



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΥΠΝΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΖΟΥΛΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΥΠΙΝΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΖΟΥΛΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS: INFRASTRUCTURE AND APPLICATIONS STUDY

GEORGIOS ZOULAS

FINAL THESIS
ADVISOR

DR. THEOFILOS CHRYSIKOS

TUTOR – ASSOCIATE UNIVERSITY OF THESSALY

Lamia 2023

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 7.../..7 /2023.....

Ο Δηλών

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο τομέας των μεταφορών αντιμετωπίζει προκλήσεις. Τα έξυπνα συστήματα μεταφορών προκειμένου να αντιμετωπίσουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση, τα ατυχήματα και τις ενεργειακές επιπτώσεις εφαρμόζουν προηγμένες τεχνολογίες που έρχονται να αγκαλιάσουν τη συνεργασία μεταξύ των οχημάτων για την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας. Αξιολογούνται τα πιο σημαντικά συστήματα , οι εφαρμογές και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που θα διακρίνουν τις μελλοντικές οδικές υποδομές που χρησιμοποιούνται από τα οχήματα και αναδεικνύουν τα πραγματικά οφέλη. Δίνεται έμφαση στις νέες απαιτήσεις που φέρνουν οι αναδυόμενες τεχνολογίες και ζώνες συχνοτήτων B5G και 6G και εξετάζουν τις μελλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τις μετρήσεις , τη μοντελοποίηση καναλιών οχημάτων καθώς και την εφαρμογή τους.

ABSTRACT

The transport sector faces challenges. Intelligent transport systems to address congestion, accidents and energy impacts are implementing advanced technologies that come to embrace inter-vehicle cooperation to enhance road safety. The most important systems, applications and communication protocols that will distinguish future road infrastructures used by vehicles are evaluated and the real benefits are highlighted. The new requirements brought by emerging technologies and B5G and 6G frequency bands are emphasized and future challenges related to measurements, vehicle channel modelling as well as implementation are addressed.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	0
ABSTRACT	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΈΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	5
1.1 ΈΝΝΟΙΕΣ – ΟΡΙΣΜΟΙ	5
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	6
1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	7
1.4 ΟΦΕΛΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	14
1.5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ - ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	18
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	18
2.2 ΌΧΗΜΑ-ΠΡΟΣ-ΟΧΗΜΑ (VEHICLE-TO-VEHICLE)	19
2.3 ΌΧΗΜΑ-ΠΡΟΣ-ΥΠΟΔΟΜΗ (VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE)	26
2.4 ΌΧΗΜΑ-ΠΡΟΣ-ΟΛΑ (VEHICLE-TO-EVERYTHING)	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΚΑΝΑΛΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΓΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	32
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΑ ΤΟ 5G ΚΑΙ 6G	32
3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ B5G ΚΑΙ 6G.....	32
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ B5G ΚΑΙ 6G	39
3.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ B5G ΚΑΙ 6G	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	45
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.1) ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 802.11P	45
(ΕΝΟΤΗΤΑ 4.1.1) ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΟΧΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 802.11P.....	45
(ΕΝΟΤΗΤΑ 4.1.2) ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΤΑ 5,9 GHz ΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	47
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.2) ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ 802.11P.....	49
(ΕΝΟΤΗΤΑ 4.2.1) ΕΠΙΤΥΧΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΚΕΤΩΝ.....	49
(ΕΝΟΤΗΤΑ 4.2.1) ΕΦΑΡΜΟΓΗ MATLAB LINK BUDGET ANALYZER ΓΙΑ ΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΩΝ 5,9 GHz.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μεταφορές έχουν θεμελιώδη σημασία για την ανθρώπινη κοινωνία. Η αύξηση των οχημάτων στην οδική κυκλοφορία είναι ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο του σημερινού κόσμου, πράγμα που σημαίνει ότι τα σχετικά προβλήματα όπως τα τροχαία ατυχήματα, η ρύπανση (του αέρα και του θορύβου), οι μεγάλοι χρόνοι ταξιδιού κ.λπ. αυξάνονται με τον ίδιο τρόπο. Έχουν δημοσιευθεί πολυάριθμες εκθέσεις προκειμένου να προσδιοριστεί η έκταση του προβλήματος, και ειδικότερα αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη ενός νέου τομέα μελέτης, των έξυπνων συστημάτων μεταφορών [1]. Τα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems - ITS) εφαρμόζουν προηγμένες τεχνολογίες με σκοπό την ολοκλήρωση διαφόρων πτυχών των μεταφορών, όπως οχήματα, χρήστες και υποδομές. Αυτές οι προηγμένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν ασύρματα, ηλεκτρονικά και αυτοματοποιημένα συστήματα, τα οποία μπορούν να μετασχηματίσουν τον τρόπο μετακίνησής μας, επιτρέποντάς μας να αντιμετωπίσουμε καλύτερα τις ανάγκες της . Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν επίσης την αύξηση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας μέσω αυτοματοποιημένων και ολοκληρωμένων λειτουργιών και υποδομών, όπως η ακριβής προσέγγιση στις στάσεις των λεωφορείων, οι αυτόματοι οδηγοί και τα συστήματα αποφυγής συγκρούσεων. Επιπλέον, οι τεχνολογίες ITS μπορούν να βελτιστοποιήσουν τα ταξίδια μας προσφέροντας αξιόπιστες καθοδηγήσεις στις διαδρομές, μειώνοντας τις άχρηστες αποστάσεις ταξιδιού και προωθώντας εναλλακτικούς τρόπους μεταφοράς. Μέσω της συλλογής και ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων από τα μέσα μεταφοράς, μπορούμε να μειώσουμε την εξάρτησή μας από το πετρέλαιο και να βελτιώσουμε την ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε [2].

