική επανάληψη ο αλγόριθμος οδηγείται στην εκτέλεση του υποπρογράμματος υπάρχοντος ζευγαριού D και E.



Σχήμα 11 : Υποπρόγραμμα νέου ζευγαριού οδηγών D και E

8.3.3.2 Υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού οδηγών D και E

Μόλις το συγκεκριμένο ζευγάρι οδηγών D, E, λάβει την πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας που τους αναλογεί βάσει των χαρακτηριστικών τους, ο αλγόριθμος εκτελεί το υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού D, E. Σε αυτό, εξετάζεται η τιμή της μεταβλητής GrantPermissionProb. Εάν αυτή ισοδυναμεί με 1, αυτό σημαίνει επιτυχία και ο E οδηγός σταματάει δίνοντας την προτεραιότητα στον D οδηγό να περάσει από τη λωρίδα του για να στρίψει στην πάροδο από τον κύριο δρόμο. Εάν υπάρχει όχημα F στο δρόμο που θέλει να στρίψει ο οδηγός D, τότε αυτός πηγαίνει με ταχύτητα ανάλογη με την απόσταση μεταξύ των

οχημάτων D και F και της επιτρεπόμενης ταχύτητας σε αυτό τον δρόμο,

$$U_D = \frac{X_F - X_D}{X_F} * U_{allowed}$$

, ενώ εάν δεν υπάρχει όχημα F, τότε το D όχημα επιταχύνεται

$$U_D = U_{allowed}$$

σταδιακά μέχρι να φτάσει την επιτρεπόμενη ταχύτητα του δρόμου .

Όταν η μεταβλητή GrantPermProb ισοδυναμεί με 0, αυτό σημαίνει πως απέτυχε η προσπάθεια ο οδηγός D να πάρει προτεραιότητα, έτσι παραμένει σταματημένος στον κύριο δρόμο καθώς ο E οδηγός προχωράει κανονικά. Εάν υπάρχει G όχημα μπροστά από το E όχημα, τότε ο E οδηγός πηγαίνει με ταχύτητα ανάλογη με την απόσταση μεταξύ των οχημάτων E και G και της επιτρεπόμενης ταχύτητας σε αυτό τον δρόμο,

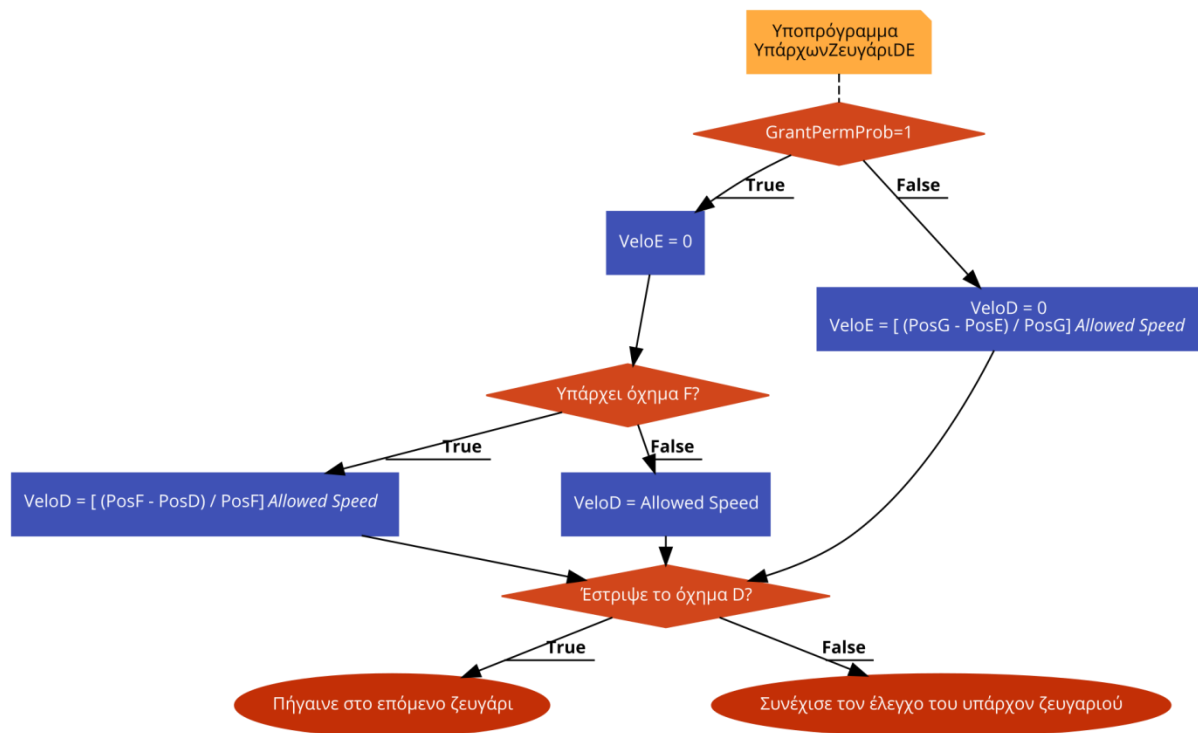
$$U_E = \frac{X_G - X_E}{X_G} * U_{allowed}$$

, ενώ εάν δεν υπάρχει όχημα G, τότε το E όχημα επιταχύνεται

$$U_E = U_{allowed}$$

σταδιακά μέχρι να φτάσει την επιτρεπόμενη ταχύτητα του δρόμου .

Όταν παρθούν οι αποφάσεις για τις νέες ταχύτητες των οχημάτων D και E, τότε το υποπρόγραμμα επαναλαμβάνεται για νέα οχήματα E έως ότου το όχημα D στρίψει στην πάροδο και να επαναληφθεί η διαδικασία για νέο ζευγάρι οδηγών D και E. Το υποπρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 12 : Υποπρόγραμμα υπάρχοντος ζευγαριού οδηγών D και E

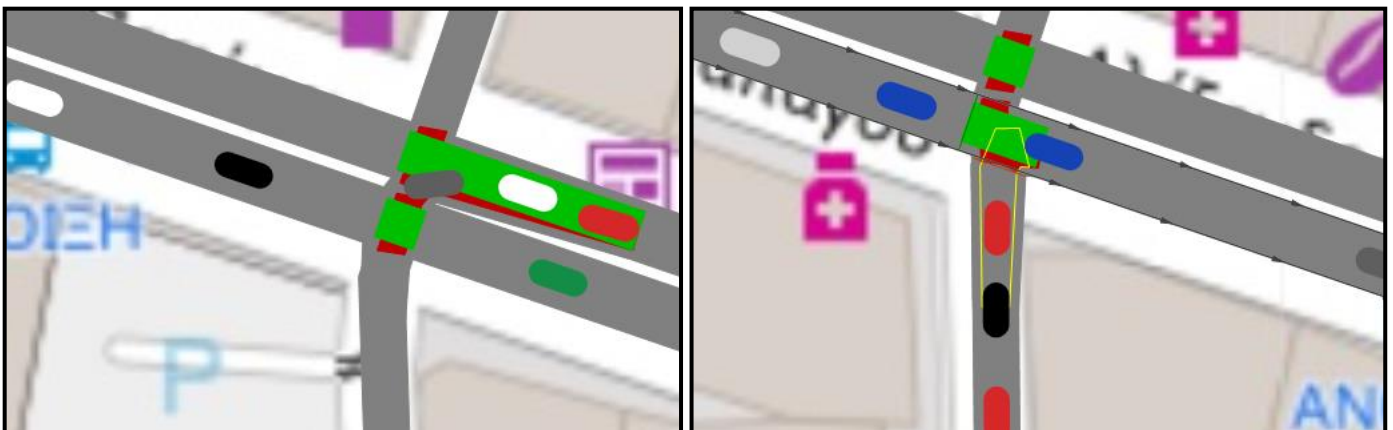
9

Εκτέλεση και αποτελέσματα της προσομοίωσης της μοντελοποίησης αλληλεπίδρασης οδηγού – αυτόνομου οχήματος

Σε προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσαμε τη δομή και τη λογική στην οποία βασίζεται ο αλγόριθμος της προσομοίωσης. Το περιβάλλον προσομοίωσης VISSIM συνδέθηκε με το περιβάλλον προγραμματισμού Matlab για τον έλεγχο και την επίβλεψη της προσομοίωσης. Εκτελέστηκε η προσομοίωση σύμφωνα με τις παραμέτρους του Πίνακα 7, για αρκετές επαναλήψεις. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε υπό ιδιαίτερες συνθήκες αφού μια ομάδα οχημάτων, τα οχήματα ελέγχου, εκτελούσαν μια κυκλική επαναλαμβανόμενη διαδρομή κατά την οποία υποβλήθηκαν σε ελεγχόμενες αλληλεπιδράσεις με άλλους οδηγούς στις διασταυρώσεις. Επίσης μία άλλη ομάδα οχημάτων, των υπόλοιπων οδηγών, εκτελούσε μία συγκεκριμένη μη κυκλική διαδρομή στην οποία ερχόταν σε αλληλεπίδραση με τα οχήματα ελέγχου. Η μεγάλη διάρκεια προσομοίωσης όπως και οι ιδιαίτερες συνθήκες στις οποίες υποβλήθηκε η προσομοίωση, επέτρεψε την εξέταση διαφόρων καταστάσεων κίνησης στο δρόμο, καλύπτοντας ένα μεγάλο φάσμα της οδικής κυκλοφορίας όπως:

- Είσοδος οχήματος από πάροδο σε ελεύθερο κύριο δρόμο
- Είσοδος οχήματος από πάροδο σε κύριο δρόμο με κίνηση

- Είσοδος οχήματος από πάροδο σε κύριο δρόμο, με ένα ερχόμενο στη διασταύρωση όχημα
- Είσοδος οχήματος από πάροδο σε κύριο δρόμο, με πολλά ερχόμενα στη διασταύρωση οχήματα
- Στροφή οχήματος από κύριο δρόμο σε αντίθετη πάροδο, με κίνηση στην αντίθετη λωρίδα του δρόμου
- Στροφή οχήματος από κύριο δρόμο σε αντίθετη πάροδο, χωρίς κίνηση στην αντίθετη λωρίδα του δρόμου
- Στροφή οχήματος από κύριο δρόμο σε αντίθετη πάροδο, με ένα ερχόμενο στη διασταύρωση όχημα
- Στροφή οχήματος από κύριο δρόμο σε αντίθετη πάροδο, με πολλά ερχόμενα στη διασταύρωση οχήματα
- Στροφή οχήματος από κύριο δρόμο σε ελεύθερη αντίθετη πάροδο



Εικόνα 19 : Στιγμιότυπα από την προσομοίωση αριστερής και δεξιάς στροφής αντίστοιχα

Κατά τη διάρκεια αλλά και με το πέρας της προσομοίωσης, εξήχθησαν κάποια αποτελέσματα για το χαρακτηρισμό της αποτελεσματικότητας και της ρεαλιστικής αναπαράστασης της προσομοίωσης σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα της μελέτης αλληλεπίδρασης οδηγών.