Τα οφέλη των ITS είναι ευρείας εμβέλειας . Δεν είναι λίγες οι χώρες εκείνες που αυξήσαν το μεταφορικό τους έργο με στόχο την συνολική ανάπτυξη σε εθνικό επίπεδο . Η βασική πρόκληση της πολιτικής των μεταφορών σήμερα είναι η εκπλήρωση των συγχρόνων αναγκών κινητικότητας και βιωσιμότητας, σε εξισορρόπηση [3]. Βασιζόμενοι σε δεκαετίες έρευνας και ανάπτυξης των ITS, το πολύ κοντινό μέλλον είναι πιθανό να περιλαμβάνει αυτοματοποιημένα οχήματα που θα αλληλοεπιδρούν με το σύστημα μεταφορών - μια έννοια που έχει κατακτήσει

την ανθρώπινη φαντασία εδώ και δεκαετίες, και είναι πιο κοντά από ποτέ στην ανάπτυξη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Έννοιες και ορισμοί

1.1 Έννοιες – ορισμοί

Η ευφυΐα σαν όρος αποτελεί γνώρισμα της ανθρώπινης φύσης. Προσδιορίζεται και δομείται, από τον συνδυασμό διαφορετικών ικανοτήτων, που είναι σε θέση να αναπτύσσει το άτομο [4]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του όρου της ευφυΐας όπως προκύπτει από τα διάφορα λεξικά, δείχνουν ότι ο όρος της ευφυΐας συνήθως αποδίδεται σε ένα άτομο, το οποίο είναι διορατικό, έξυπνο, εφευρετικό, ανταποκρίνεται θετικά ως προς το περιβάλλον και είναι σε θέση να προσαρμοστεί σε αυτό με επαρκής λύσεις.

Ωστόσο, η ευφυΐα δεν αποτελεί μόνο αποκλειστικό γνώρισμα του ατόμου, αλλά χαρακτηρίζει και τα κοινωνικά σύνολα. Η συλλογική ευφυΐα αναφέρεται στην ικανότητα των ανθρώπινων κοινωνιών, να συνεργάζονται, με στόχο την πνευματική δημιουργία, την ανάπτυξη καινοτόμων δράσεων και εφευρέσεων [4]. Πέρα από την ευφυΐα που πηγάζει από την ατομική και συλλογική πνευματικότητα και συνεργασία, υπάρχει και η έννοια της τεχνητής ευφυΐας η οποία μελετά τον σχεδιασμό ευφυών αντιπροσώπων (ευφυών μηχανών). Ο John McCarthy ο οποίος επινόησε την έννοια το 1956 περιγράφει τον όρο ως μια επιστήμη και μηχανική για τη δημιουργία έξυπνων μηχανών. Είναι η επιστήμη που ασχολείται με την σχεδίαση ευφυών υπολογιστικών συστημάτων, τα οποία είναι σε θέση να επιδεικνύουν χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ευφυΐα της ανθρώπινης συμπεριφοράς [5] Η έννοια της ευφυΐας ενός συγκεκριμένου κοινωνικού συστήματος (πόλη, περιοχή, πολιτεία, και της κοινότητας) μπορεί να γίνει κατανοητή ως ένα αναπόσπαστο κατασκεύασμα που αποτελείται διαφορετικές θεωρητικές έννοιες και προσεγγίσεις [6].

Σύμφωνα με τους Figueiredo, Jesus, Machado, Ferreira και Martins de Carvalho (2001), τα έξυπνα συστήματα μεταφορών είναι ένα φαινόμενο παγκοσμίου επιπέδου με τις αυτοκινητοβιομηχανίες, τις επαγγελματικές μεταφορές και τους πολιτικούς να έχουν στρέψει το ενδιαφέρον προς αυτή την κατεύθυνση. Τα συστήματα αυτά (ITS) αποτελούν ένα συνδυασμό πληροφοριών (τηλεπικοινωνιών και ηλεκτρονικών συστημάτων) με σκοπό να αντιμετωπιστεί το μεταφορικό πρόβλημα, όπως είναι η ασφάλεια, η κυκλοφορική συμφόρηση, η προστασία του

περιβάλλοντος και η αποδοτικότητα των μεταφορών. Για την επίτευξη του στόχου σημαντικοί παράγοντες αποτελούν οι χρήστες, τα οχήματα και οι υποδομές [7].

Όπως αναφέρουν οι Abdulhai και Katann (2003), τα δίκτυα μεταφορών πρέπει να ελέγχονται σε πραγματικό χρόνο. Απαραίτητη προϋπόθεση των ITS αποτελούν η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, η διάγνωση, ο σχηματισμός και η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας. Επιπλέον, τυχόν προβλήματα μιας μη βέλτιστης διαδρομής μπορούν να αντιμετωπιστούν με μια σειρά μέτρων, έχοντας κάνει τμηματικούς ελέγχους στο σύστημα [8]. Στα ITS μπορεί να δοθεί επίσης και ο ακόλουθος ορισμός: **‘τα ITS είναι ένα ανερχόμενο παγκόσμιο φαινόμενο που περιλαμβάνει μια μακρά σειρά από διαφορετικές τεχνολογίες εφαρμοσμένες έτσι ώστε οι μετακινήσεις να σώζουν ζωές, χρήματα και χρόνο’** [9]. Η τεχνολογία των πληροφοριών έχει μετατρέψει πολλές βιομηχανίες, από την εκπαίδευση ως και τον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης και τώρα προσεγγίζει το μετασχηματισμό των συστημάτων μεταφορών.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Τα έξυπνα συστήματα μεταφορών αναπτύχθηκαν για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των μεταφορικών δικτύων. Η ιστορία τους χρονολογείται από την εξέλιξη των τεχνολογιών και των αναγκών της κοινωνίας [10]. Ας ρίξουμε μια ματιά στην ιστορική αναδρομή των έξυπνων συστημάτων μεταφορών:

1970-1990: Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ξεκίνησε η χρήση υπολογιστών και τεχνολογιών ελέγχου για τη βελτίωση των συστημάτων μεταφορών. Οι πρώτες εφαρμογές περιλάμβαναν συγχρονισμένους σηματοδότες, αυτόματους ελεγκτές φωτισμού και συστήματα κίνησης.

1990-2000: Κατά τη δεκαετία του '90, οι τεχνολογίες των επικοινωνιών και των πληροφοριών αναπτύχθηκαν μεγαλύτερα βήματα. Εμφανίστηκαν συστήματα πληροφόρησης επιβατών, όπου οι επιβάτες μπορούσαν να λαμβάνουν πληροφορίες για τα δρομολόγια, τους χρόνους αναμονής και τις καθυστερήσεις.

2000-2010: Κατά την αυτή την περίοδο, η τεχνολογία GPS έγινε πιο διαδεδομένη και επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της τοποθεσίας και την πλοήγηση των οχημάτων. Εμφανίστηκαν επίσης συστήματα ρύθμισης της κυκλοφορίας με βάση την κίνηση, καθώς και συστήματα αυτόματης πληρωμής διοδίων και στάθμευσης.