9.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης δεξιάς στροφής από πάροδο σε κύριο δρόμο

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση των αλληλεπιδράσεων δεξιάς στροφής.

Χαρακτηριστικό		Τιμή
Αριθμός αλληλεπιδράσεων A – B οχημάτων		152
Αριθμός περιπτώσεων απόδοσης προτεραιότητας από τον B στον A οδηγό		56
Αριθμός περιπτώσεων απόδοσης προτεραιότητας από τον B στον A οδηγό με κίνηση στον κύριο δρόμο		5
Αριθμός περιπτώσεων μη απόδοσης προτεραιότητας από τον B στον A οδηγό με κίνηση στον κύριο δρόμο		4
Αριθμός περιπτώσεων που ο A οδηγός πήρε προτεραιότητα μετά από 1, 2, 3, 4, 5 ή 6 συνεχόμενα B οχήματα	1 B όχημα	7
	2 B οχήματα	29
	3 B οχήματα	15
	4 B οχήματα	8
	5 B οχήματα	2
Αριθμός περιπτώσεων που ο B οδηγός έδωσε προτεραιότητα σε 1, 2 ή 3 συνεχόμενα A οχήματα	1 A όχημα	49
	2 A οχήματα	44
	3 A οχήματα	5

Πίνακας 9 : Αποτελέσματα προσομοίωσης δεξιάς στροφής

Από τον Πίνακα 9 μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της χρήσης των παραμέτρων που λήφθηκαν υπόψη στην κατάστρωση της συνάρτησης χρησιμότητας. Αυτά είναι η επίδραση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, και της κοινωνικής συμμόρφωσης των οδηγών που υποδεικνύει τον άτυπο κανόνα απόδοσης προτεραιότητας σε ένα A/B οδηγό όσο αυτός έδινε προτεραιότητα σε όλο και περισσότερα B/A οχήματα.

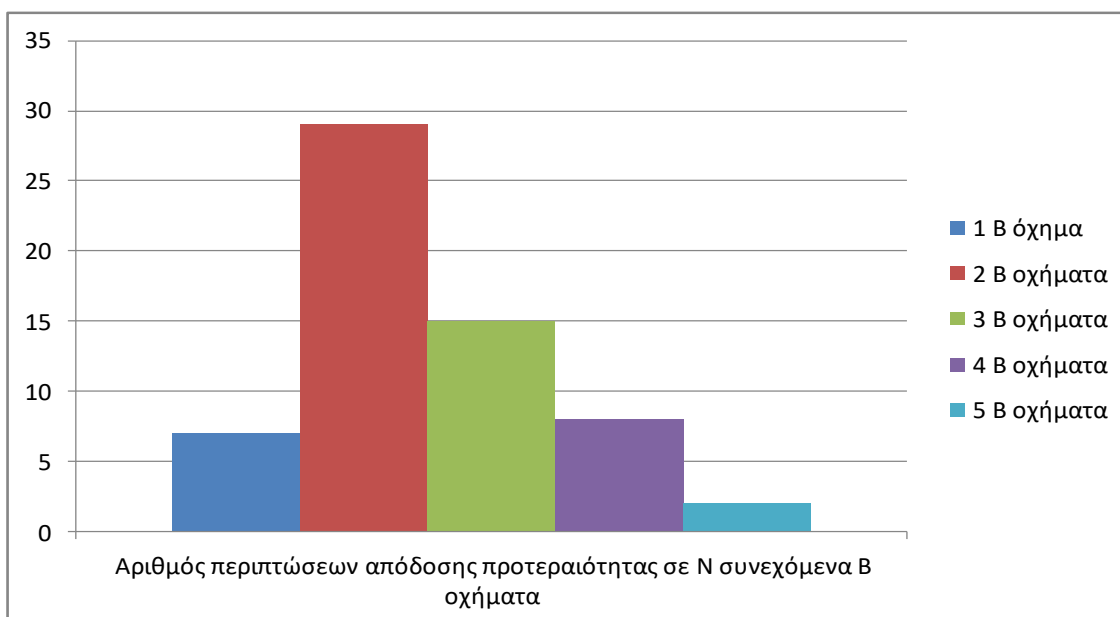
Συγκεκριμένα, σε σύνολο 152 αλληλεπιδράσεων A και B οδηγών, ο B έδωσε προτεραιότητα στον A οδηγό σε 56 περιπτώσεις δηλαδή σε ποσοστό 37%. Αυτό εάν συγκριθεί με το ποσοστό 48% που βρήκαμε κατά τη μελέτη eye tracking και αλληλεπίδρασης των οδηγών σε πραγματικές συνθήκες, μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό και ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Η απόκλιση θα εξηγηθεί σε επόμενο εδάφιο.

Σε σύνολο 9 περιπτώσεων που υπήρχε κίνηση μπροστά, ο Β έδωσε προτεραιότητα στον Α οδηγό σε 5 από αυτές, δηλαδή σε ποσοστό 54%. Αυτό επιβεβαιώνει ότι σε περιπτώσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης, το ποσοστό απόδοσης προτεραιότητας σε Α οδηγό αυξάνεται σε σύγκριση με τον ελεύθερο δρόμο μπροστά από το Β όχημα.

Επίσης παρατηρείται ισορροπία στον αριθμό των περιπτώσεων που ο Α οδηγός πήρε προτεραιότητα μετά από 1, 2, 3, 4 ή 5 συνεχόμενα Β οχήματα. Συγκεκριμένα ο αριθμός των περιπτώσεων που ο Α οδηγός πήρε την προτεραιότητα μετά από 1 Β όχημα είναι μικρότερος ή ίσος από αυτές που πήρε μετά από 2 ή 3 οχήματα. Αυτό δικαιολογείται με το γεγονός ότι η κίνηση στον κύριο δρόμο, δηλαδή αυτή των Β οχημάτων, είναι σημαντικότερη και επομένως έχει την προτεραιότητα σε σύγκριση με την κίνηση προς παρακείμενους δρόμους, δηλαδή στροφές σε πάροδο. Έτσι ο Α οδηγός δίνει προτεραιότητα σε συνεχόμενα Β οχήματα να περάσουν.

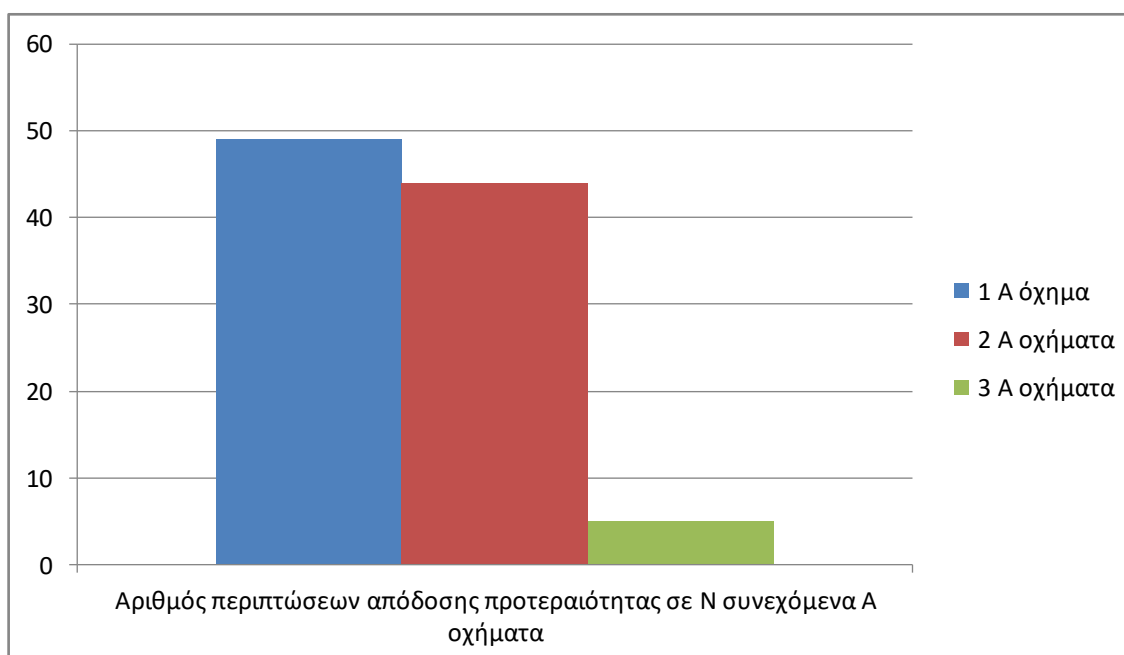
Ωστόσο παρατηρείται να μειώνεται η εμφάνιση των περιπτώσεων απόδοσης προτεραιότητας στο Α όχημα όσο ο αριθμός των συνεχόμενων Β οχημάτων αυξάνεται μέχρις ότου να μηδενιστεί πλήρως. Αυτό δικαιολογείται με το γεγονός ότι οι άτυποι κανόνες κοινωνικής συμμόρφωσης επιτάσσουν στους οδηγούς να δίνουν προτεραιότητα στον άλλο οδηγό, όσο αυτός αφήνει όλο και περισσότερα οχήματα να περάσουν.

Μάλιστα τα πιο πάνω στατιστικά αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού εμφανίζουν ομοιότητες με την κατανομή Poisson, κατά την οποία προβλέπεται ο αριθμός των γεγονότων που παρατηρούνται με την πάροδο του χρόνου. Στο Διάγραμμα 3 φαίνεται η κατανομή των γεγονότων κατά την απόδοση προτεραιότητας στον Α οδηγό μετά από 1, 2, 3, 4 ή 5 συνεχόμενα Β οχήματα.



Διάγραμμα 3 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό μετά από N Β οχήματα

Αντιθέτως, ο Β οδηγός σε 1 περίπτωση έδωσε προτεραιότητα σε 4 συνεχόμενα Α οχήματα ενώ για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις δεν άφησε περισσότερα από 3 συνεχόμενα Α οχήματα να εισέλθουν στον κύριο δρόμο, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4. Μάλιστα το 95% των περιπτώσεων συγκεντρώνεται στην απόδοση προτεραιότητας σε ένα μόνο ή 2 συνεχόμενα Α οχήματα. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο αφού πιο δύσκολα θα δώσουν προτεραιότητα οι Β οδηγοί σε συνεχόμενα Α οχήματα απ' ότι θα συμβεί το αντίθετο. Ο λόγος είναι, σύμφωνα και με μαρτυρίες των οδηγών στη μελέτη eye tracking, ότι οι Β οδηγοί, δίνοντας προτεραιότητα σε άλλα οχήματα κόβουν την κανονική κυκλοφορία του κύριου δρόμου, αναγκάζοντάς τους να μην είναι τόσο υποχωρητικοί, σε αντίθεση με τους Α οδηγούς.



Διάγραμμα 4 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον Β οδηγό μετά από N Α οχήματα

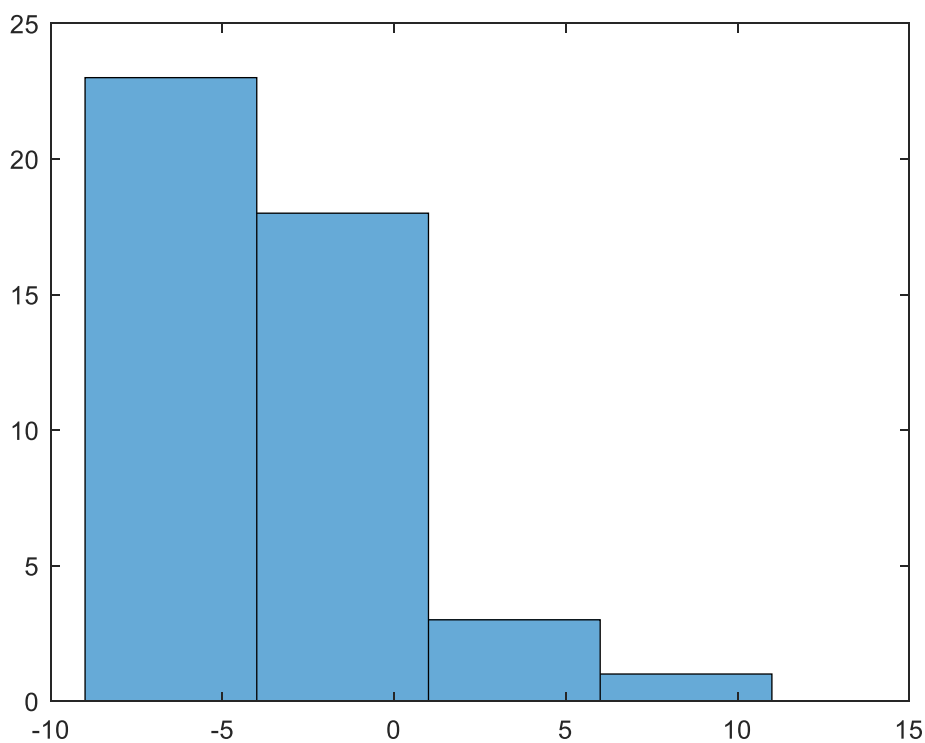
Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό. Αυτές είναι:

- Μέγιστη τιμή
- Ελάχιστη τιμή
- Μέσος όρος
- Διάμεσος (median)
- Μεταβλητότητα
- Διακύμανση (variance)

Μέγιστος TTC	Ελάχιστος TTC	Μέσος TTC	Διάμεσος TTC (median)	Μεταβλητότητα TTC	Διακύμανση TTC (variance)
7.14	-7.63	-3.63	-4.13	3.24	10.47

Πίνακας 10 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό

Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό, από το οποίο μπορούν να επαληθευτούν οπτικά οι στατιστικές παρατηρήσεις που προαναφέρθηκαν. Η διαφορά των TTC ορίζεται ως $TTC_A - TTC_B$.



Διάγραμμα 5 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό

Από τον Πίνακα 10 και το Διάγραμμα 5 παρατηρούμε ότι όπως ήταν αναμενόμενο, η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τιμών διαφοράς TTC Α και Β οχημάτων, για τις οποίες δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό, βρίσκεται στον αρνητικό άξονα με τον μέσο όρο να βρίσκεται στα -3.63 δευτερόλεπτα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όταν το Α όχημα κατέφθανε στη διασταύρωση κατά μέσο όρο 3.63 δευτερόλεπτα γρηγορότερα από το Β όχημα, υπήρχε μεγάλη πιθανότητα να πάρει προτεραιότητα.

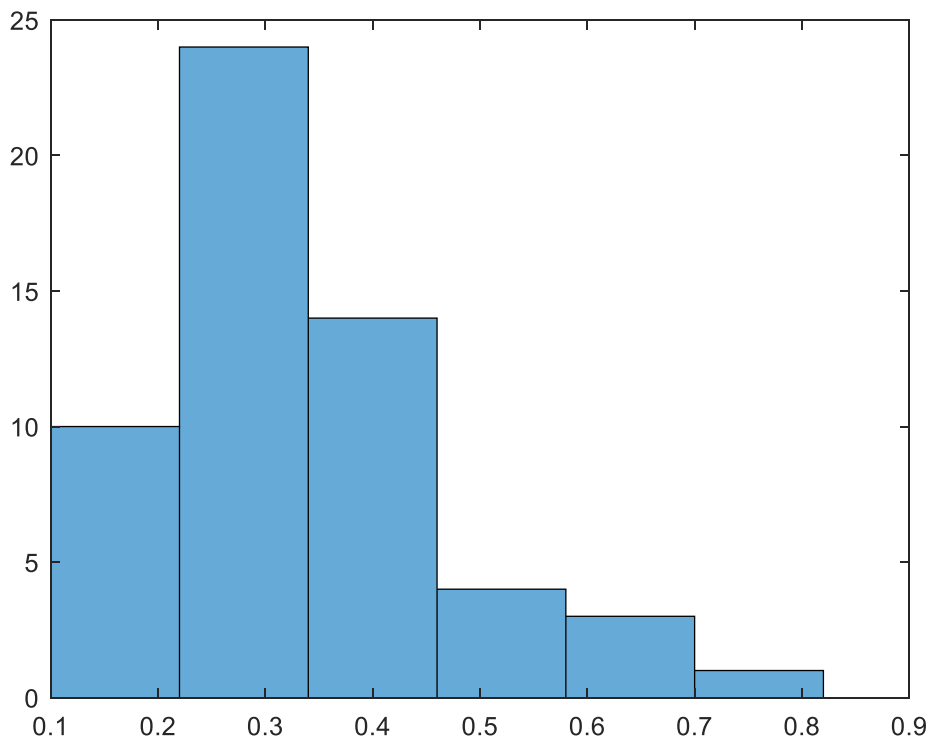
Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι για την κατάστρωση των στατιστικών για τους χρόνους TTC, απομονώσαμε τις τιμές λαμβάνοντας τις πιο σημαντικές που κυμαίνονται γύρω από το 0, αφού οι αλληλεπιδράσεις με διαφορά μεγαλύτερη ή μικρότερη των ± 10 δευτερολέπτων, αφορούν εξαιρετικές περιπτώσεις που προκαλούνται από έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση στον δρόμο. Σε τέτοιες περιπτώσεις η προτεραιότητα δίνεται με διαφορετική προσέγγιση απ' ότι στο μοντέλο μας.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό.

Μέγιστη yieldCost	Ελάχιστη yieldCost	Μέση yieldCost	Διάμεσος yieldCost (median)	Μεταβλητότητα yieldCost	Διακύμανση yieldCost (variance)
0.8126	0.1626	0.3347	0.2940	0.1297	0.0168

Πίνακας 11 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό, από το οποίο μπορούν να επαληθευτούν οπτικά οι στατιστικές παρατηρήσεις που προαναφέρθηκαν



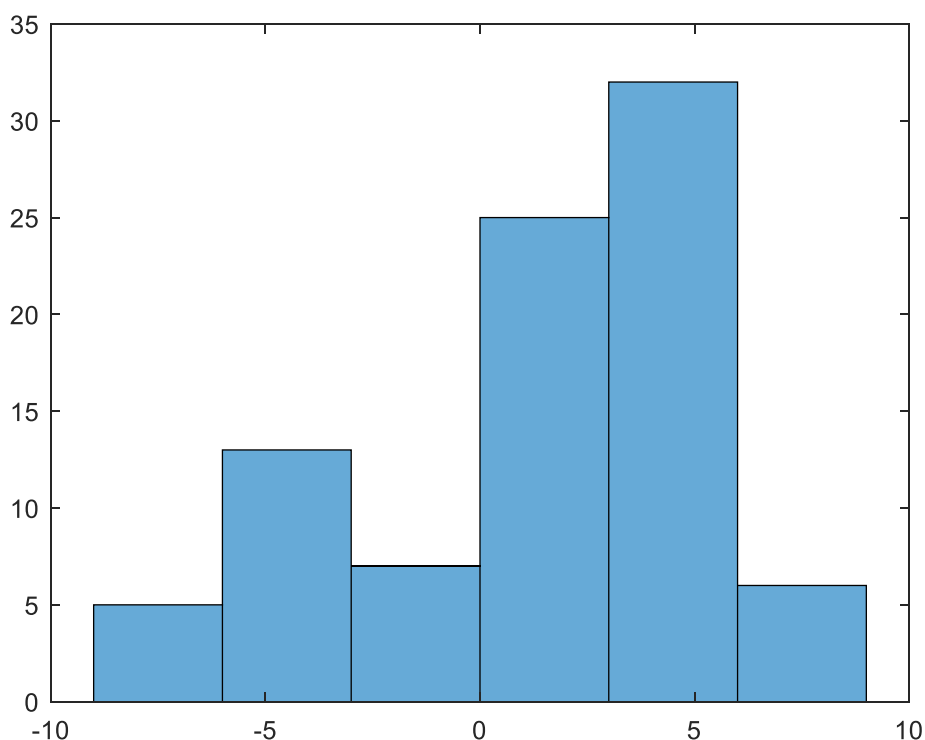
Διάγραμμα 6 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό

Από τον Πίνακα 11 και το Διάγραμμα 6, συμπεραίνουμε πως η μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών της συνάρτησης χρησιμότητας $yieldCost$ για τις οποίες δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό είναι μέχρι $yieldCost = 0.4$ με μέσο όρο 0.3347.

Εργαζόμαστε όμοια για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό, εξετάζοντας και πάλι τις στατιστικές παρατηρήσεις που εξάγονται από την εξέταση της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων Α και Β. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 και το Διάγραμμα 7.