2010-2020: Κατά την τελευταία δεκαετία, οι έξυπνες τεχνολογίες μεταφορών εστιάστηκαν στη συνδεσιμότητα μεταξύ οχημάτων και υποδομών. Τα αυτόνομα οχήματα και η ευφυής κίνηση έγιναν πιο συνηθισμένα, με την εφαρμογή συστημάτων όπως ο αυτόματος πιλότος, οι αισθητήρες αποστάσεων και οι τεχνολογίες ανίχνευσης.

Από το 2020 και μετά: Η εξέλιξη συνεχίζεται, καθώς οι τεχνολογίες όπως το Internet of Things (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη και η ασύρματη επικοινωνία ενσωματώνονται στα έξυπνα συστήματα μεταφορών [10].

1.3 Βασικές τεχνολογίες των έξυπνων συστημάτων μεταφοράς

Τα έξυπνα συστήματα μεταφοράς έχουν εξελιχθεί τα τελευταία 20 χρόνια και έχουν χρησιμοποιήσει διάφορες τεχνολογίες για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των μεταφορικών συστημάτων. Ορισμένες από αυτές τις τεχνολογίες είναι:

Προηγμένα Συστήματα Διαχείρισης Κυκλοφορίας (Advanced Traffic Management Systems): Τα Σύγχρονα Συστήματα Διαχείρισης Κυκλοφορίας (Advanced Traffic Management Systems - ATMS) είναι εξελιγμένες τεχνολογικές λύσεις που σχεδιάζονται για να βελτιστοποιήσουν τη ροή της κυκλοφορίας σε αστικές περιοχές. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν μια συνδυασμένη προσέγγιση αισθητήρων, καμερών και έξυπνων αλγορίθμων για να συλλέγουν πραγματικού χρόνου δεδομένα για τις κυκλοφοριακές συνθήκες, να τα αναλύουν και να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις. Ρυθμίζοντας δυναμικά τους χρόνους σηματοδότησης, διαχειρίζονται οι λωρίδες κυκλοφορίας παρέχοντας πληροφορίες

πραγματικού χρόνου στους οδηγούς, τα ATMS στοχεύουν στην μείωση της συμφόρησης, τη βελτίωση της ασφάλειας και την ενίσχυση της συνολικής αποδοτικότητας των μεταφορών. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν στις πόλεις να ανταποκριθούν σε μεταβαλλόμενα πρότυπα κυκλοφορίας, να βάζουν σε προτεραιότητα τα οχήματα έκτακτης ανάγκης και να προωθούν βιώσιμες επιλογές μετακίνησης, με αποτέλεσμα μια πιο ομαλή και αξιόπιστη εμπειρία μετακίνησης για όλους τους οδηγούς [2].

Εμπορικές Λειτουργίες Οχημάτων (Commercial Vehicle Operation, C.V.O.): Το CVO αναφέρεται στο Commercial Vehicle Operations, το οποίο στα ελληνικά μεταφράζεται ως "Εμπορικές Λειτουργίες Οχημάτων". Αναφέρεται στις δραστηριότητες και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας στον τομέα των επαγγελματικών οχημάτων και των φορτηγών. Το CVO επικεντρώνεται στη βελτίωση της διαχείρισης των επαγγελματικών οχημάτων, την αύξηση της αποδοτικότητας των μεταφορών, την μείωση του κόστους λειτουργίας και τη βελτίωση της ασφάλειας. Με τη βοήθεια του CVO, μπορούν να παρακολουθούνται η κίνηση, οι χρόνοι αναμονής, οι περιορισμοί κυκλοφορίας, οι πληροφορίες για φορτία και δρομολόγια, και άλλες παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταφορές εμπορευμάτων [2].