Μέγιστος TTC	Ελάχιστος TTC	Μέσος TTC	Διάμεσος TTC (median)	Μεταβλητότητα TTC	Διακύμανση TTC (variance)
7.34	-7.64	1.22	2.46	4.01	16.06

Πίνακας 12 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό



Διάγραμμα 7 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων Α και Β, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό

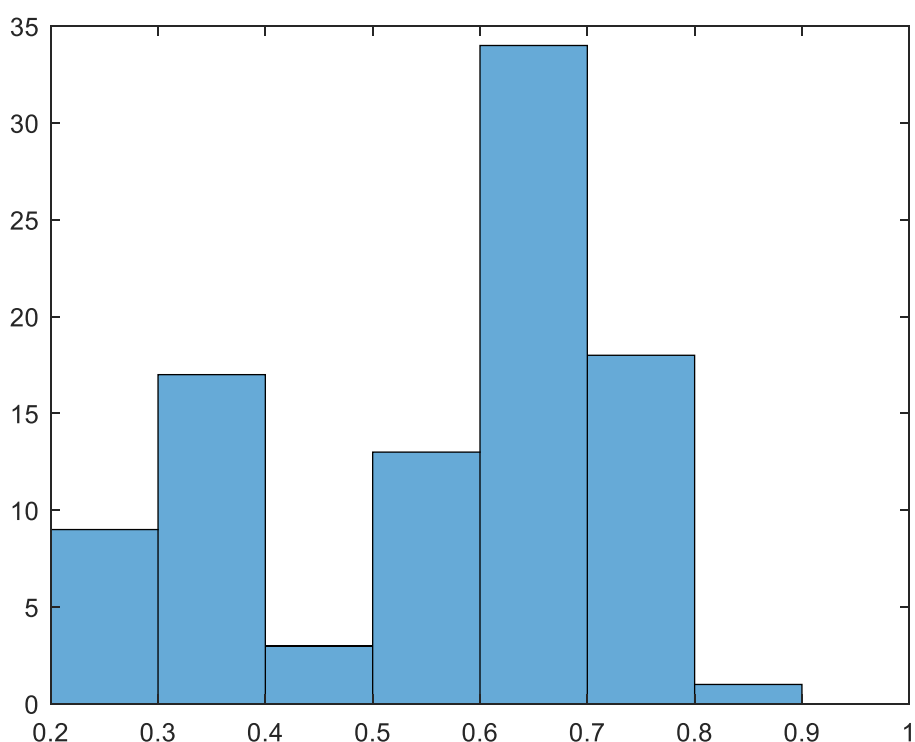
Από τον Πίνακα 12 και το Διάγραμμα 7 παρατηρούμε ότι ο αριθμός των περιπτώσεων για τις οποίες δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό, συγκεντρώνεται γύρω στις τιμές 0-5 διαφορά TTC των οχημάτων Α και Β με μέσο όρο 1.22 δευτερόλεπτα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι

όταν το όχημα Α θα έφτανε στη διασταύρωση κατά μέσο όρο 1.22 δευτερόλεπτα αργότερα από το Β όχημα, είχε μεγάλη πιθανότητα να μην του δοθεί προτεραιότητα.

Οι στατιστικές παρατηρήσεις της συνάρτησης χρησιμότητας *yieldCost* για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό, παρουσιάζονται στον Πίνακα 13 και το Διάγραμμα 8.

Μέγιστη <i>yieldCost</i>	Ελάχιστη <i>yieldCost</i>	Μέση <i>yieldCost</i>	Διάμεσος <i>yieldCost</i> (median)	Μεταβλητότητα <i>yieldCost</i>	Διακύμανση <i>yieldCost</i> (variance)
0.8313	0.2021	0.5583	0.6192	0.1744	0.0304

Πίνακας 13 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας *yieldCost* για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό



Διάγραμμα 8 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης χρησιμότητας *yieldCost* για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον Α οδηγό

Από τον Πίνακα 13 και το Διάγραμμα 8 παρατηρούμε ότι για τιμές *yieldCost* από 0.5 – 0.8 με μέσο όρο $yieldCost = 0.5583$, υπήρχε μεγάλη πιθανότητα να μη δοθεί η προτεραιότητα στον Α οδηγό.

Να σημειωθεί ότι η συγκριτικά μεγάλη συγκέντρωση των τιμών *yieldCost* στα 0.2 – 0.4 οφείλεται στη διαφορετική πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό και στη διαφορετική συχνότητα εμφάνισης της κάθε τιμής που έχει ανά 0.1 η συνάρτηση *yieldCost*.

Για παράδειγμα για τιμές $yieldCost = 0.2 \div 0.3$ σε 27% των περιπτώσεων δε δόθηκε προτεραιότητα ενώ για τιμές $yieldCost = 0.5 \div 0.6$ σε 77% των περιπτώσεων δε δόθηκε προτεραιότητα, ακόμη και αν στο Διάγραμμα 8, το ιστόγραμμά τους έχει συγκρίσιμο μέγεθος.

Συνολικά, για τιμές κάτω του $yieldCost = 0.5$, δόθηκε προτεραιότητα σε 62% των περιπτώσεων ενώ για τιμές άνω του 0.5 δόθηκε προτεραιότητα σε 11% των περιπτώσεων.

9.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης αριστερής στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο

Επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία αξιολόγησης αποτελεσμάτων και για τις περιπτώσεις αριστερής στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις αλληλεπιδράσεις αριστερής στροφής.

Χαρακτηριστικό		Τιμή
Αριθμός αλληλεπιδράσεων D – E οχημάτων		67
Αριθμός περιπτώσεων απόδοσης προτεραιότητας από τον E στον D οδηγό		24
Αριθμός περιπτώσεων απόδοσης προτεραιότητας από τον E στον D οδηγό με κίνηση στον κύριο δρόμο		13
Αριθμός περιπτώσεων μη απόδοσης προτεραιότητας από τον E στον D οδηγό με κίνηση στον κύριο δρόμο		21
Αριθμός περιπτώσεων που ο D οδηγός πήρε προτεραιότητα μετά από 1, 2, 3, 4, 5 ή 6 συνεχόμενα E οχήματα	1 E όχημα	16
	2 E οχήματα	11
	3 E οχήματα	2
	4 E οχήματα	2
	5 E οχήματα	3
Αριθμός περιπτώσεων που ο E	1 D όχημα	39

οδηγός έδωσε προτεραιότητα σε 1, 2 ή 3 συνεχόμενα D οχήματα	2 D οχήματα	9
	3 D οχήματα	2
	4 D οχήματα	1

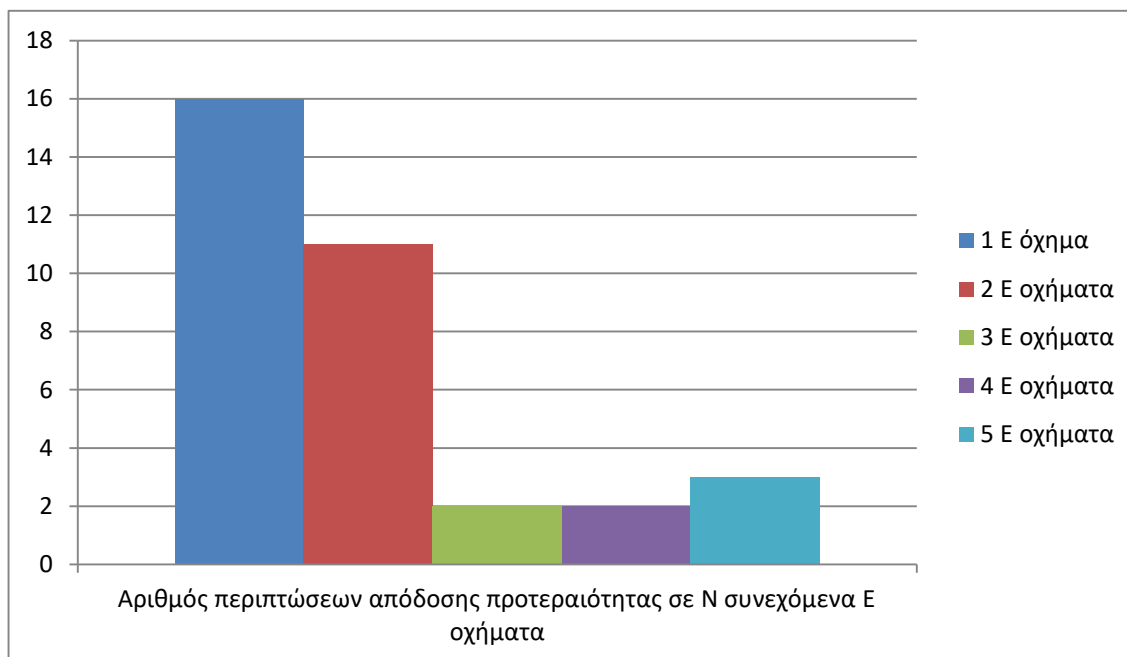
Πίνακας 14 : Αποτελέσματα προσομοίωσης αριστερής στροφής

Από τον Πίνακα 14 παρατηρούμε ότι σε σύνολο 67 αλληλεπιδράσεων D και E οδηγών, ο E έδωσε προτεραιότητα στον D οδηγό 24 φορές δηλαδή σε ποσοστό 35.8%. Αυτό εάν συγκριθεί με το ποσοστό 42% που βρήκαμε κατά τη μελέτη eye tracking και αλληλεπίδρασης των οδηγών σε πραγματικές συνθήκες, μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό και ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Η διαφορά των δύο τιμών θα αναφερθεί σε επόμενο εδάφιο.

Το ποσοστό 35.8% είναι επίσης σχεδόν ίσο με το 37% που παρατηρείται στις περιπτώσεις απόδοσης προτεραιότητας στον A οδηγό για δεξιά στροφή. Ο λόγος της ισορροπίας των δύο τιμών είναι ότι παρόλο που ο D οδηγός χρειάζεται να πράξει τη στροφή προς την πάροδο το συντομότερο, για να μην εμποδίζει τον κύριο δρόμο, αυτό εξισορροπείται από το γεγονός ότι είναι δυσκολότερο για τον D οδηγό να στρίψει σε σχέση με τον A οδηγό. Αυτό οφείλεται στο ότι ο D οδηγός διακόπτει την κίνηση της αντίθετης λωρίδας μέχρι να στρίψει, ενώ ο A οδηγός εισέρχεται στην λωρίδα. Έτσι τα δύο ποσοστά λαμβάνουν παρόμοιες τιμές.

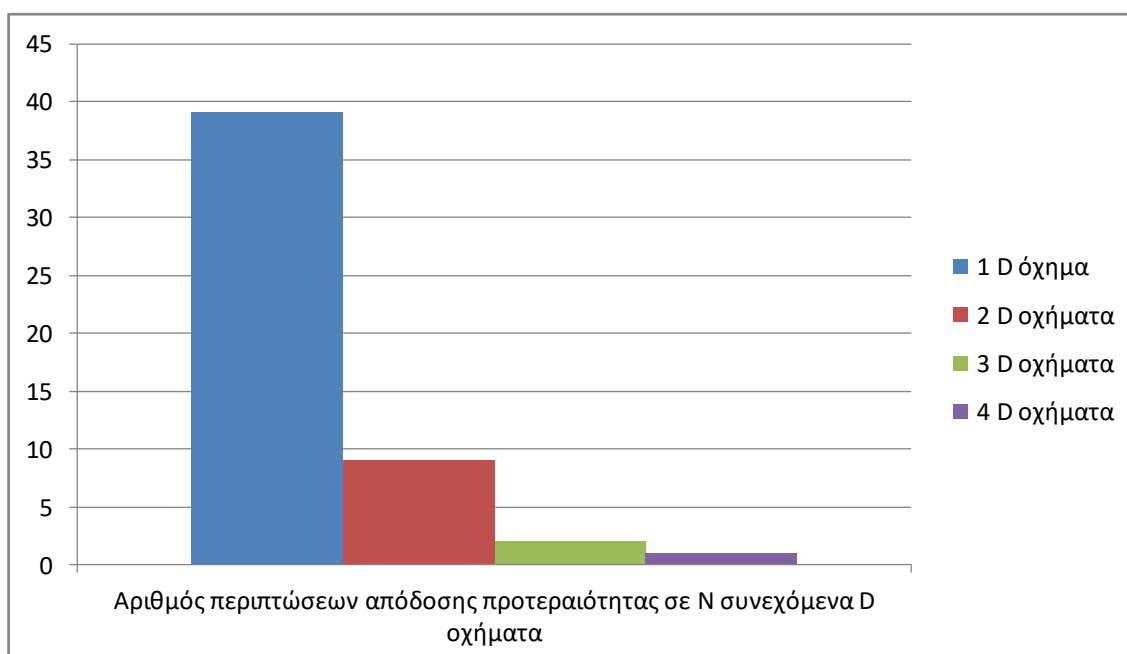
Σε σύνολο 34 περιπτώσεων που υπήρχε κίνηση μπροστά, ο E έδωσε προτεραιότητα στον D οδηγό σε 13 από αυτές, δηλαδή σε ποσοστό 38.2%. Αυτό επιβεβαιώνει ότι σε περιπτώσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης, το ποσοστό απόδοσης προτεραιότητας σε D οδηγό αυξάνεται σε σύγκριση με τον ελεύθερο δρόμο μπροστά από το E όχημα.

Επίσης παρατηρείται ισορροπία στον αριθμό των περιπτώσεων που ο D οδηγός πήρε προτεραιότητα μετά από 1, 2, 3, 4 ή 5 συνεχόμενα E οχήματα. Συγκεκριμένα όσο αυξάνεται ο αριθμός των συνεχόμενων E, τόσο μειώνονται οι περιπτώσεις που ο D οδηγός πήρε την προτεραιότητα, και άρα αυξάνεται η πιθανότητα απόδοσης προτεραιότητας στον D, επαληθεύοντας τους άτυπους κανόνες κοινωνικής συμμόρφωσης που προαναφέραμε. Αυτό δικαιολογείται με το γεγονός ότι η κίνηση στον κύριο δρόμο, δηλαδή αυτή των E οχημάτων, είναι σημαντικότερη και επομένως έχει την προτεραιότητα σε σύγκριση με την κίνηση προς παρακείμενους δρόμους, δηλαδή στροφές σε πάροδο. Έτσι ο D οδηγός δίνει προτεραιότητα σε συνεχόμενα E οχήματα να περάσουν.



Διάγραμμα 9 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον D οδηγό μετά από N E οχήματα

Αντιθέτως, βάσει και του Διαγράμματος 10 ο E οδηγός κατά 76% των περιπτώσεων έδωσε προτεραιότητα σε ένα μόνο E όχημα και κατά 94% σε λιγότερο από δύο συνεχόμενα D οχήματα. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο αφού πιο δύσκολα θα δώσουν προτεραιότητα οι E οδηγοί σε συνεχόμενα D οχήματα απ' ότι θα συμβεί το αντίθετο.



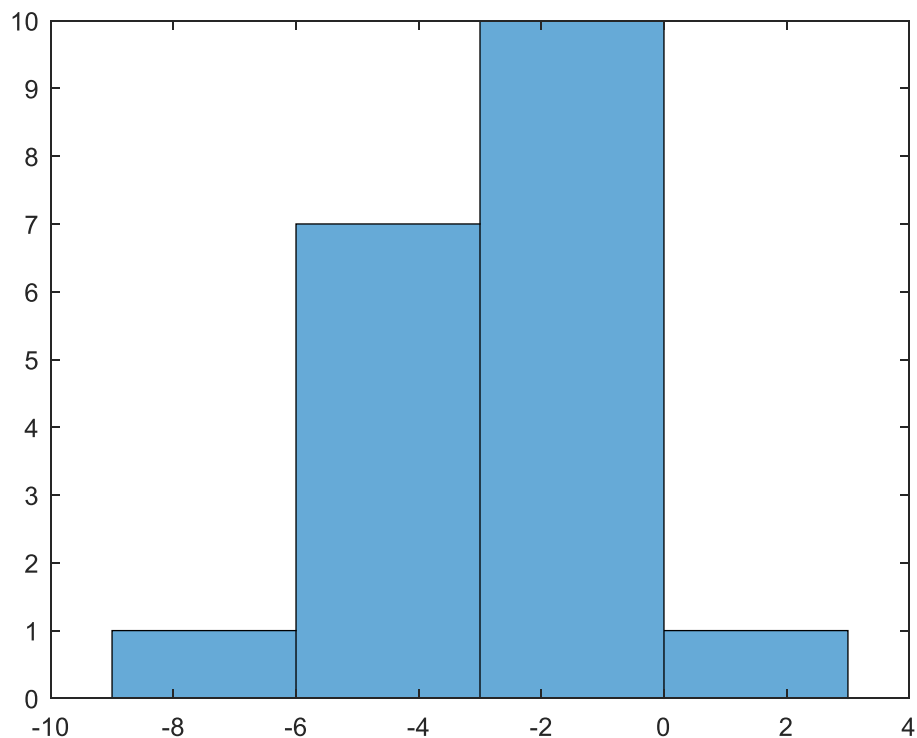
Διάγραμμα 10 : Κατανομή απόδοσης προτεραιότητας στον E οδηγό μετά από N D οχήματα

Όμοια με πριν, στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό. Αυτές είναι:

Μέγιστος TTC	Ελάχιστος TTC	Μέσος TTC	Διάμεσος TTC (median)	Μεταβλητότητα TTC	Διακύμανση TTC (variance)
2.58	-6.30	-2.33	-2.63	2.11	4.44

Πίνακας 15 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό

Στο Διάγραμμα 11 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό, από το οποίο μπορούν να επαληθευτούν οπτικά οι στατιστικές παρατηρήσεις που προαναφέρθηκαν



Διάγραμμα 11 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό

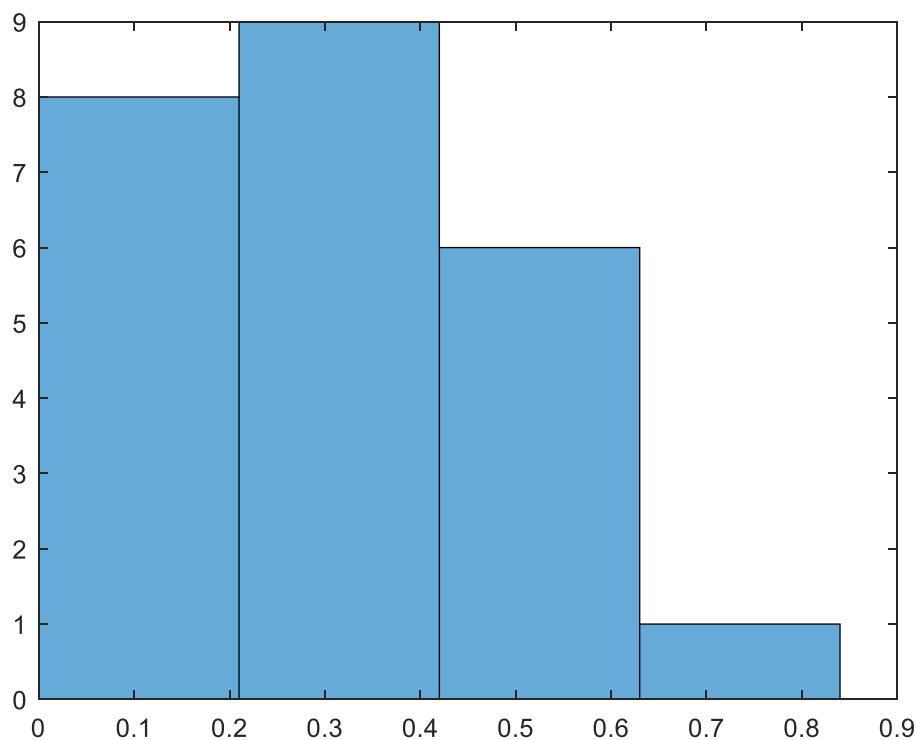
Από τον Πίνακα 15 και το Διάγραμμα 11 παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο, η συγκέντρωση τιμών της διαφοράς των TTC για τα οχήματα D και E να βρίσκεται στον αρνητικό άξονα με μέσο όρο τα -2.33 δευτερόλεπτα. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως στις περιπτώσεις που ο D οδηγός έφτανε στη διασταύρωση με κατά μέσο όρο 2.33 δευτερόλεπτα γρηγορότερα από τον E οδηγό, υπήρχε μεγάλη πιθανότητα να πάρει την προτεραιότητα να στρίψει.

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται οι στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost, για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό.

Μέγιστη yieldCost	Ελάχιστη yieldCost	Μέση yieldCost	Διάμεσος yieldCost (median)	Μεταβλητότητα yieldCost	Διακύμανση yieldCost (variance)
0.8195	0.0392	0.3038	0.3004	0.1779	0.0316

Πίνακας 16 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό

Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό, από το οποίο μπορούν να επαληθευτούν οπτικά οι στατιστικές παρατηρήσεις που προαναφέρθηκαν



Διάγραμμα 12 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης yieldCost για τις περιπτώσεις που δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό

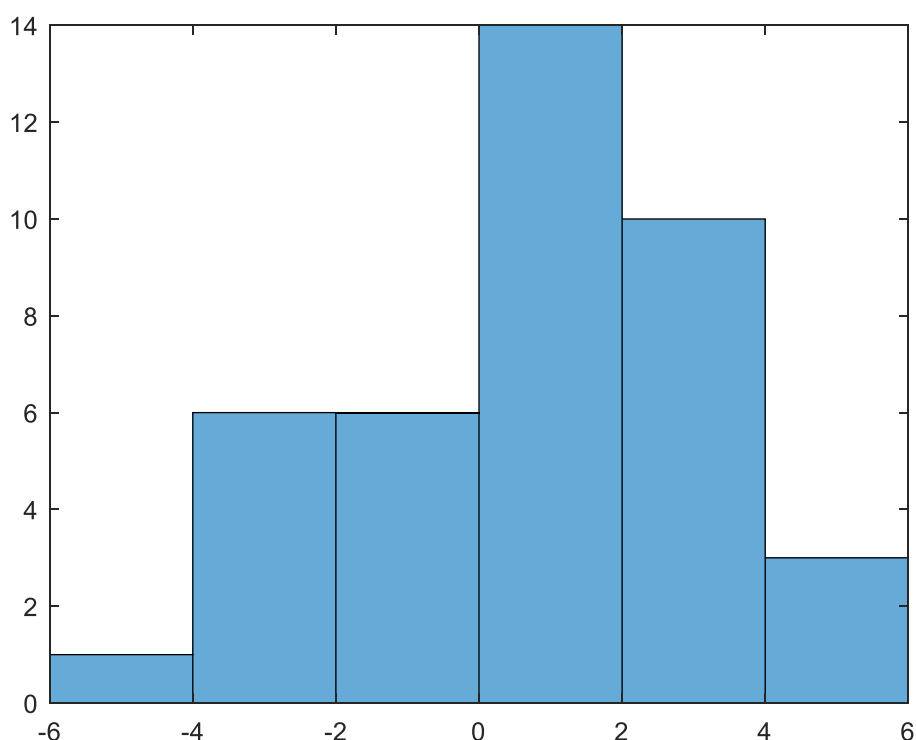
Από τον Πίνακα 16 και το Διάγραμμα 12 παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις που η συνάρτηση yieldCost λάμβανε τιμή με κατά μέσο όρο 0.3038, υπήρχε αυξημένη πιθανότητα να δοθεί προτεραιότητα στον D οδηγό.