Ηλεκτρονική Συλλογή Διοδίων (Electronic Toll Collection, E.T.C.): Η Ηλεκτρονική Συλλογή Διοδίων (Electronic Toll Collection - ETC) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει την αυτόματη πληρωμή των διοδίων σε αυτοκινητόδρομους. Όταν ένα όχημα που είναι εξοπλισμένο με σύστημα ETC περνά από τα διόδια, μια ηλεκτρονική κεραία ή αναγνώστης ανιχνεύει μια μικρή ταμπέλα που είναι τοποθετημένο στο παρμπρίζ του οχήματος. Η ταμπέλα αυτή περιέχει ένα ραδιοηλεκτρονικό πομποδέκτη που επικοινωνεί με τον αναγνώστη των διοδίων μεταδίδοντας ραδιοσυχνότητες. Μόλις ανιχνευτεί η ταμπέλα, το σύστημα ETC αυτόματα αφαιρεί το κατάλληλο αντίτιμο των διοδίων από τον λογαριασμό του οδηγού, εξαλείφοντας την ανάγκη για χειροκίνητη πληρωμή. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την άνετη και αποτελεσματική συλλογή διοδίων, μειώνοντας τη συμφόρηση και βελτιώνοντας τη ροή της κυκλοφορίας στους αυτοκινητόδρομους. Τα

συστήματα ETC χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον κόσμο καθώς προσφέρουν άνεση στους οδηγούς και επιταχύνουν τις διαδικασίες συλλογής διοδίων. Χρησιμοποιούν τεχνολογίες αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID) ή άλλες ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας για τη διευκόλυνση γρήγορων και απόλυτα ασύρματων συναλλαγών πληρωμής [2].

Έλεγχος φωτεινών σημάτων (Traffic Signal Control): Ο έλεγχος των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας στα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών αναφέρεται στην εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών και αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας. Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις για τον έλεγχο των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας στο ITS:

Έλεγχος με Σταθερό Χρόνο: Σε αυτήν την προσέγγιση, τα φωτεινά σήματα λειτουργούν σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα, με κύκλους πράσινου, κίτρινου και κόκκινου σε προκαθορισμένους χρόνους. Ο έλεγχος με σταθερό χρόνο συνήθως βασίζεται σε ιστορικά μοτίβα κυκλοφορίας και ενδέχεται να μην ανταποκρίνεται σε πραγματικούς χρόνους και συνθήκες κυκλοφορίας.

Έλεγχος με Ενεργοποίηση: Ο έλεγχος των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας με ενεργοποίηση χρησιμοποιεί αισθητήρες ή ανιχνευτές για τον εντοπισμό οχημάτων ή πεζών στις διασταυρώσεις. Τα σήματα προσαρμόζουν τον χρόνο τους με βάση την εντοπισμένη ζήτηση, προσδίδοντας προτεραιότητα στις πιο καταπονημένες κινήσεις. Ο έλεγχος με ενεργοποίηση μπορεί να ανταποκριθεί πιο ευέλικτα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κυκλοφορίας σε σχέση με τον έλεγχο με σταθερό χρόνο.

Προσαρμοστικός Έλεγχος: Τα συστήματα προσαρμοστικού ελέγχου των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας παρακολουθούν συνεχώς τις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και προσαρμόζουν δυναμικά τον χρόνο των σημάτων. Ο προσαρμοστικός έλεγχος μπορεί να ανταποκριθεί σε μεταβαλλόμενα μοτίβα κυκλοφορίας όπως συμφόρηση και ατυχήματα για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της κυκλοφορίας.

Συντονισμένος Έλεγχος: Ο συντονισμένος έλεγχος των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας στοχεύει να συγχρονίσει τους χρόνους των σημάτων σε πολλαπλές διασταυρώσεις κατά μήκος μιας διαδρομής, δημιουργώντας έναν "πράσινο κύμα". Αυτό επιτρέπει στα οχήματα να καταφέρουν λιγότερες στάσεις και ομαλότερη κίνηση κατά μήκος της διαδρομής.

Έξυπνος Έλεγχος: Ο έξυπνος έλεγχος των φωτεινών σημάτων κυκλοφορίας συνδυάζει διάφορες τεχνικές, όπως ο προσαρμοστικός έλεγχος, προβλεπτικοί αλγόριθμοι και τεχνητή νοημοσύνη, για τη βελτιστοποίηση των χρόνων των σημάτων βασισμένος σε πραγματικά και ιστορικά δεδομένα [11].