Εργαζόμαστε όμοια για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό, εξετάζοντας και πάλι τις στατιστικές παρατηρήσεις που εξάγονται από την εξέταση της

διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 17 και το Διάγραμμα 13.

Μέγιστος TTC	Ελάχιστος TTC	Μέσος TTC	Διάμεσος TTC (median)	Μεταβλητότητα TTC	Διακύμανση TTC (variance)
4.68	-4.84	0.68	1.31	2.38	5.69

Πίνακας 17 : Στατιστικές παράμετροι της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό



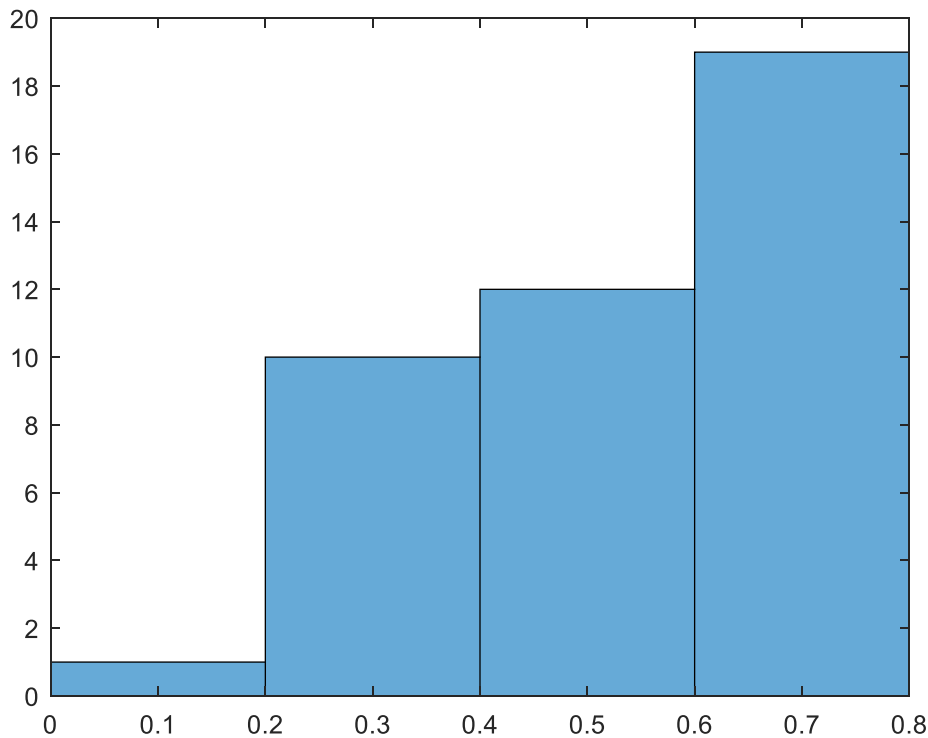
Διάγραμμα 13 : Ιστόγραμμα των τιμών της διαφοράς των χρόνων μέχρι τη διασταύρωση (TTC) των οχημάτων D και E, για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό

Από τον Πίνακα 17 και το Διάγραμμα 13 παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τιμών διαφοράς TTC των οχημάτων D και E γύρω από το 0, όπου η προτεραιότητα είναι αμφίβολη, και συγκεκριμένα με μέσο όρο τιμών 0.68. Αυτό σημαίνει πως στις περιπτώσεις που ο D οδηγός έφτανε στη διασταύρωση αργοπορημένος κατά 0.68 δευτερόλεπτα σε σχέση με τον E οδηγό υπάρχει αυξημένη πιθανότητα ο οδηγός D να μη λάβει προτεραιότητα.

Οι στατιστικές παρατηρήσεις της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό, παρουσιάζονται στον Πίνακα 18 και το Διάγραμμα 14.

Μέγιστη yieldCost	Ελάχιστη yieldCost	Μέση yieldCost	Διάμεσος yieldCost (median)	Μεταβλητότητα yieldCost	Διακύμανση yieldCost (variance)
0.7801	0.1692	0.5352	0.5752	0.1733	0.0300

Πίνακας 18 : Στατιστικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό



Διάγραμμα 14 : Ιστόγραμμα των τιμών της συνάρτησης χρησιμότητας yieldCost για τις περιπτώσεις που δε δόθηκε προτεραιότητα στον D οδηγό

Από τον Πίνακα 18 και το Διάγραμμα 14 παρατηρούμε ότι για τιμές yieldCost μεγαλύτερες από 0.4 με μέσο όρο $yieldCost = 0.5352$, υπήρχε μεγάλη πιθανότητα να μη δοθεί η προτεραιότητα στον D οδηγό.

Συνολικά, για τιμές κάτω του $yieldCost = 0.4$, δόθηκε προτεραιότητα σε 61% των περιπτώσεων ενώ για τιμές άνω του 0.5 δόθηκε προτεραιότητα σε 19% των περιπτώσεων.

10

Επίλογος

10.1 Συμπεράσματα

Η μελέτη αλληλεπίδρασης των οδηγών μέσω eye tracking έθεσε τις βάσεις για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των οδηγών. Το μοντέλο της συνάρτησης χρησιμότητας που προτάθηκε, μπορεί να επικυρωθεί και να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του μόνο με αντιπαράθεσή του με πραγματικά δεδομένα.

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζεται εν σύνοψη η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης και των πραγματικών δεδομένων όσο αφορά το ποσοστό απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό για τις περιπτώσεις δεξιάς και αριστερής στροφής.

	Δεξιά στροφή (%)	Αριστερή στροφή (%)
Αποτελέσματα προσομοίωσης	37	35.8
Πραγματικά δεδομένα	48	42

Πίνακας 19 : Σύγκριση απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό για τις περιπτώσεις δεξιάς και αριστερής στροφής στα αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα

Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα, οφείλονται στο γεγονός ότι,

- Στην προσομοίωση κάναμε την παραδοχή ότι εμπλέκονται μόνο κανονικού μεγέθους οχήματα, εν αντιθέσει με τη μελέτη αλληλεπίδρασης οδηγών όπου εμπλέκονται και μοτοσυκλέτες, φορτηγά, ταξί, λεωφορεία κ.α.
- Στην προσομοίωση κάναμε την παραδοχή ότι δεν εμπλέκονται πεζοί, παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του οδηγού.
- Ο λόγος πυκνότητας της ροής κυκλοφορίας των Α ως προς τα Β οχήματα της πραγματικότητας πιθανό να διαφέρει από αυτόν της προσομοίωσης ο οποίος κυμαίνεται γύρω από μία σταθερή μέση τιμή.
- Υπάρχουν επιπλέον παράγοντες όπως για παράδειγμα ορατότητα, απόδοση οχήματος, προσοχή οδηγού κ.α.

Προκειμένου να εξακριβωθεί πλήρως η αξιοπιστία του μοντέλου, θα χρειαστεί να προσομοιωθεί υπό τις ίδιες συνθήκες και τους περιορισμούς που εμφανίζονται στην πραγματικότητα.

Επίσης για την αποτελεσματική επικύρωση ενός μοντέλου αλληλεπίδρασης, θα χρειαστεί να αξιοποιηθούν διάφορες μετρικές από τα πραγματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, η γνώση των χρόνων TTC, των θέσεων, των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων των εμπλεκόμενων οχημάτων θα παρήγαγαν στατιστικά δεδομένα για μια εξ ίσων αντιπαράθεσή τους με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Το σημείο στο οποίο η διαφορά των χρόνων TTC των δύο οχημάτων που υπό συγκεκριμένες συνθήκες, θα είχε την μεγαλύτερη πιθανότητα – βάσει πραγματικών δεδομένων – απόδοσης προτεραιότητας στον Α οδηγό, είναι καθοριστικής σημασίας για την περαιτέρω κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς κατά την οδήγηση. Τα δεδομένα που αντλούνται από την μελέτη eye tracking, δε μας επιτρέπουν την εξ ίσων αντιπαράθεση με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, και γι αυτό η ανάπτυξή τους αποτελεί στόχος επέκτασης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

10.2 Ανακεφαλαίωση

Οι δρόμοι των οδικών δικτύων είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι. Ο λόγος είναι ότι το ανθρώπινο μυαλό, οι ανθρώπινες αντιδράσεις, μπορούν να είναι εξαιρετικά απρόβλεπτες. Σύντομα, η ανθρωπότητα θα χρειαστεί να αντιμετωπίσει ένα νέο είδος οδηγού. Τα τελευταία χρόνια επενδύθηκαν πολλά χρήματα για την ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων. Έτσι, αναπόφευκτα η ανθρωπότητα θα μοιράζεται σύντομα το οδικό δίκτυο με οχήματα χωρίς οδηγό.

Η εποχή που το οδικό δίκτυο θα αποτελείτε αποκλειστικά από αυτόνομα οχήματα πλήρους αυτοματοποίησης θα καθυστερήσει για λίγο ακόμη. Τα αυτόνομα οχήματα θα μπορούν τότε να επικοινωνούν και να προβλέπουν επακριβώς τις ενέργειες των άλλων οχημάτων, μέσω

συστημάτων επικοινωνίας και αισθητήρων. Μέχρι την πλήρη αυτοματοποίηση των δρόμων όμως, θα χρειαστεί να περάσουμε από ένα αφενός λιγότερο ασφαλές, αφετέρου δυσκολότερο ως προς την υλοποίησή του μεταβατικό στάδιο. Αυτό που τα αυτόνομα οχήματα θα αλληλεπιδρούν με τους οδηγούς συμβατικών οχημάτων.

Η πρόβλεψη της ανθρώπινης συμπεριφοράς υπό την επίδραση διαφόρων συνθηκών, ήταν ανέκαθεν ένα δύσκολο έως ακατόρθωτο έργο. Η ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων επιτάχυναν την προοπτική ταυτόχρονης συνύπαρξης αυτόνομων οχημάτων στους δρόμους. Μέθοδοι όπως το machine learning, επέτρεψαν στις μηχανές να αναγνωρίζουν μοτίβα κάνοντας το έργο της πρόβλεψης ανθρώπινης συμπεριφοράς ευκολότερο.

Ωστόσο προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητα των αυτόνομων συστημάτων σε πραγματικά δεδομένα, προαπαιτείται η μοντελοποίηση τους σε ένα ασφαλές υπολογιστικό περιβάλλον.

Για την αποδοτικότερη μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων χρειάζεται πρώτα να παρατηρηθούν, καταγραφούν και αναλυθούν οι ενέργειες και οι αντιδράσεις των οδηγών σε καθημερινά σενάρια. Έτσι, η μελέτη της ανάλυσης των αλληλεπιδράσεων των οδηγών έθεσε τα θεμέλια για τις παραδοχές, τις συνθήκες και τις μεταβλητές που θα όριζαν το περιβάλλον προσομοίωσης.

Έχοντας έτοιμο το περιβάλλον προσομοίωσης αλληλεπίδρασης οδηγών, θα απέμενε η εύρεση εκείνου του μοντέλου που θα αναπαριστούσε την ανθρώπινη συμπεριφορά κατά το μέγιστο ρεαλιστικό τρόπο. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση ενός εργαλείου της θεωρίας παιγνίων, της συνάρτησης χρησιμότητας. Η θεωρία παιγνίων ενδείκνυται ως η κατάλληλη μέθοδος για να διαχειριστούμε προβλήματα λήψης αποφάσεων δύο ή περισσότερων οντοτήτων. Μέσω της συνάρτησης χρησιμότητας, αναλύονται τα σενάρια λήψης αποφάσεων βάσει της χρησιμότητας ή αλλιώς του οφέλους που επιφέρει το κάθε σενάριο αλλά ταυτόχρονα και το κόστος που επιτάσσει η μη υλοποίηση του σεναρίου.

Αναλύθηκαν λοιπόν οι καταστάσεις κυκλοφορίας δεξιάς και αριστερής στροφής, με χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας $yieldingCost = \frac{t_A}{t_B+t_A} \in (0, 1)$.

Μέσω αυτής της συνάρτησης συμπεριλαμβάνονται κανόνες που αφορούν αφενός τη μαθηματική φύση του προβλήματος όπως η διαφορά χρόνων των δύο οχημάτων μέχρι την άφιξή τους στη διασταύρωση και αφετέρου την κοινωνική – ψυχολογική φύση του προβλήματος, όπως είναι οι άτυποι κανόνες κοινωνικής συμμόρφωσης και η κυκλοφοριακή συμμόρφωση.

Η προσομοίωση αυτών των σεναρίων και η αξιολόγησή τους, απέδειξε πως η μοντελοποίηση με χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας επιφέρει ικανοποιητικά και ρεαλιστικά

αποτελέσματα. Η αποτελεσματικότητά της επιβεβαιώνεται και από την ικανοποίηση των κοινωνικών παραμέτρων που διέπουν το πρόβλημά μας που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Έτσι κατέστη δυνατό η υπολογιστική μοντελοποίηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς που θα επιτρέψει την περαιτέρω έρευνα της αλληλεπίδρασης που θα έχει η συνύπαρξη αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων στο σύντομο μέλλον.

10.3 Συμβολή και αναγκαιότητα

Η έρευνα για τα αυτόνομα οχήματα έχει γίνει πιο έντονη τα τελευταία χρόνια, με τους πιο φιλόδοξους επιστήμονες να εκτιμούν πως η πλήρη αυτοματοποίηση των δρόμων θα επέλθει σε λιγότερο από 25 χρόνια. Υπάρχει ήδη μεγάλος αριθμός ερευνών προς αυτή την κατεύθυνση και ο αριθμός αυξάνεται εκθετικά όσο εμφανίζεται εντονότερα η ανάγκη για ανάπτυξη των αυτόνομων συστημάτων που θα κάνουν τους δρόμους μας ασφαλέστερους.

Ωστόσο μέχρι στιγμής η έρευνα επικεντρωνόταν στην ανάπτυξη των αισθητήρων και του λογισμικού των αυτόνομων συστημάτων για την υλοποίηση των ενεργειών αναγνώρισης της θέσης τους, πλοήγησης και σχεδιασμού της βέλτιστης διαδρομής. Η αλληλεπίδρασή τους με άλλα οχήματα και ειδικότερα με τα συμβατικά, χρήζει εκτενέστερης έρευνας και διεξοδικότερης ανάλυσης.

Παρόλο που υπάρχουν έρευνες που εξετάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των οδηγών των οχημάτων, αυτή περιορίζονταν στη βάση παρατήρησής τους από εξωτερικούς παρατηρητές. Η χρήση των γυαλιών eye tracking κατά την οδήγηση, καθώς και τα σχόλια των οδηγών που τα συνόδευαν μας επέτρεψε την παρατήρηση και ανάλυση των αλληλεπιδράσεων από την οπτική γωνία του ίδιου του οδηγού. Από αυτό προκύπτουν πιο αξιόπιστα και εύρωστα αποτελέσματα.

Έγιναν πολλές προσπάθειες για μοντελοποίηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς, πράγμα που βρίσκει εφαρμογή στην έρευνα των αυτόνομων οχημάτων. Όμως η μοντελοποίηση που βασίζεται στην μελέτη αλληλεπίδρασης οδηγών όπως την αντιλαμβάνεται ο ίδιος ο οδηγός, εκτιμάται πως θα επιφέρει και πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Έτσι συνάγεται η συμβολή και η αναγκαιότητα της παρούσας διπλωματικής εργασίας προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης των αυτόνομων συστημάτων, τέτοιων που θα καταστήσουν τους δρόμους ασφαλέστερους και τη μετάβαση στην αυτοματοποίηση των μέσων μεταφοράς ομαλότερη.

10.4 Προοπτική και μελλοντικές επεκτάσεις

Η έρευνα των αυτόνομων συστημάτων καλύπτει ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων αφού εμπίπτει τόσο στην ανάπτυξη συστημάτων τεχνολογίας αιχμής, όσο και στον τομέα γνωστικής εργονομίας για την πλήρη κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς κατά την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με μηχανές.

Είναι επιτακτική η ανάγκη περαιτέρω έρευνας για την κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς, προτού είμαστε σε θέση να θέσουμε ευρεία τη χρήση των αυτόνομων οχημάτων. Επομένως η έρευνα προς την κατεύθυνση της γνωστικής εργονομίας των αυτόνομων συστημάτων όπως η παρούσα διπλωματική εργασία, έχουν ισχυρή προοπτική.

Εντούτοις, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και επέκτασης της έρευνας και της ανάλυσης που προηγήθηκε για την υλοποίηση της εργασίας. Έχουμε αναφερθεί στην αξία που προσδίδει η αξιοποίηση των μεθόδων machine learning ή reinforcement learning. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν κάποιες μέθοδοι machine learning για αναγνώριση μοτίβων στη συμπεριφορά των οδηγών κατά την αλληλεπίδρασή τους με άλλα οχήματα μέσω απευθείας σύνδεσης των δεδομένων που παράγουν τα eye tracking γυαλιά με μια μονάδα επεξεργασίας πραγματικού χρόνου στην οποία εμπεριέχεται ο αλγόριθμος.

Για την εκπαίδευση του αλγόριθμου machine learning χρειάζεται μια μεγάλη βάση δεδομένων. Αξιολογώντας αυτά τα δεδομένα, θα μπορούσαν στη συνέχεια να κατηγοριοποιηθούν (classification) σε δύο κατηγορίες ως προς το σε ποιες περιπτώσεις δύναται να δοθεί ή όχι προτεραιότητα σε έναν οδηγό, βάσει των αντιδράσεων των οδηγών. Αυτό επιτυγχάνεται και με την αξιοποίηση νευρωνικών δικτύων. Δίνοντας περισσότερα δεδομένα στο πρόγραμμα machine learning, το εκπαιδεύουμε προκειμένου να παράγει όλο και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Όταν η εκπαίδευση του αλγόριθμου θα θεωρούνταν ότι έφτασε ένα ικανοποιητικό επίπεδο, θα μπορούσε να γίνει χρήση του αλγόριθμου σε πραγματικές εφαρμογές οδήγησης σε πραγματικό χρόνο.

Αυτός ο τρόπος είναι αποτελεσματικότερος, δεδομένου ότι μπορεί να αναλύσει – με χρήση και της τεχνητής όρασης που έχει αναπτυχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια – μεγάλη ποσότητα δεδομένων αυτόματα, επομένως σε μικρότερο χρόνο. Ωστόσο αυτή η μέθοδος προαπαιτεί την ύπαρξη μεγάλης βάσης δεδομένων, πράγμα που αποτελεί εμπόδιο στην υιοθέτησή της.

Εναλλακτικά ο περιορισμός της απαίτησης για ύπαρξη μεγάλης βάσης δεδομένων από αρχεία μελέτης eye tracking, θα μπορούσε να ξεπεραστεί με τη χρήση μιας άλλης μεθόδου machine learning, του μοντέλου παρεμβολής ή παλινδρόμησης (regression). Σε αυτή, η αξιολόγηση των αρχείων eye tracking γίνεται από ανθρώπους, όπως ακριβώς έγινε σε αυτή την εργασία και επομένως δεν απαιτείται μεγάλη βάση δεδομένων για εκπαίδευση κάποιου αλγόριθμου. Ο

ανθρώπινος εγκέφαλος είναι – μέχρι στιγμής – ο αποτελεσματικότερος «αλγόριθμος» που γνωρίζουμε.

Έτσι αφού αξιολογηθούν τα δεδομένα από τον άνθρωπο, η δημιουργία της συνάρτησης χρησιμότητας θα μπορούσε να παρακαμφθεί αφού αυτή εισάγει παραδοχές που περιορίζουν το πρόβλημα. Αντί αυτού, η χρήση της μεθόδου παρεμβολής θα δημιουργούσε μια σχέση μεταξύ των δεδομένων που εισάγουμε, στην περίπτωση μας το περιβάλλον και οι συνθήκες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των οδηγών και των αποτελεσμάτων που εξάγει η παρεμβολή, δηλαδή την πιθανότητα να δοθεί προτεραιότητα ή όχι σε έναν οδηγό. Με τον τρόπο αυτό παράγονται πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αφού η σχέση, χωρίς κατ' ανάγκη να είναι γνωστή, συμπεριλαμβάνει περισσότερες παραμέτρους του προβλήματος.

Επιπρόσθετα, θα μπορούσαν να γίνουν επεκτάσεις στη βάση της λογικής αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η μοντελοποίηση έγινε για αλληλεπίδραση κανονικού μεγέθους οχημάτων, για δύο σενάρια στροφών: αριστερής στροφής από κύριο δρόμο σε πάροδο και δεξιάς στροφής από πάροδο σε κύριο δρόμο και χωρίς την επίδραση εξωγενών παραγόντων όπως για παράδειγμα πεζών. Επομένως είναι προφανής η δυνατότητα επέκτασης της παρούσας μελέτης εξετάζοντας και αλληλεπιδράσεις με άλλου τύπου οχήματα, άλλα σενάρια κυκλοφορίας και υπό την επίδραση επιπλέον παραγόντων, που επιδρούν στις συνθήκες του προβλήματος.

Τέλος, μια τροποποίηση που θα μπορούσε να γίνει στην παρούσα εργασία αφορά τον τρόπο προσομοίωσης της μοντελοποίησης. Έχει αναφερθεί πως η προσομοίωση στηρίχθηκε σε υπάρχοντα μοντέλα ακολουθίας αυτοκινήτων (car following models) που βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα περιβάλλοντα προσομοίωσης όπως το VISSIM. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγθεί και να επεξεργαστεί ένα συγκεκριμένο μοντέλο, αλλάζοντας τις παραμέτρους του και προσθέτοντας μεταβλητές που μπορούν να καλύψουν ένα μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το εργαλείο DriverModel.dll του περιβάλλοντος προσομοίωσης VISSIM.

Η τροποποίηση ή η δημιουργία νέων μοντέλων ακολουθίας αυτοκινήτων έχει προοπτική αφού τα υπάρχοντα στηρίζονται σε παρατηρήσεις αλληλεπίδρασης των οδηγών που πραγματοποιήθηκαν αρκετά χρόνια πριν. Τα δεδομένα αλλάζουν και μαζί τους αλλάζει και η συμπεριφορά των οδηγών, έτσι η χρήση των υφιστάμενων μοντέλων σε υπολογιστικά εργαλεία του παρόντος δεν επιφέρει τα πιο ρεαλιστικά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο η τροποποίηση ευρέως αναγνωρισμένων μοντέλων ενέχει το ρίσκο αποτυχίας εάν δεν προηγηθεί διεξοδική ανάλυση των υπαρχόντων μοντέλων καθώς και η δημιουργία νέων αποτελεί επίτονη και απαιτητική μελέτη.

Συγκεκριαιώνοντας, η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των οδηγών έχει πολλά περιθώρια εξέλιξης και ανάπτυξης. Πολλά χρόνια έρευνας συγκλίνουν σε ένα πολύπλοκο σύνολο

αιτιών, κινήτρων αλλά και συνεπειών που επακολουθούν στις επιλογές που παίρνει ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Δεν θα μπορέσουμε ποτέ να γνωρίζουμε επ' ακριβώς τις αιτίες για τις οποίες ένας άνθρωπος αντίδρασε με ένα συγκεκριμένο τρόπο αφού αυτό μπορεί να οφείλεται εκτός από τα ερεθίσματα του περιβάλλοντος και στην ιδιαιτερότητα του κάθε ανθρώπου ξεχωριστά. Ωστόσο η ανάπτυξη σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων μας επέτρεψαν να προσεγγίσουμε την ανθρώπινη συμπεριφορά στο μέγιστο βαθμό που επιτεύχθηκε μέχρι σήμερα.

Η έρευνα στα ευφυή συστήματα μεταφορών δεν είναι απλά ένας κεντρικός πυλώνας στον οποίο θα στηριχθεί η μελλοντική τεχνολογική ανάπτυξη, αλλά εμπίπτει και μέσα στο γενικότερο ανθρωπιστικό φάσμα. Δηλαδή την ανάπτυξη εργαλείων των οποίων η λύση θα επηρεάσει θετικά την ευημερία του ευρέως κοινού και θα καταστήσει τους τρόπους μεταφοράς ασφαλέστερους μειώνοντας έτσι τα οδικά δυστυχήματα, μια από τις κυριότερες αιτίες θανάτου στον κόσμο.

11

Παράρτημα

11.1. Σύντομογραφίες

ADAS : Advance Driver Assistance Systems.....	8
ADS : Automated Driving System	8
DOT : Department of Transportation	10
DSRC : Dedicated short range communication.....	36
FIR : Far Infrared Radiation.....	18
GPS : Global Positioning System	14
IMU : Inertial Measurement Unit	14
LAN : Local Area Network.....	31
LIDAR : Light Detection and Ranging	15
NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration	10
OBU : On Board Unit.....	37
OFDM : Orthogonal frequency-division multiplexing.....	35
OSM : Open Street Map	65
RADAR : Radio Detection And Ranging.....	15
RSU : Road Side Unit.....	31
SAE : Society of Automotive Engineers	10, 35
SLAM : Simultaneous Localization And Mapping	73
SUMO : Simulation for Urban Mobility.....	64
V2V : Vehicle to vehicle	19
V2X : Vehicle to everything	19
WAVE : Wireless Access in Vehicular Environment.....	35
WHO : World Health Organization	7

AFE : Analogical front-end	22
CPU : Central Processing Unit.....	22
IC : Integrated circuit	22
IoT : Internet of Things	27
ITS : Intelligent Transportation Systems.....	27
MANET : Mobile Ad hoc Network.....	27
MCU : Microcontroller unit	22
V2I : Vehicle to infrastructure	19
VANET : Vehicular Ad hoc Network.....	27

12

Βιβλιογραφία

- [1] C. B. Frey and M. A. Osborne, “The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 114, pp. 254–280, Jan. 2017.
- [2] K. Poullier, “The Rise of Artificial Intelligence,” p. 16.
- [3] C. David Wang, James P. Thompson, “Apparatus and method for motion detection and tracking of objects in a region for collision avoidance utilizing a real-time adaptive probabilistic neural network.” 1997.
- [4] WHO, “Few countries have road safety laws addressing all five key risk factors,” 2013.
- [5] J. Albright, A. Bell, J. Schneider, and C. Nyce, “Marketplace of change: Automobile insurance in the era of autonomous vehicles,” no. October, p. 52, 2015.
- [6] J. S. V. Goncalves *et al.*, “Testing Advanced Driver Assistance Systems with a serious-game-based human factors analysis suite,” in *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, MI, USA, 2014, pp. 13–18.
- [7] NHTSA, “Automated Vehicles for Safety,” 2018.
- [8] Kubota Taylor, “Taking back control of an autonomous car affects human steering behavior, Stanford research shows,” 2016.
- [9] Dave Lee, “Apple self-driving car in minor crash.”
- [10] theguardian.com, “Tesla driver dies in first fatal crash while using autopilot mode.”
- [11] theverge.com, “Safety driver of fatal self-driving Uber crash was reportedly watching Hulu at time of accident.”
- [12] J. Z. Varghese, “Overview of Autonomous Vehicle Sensors and Systems,” p. 14.
- [13] medium.com, “Artificial Intelligence and Autonomous Vehicles.”
- [14] marketsandmarkets.com, “Automotive Artificial Intelligence Market by Offering (Hardware, Software), Technology (Deep Learning, Machine Learning,

- Computer Vision, Context Awareness and Natural Language Processing), Process, Application and Region - Global Forecast to 2025.”
- [15] Irshad Ahmed Abbasi, Adnan Shahid Khan, “A Review of Vehicle to Vehicle Communication Protocols for VANETs in the Urban Environment,” 2017.
- [16] Zsolt Szalay, Szilárd Aradi, Gáspár Péter, *Highly Automated Vehicle Systems*. 2014.
- [17] Milos Milojevic, “Location Aware Data Aggregation for Efficient Message Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks,” 2016.
- [18] A. Yasser, M. Zorkany, and N. Abdel Kader, “VANET routing protocol for V2V implementation: A suitable solution for developing countries,” *Cogent Eng.*, vol. 4, no. 1, Aug. 2017.
- [19] T. Litman, “Implications for Transport Planning,” p. 39.
- [20] B. Brown and E. Laurier, “The Trouble with Autopilots: Assisted and Autonomous Driving on the Social Road,” in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, Denver, Colorado, USA, 2017, pp. 416–429.
- [21] B. Schoettle and M. Sivak, “A SURVEY OF PUBLIC OPINION ABOUT AUTONOMOUS AND SELF-DRIVING VEHICLES IN THE U.S., THE U.K., AND AUSTRALIA,” p. 42.
- [22] RCCAO, *Ontario Must Prepare for Vehicle Automation: Automated vehicles can influence urban form, congestion and infrastructure delivery.* .
- [23] J. Parkin, B. Clark, W. Clayton, M. Ricci, and G. Parkhurst, “Deliverable D11 Understanding interactions between autonomous vehicles and other road users A Literature Review,” p. 69.
- [24] F. Camara, “Predicting pedestrian road-crossing assertiveness for autonomous vehicle control,” p. 7.
- [25] A. Rasouli, I. Kotseruba, and J. K. Tsotsos, “Agreeing to Cross: How Drivers and Pedestrians Communicate,” *ArXiv170203555 Cs*, Feb. 2017.
- [26] G. Markkula, R. Romano, R. Madigan, C. W. Fox, O. T. Giles, and N. Merat, “Models of human decision-making as tools for estimating and optimising impacts of vehicle automation.”
- [27] M. Liu, Y. Chen, and G. Lu, “Modeling Crossing Behavior of Drivers at Unsignalized Intersections with Consideration of Risk Perception,” *MATEC Web Conf.*, vol. 81, p. 02014, 2016.
- [28] E.-H. Choi, “Crash Factors in Intersection-Related Crashes: An On-Scene Perspective: (621942011-001).” American Psychological Association, 2010.
- [29] E. Portouli, D. Nathanael, K. Gkikas, A. Amditis, and L. Psarakis, “Field Observations of Interactions Among Drivers at Unsignalized Urban Intersections,” in *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, vol. 823, S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, and Y. Fujita, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 230–237.
- [30] Carlos Biurrun Quel, Luis Javier Serrano Arriezu, Cristina Olaverri Monreal, “Development of a Microscopic Driver-Centric Simulator with Unity3D and SUMO,” 2016.
- [31] W. Burghout and P. Project, “Mesoscopic Simulation Models for Short-Term Prediction,” p. 25.
- [32] D. R. Leonard, P. Gower, and N. B. Taylor, “CONTRAM: STRUCTURE OF THE MODEL,” p. 27.

- [33] Laron Smith, Richard Beckman, Keith Baggerly, Doug Anson, Michael Williams, “TRANSIMS: Transportation Analysis And Simulation System.”
- [34] R. Jayakrishnan, H. S. Mahmassani, and T.-Y. Hu, “An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 129–147, Sep. 1994.
- [35] PTV Group, “PTV VISSIM & Connected Autonomous Vehicles.”
- [36] PTV Group, “Getting Started: VISSIM.” 2015.
- [37] M. M. Abbas and A. Medina, “Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data,” p. 22.
- [38] C. W. Fox, F. Camara, G. Markkula, R. A. Romano, R. Madigan, and N. Merat, “When Should the Chicken Cross the Road? - Game Theory for Autonomous Vehicle - Human Interactions:,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Funchal, Madeira, Portugal, 2018, pp. 431–439.
- [39] R. Madigan *et al.*, “Acceptance of Automated Road Transport Systems (ARTS): An Adaptation of the UTAUT Model,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 2217–2226, 2016.
- [40] T. C. Johnson, “C2922 Economics Utility Functions,” p. 14.
- [41] theguardian.com, “The trolley problem: would you kill one person to save many others?”
- [42] G. Debreu and W. Hildenbrand, *Mathematical Economics: Twenty Papers of Gerard Debreu*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [43] D. Lix, “A model for determining the utility function using Fuzzy numbers,” p. 10.
- [44] J. B. Misyak, T. Melkonyan, H. Zeitoun, and N. Chater, “Unwritten rules: virtual bargaining underpins social interaction, culture, and society,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 18, no. 10, pp. 512–519, Oct. 2014.
- [45] N. Chater, J. Misyak, D. Watson, N. Griffiths, and A. Mouzakitis, “Negotiating the Traffic: Can Cognitive Science Help Make Autonomous Vehicles a Reality?,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 93–95, Feb. 2018.