Διαχείριση Περιστατικών (Incident Management): Διαχείριση Περιστατικών στα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems) αναφέρεται στη διαδικασία και τα συστήματα που εμπλέκονται στη διαχείριση και ανταπόκριση σε περιστατικά που συμβαίνουν εντός των δικτύων μεταφορών, όπως αυτοκινητόδρομοι, δρόμοι και δημόσια μέσα μεταφοράς. Αυτά τα περιστατικά μπορεί να περιλαμβάνουν ατυχήματα, βλάβες, επικίνδυνα σημεία στο δρόμο, ακραίες καιρικές συνθήκες και άλλες διαταραχές στην κανονική ροή της κυκλοφορίας. Στόχος της διαχείρισης περιστατικών στα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος των περιστατικών στη ροή της κυκλοφορίας, να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των ταξιδιωτών και των ανταποκριτών και να διευκολυνθεί η γρήγορη επαναφορά της κανονικής λειτουργίας. Περιλαμβάνει μια συντονισμένη προσέγγιση που συνενώνει διάφορους φορείς, όπως οι υπηρεσίες μεταφορών, οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, οι αρχές επιβολής του νόμου και οι ομάδες συντήρησης. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά κύρια στοιχεία και δραστηριότητες που συμπεριλαμβάνονται στη διαχείριση περιστατικών στα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών:

Εντοπισμός Περιστατικού: Χρησιμοποίηση διάφορων τεχνολογιών, όπως κάμερες παρακολούθησης, αισθητήρες κυκλοφορίας και συστήματα παρακολούθησης οχημάτων, για τον ανίχνευση περιστατικών πραγματικού χρόνου. Αυτά τα

συστήματα μπορούν να αναγνωρίσουν αυτόματα περιστατικά ή να βασίζονται σε αναφορές από οδηγούς ή άλλες πηγές.

Επαλήθευση και Αξιολόγηση Περιστατικού: Επιβεβαίωση της ύπαρξης και φύσης του περιστατικού και αξιολόγηση της σοβαρότητάς του και των δυνητικών επιπτώσεών του στη ροή της κυκλοφορίας και την ασφάλεια. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αποστολή ομάδων ανταπόκρισης στην τοποθεσία του περιστατικού για περαιτέρω έρευνα.

Σχεδιασμός Αντίδρασης: Ανάπτυξη σχεδίων και πρωτοκόλλων αντίδρασης για διάφορα είδη περιστατικών, προκειμένου να καθοδηγούν τις ενέργειες των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης, των ομάδων συντήρησης και άλλων ανταποκριτών. Αυτά τα σχέδια περιγράφουν τις κατάλληλες ενέργειες που πρέπει να ληφθούν, όπως οδικές αποκλίσεις, αποκλεισμοί λωρίδων ή ανακατευθύνσεις. Τα έξυπνα συστήματα μεταφορών, όπως πινακίδες μεταβλητού μηνύματος και μεταβλητά όρια ταχύτητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν πληροφορίες πραγματικού χρόνου στους οδηγούς και να τους καθοδηγήσουν γύρω από το περιστατικό.

Διαχείριση Κυκλοφορίας: Εφαρμογή μέτρων ελέγχου κυκλοφορίας για την ελαχιστοποίηση της συμφόρησης και τη διευκόλυνση της κίνησης της κυκλοφορίας γύρω από το περιστατικό. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη δημιουργία προσωρινών αποκλίσεων κυκλοφορίας, αποκλεισμό λωρίδων ή ανακατευθύνσεις. Τα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν πληροφορίες πραγματικού χρόνου στους οδηγούς και να τους καθοδηγήσουν γύρω από το περιστατικό.

Αντίδραση σε Περιστατικό: Συντονισμός των προσπάθειών από τις διάφορες υπηρεσίες και οργανισμούς που εμπλέκονται στη διαχείριση περιστατικών, όπως οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, η αστυνομία, οι υπηρεσίες ρυμούλκησης και οι αρχές μεταφορών. Η αποτελεσματική επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ αυτών των φορέων είναι ζωτικής σημασίας για μια έγκαιρη και αποτελεσματική αντίδραση.

Εκκαθάριση και Αποκατάσταση του Περιστατικού: Μόλις το περιστατικό επιλυθεί, εκκαθάριση της τοποθεσίας του περιστατικού και επαναφορά της κανονικής ροής της κυκλοφορίας όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αφαίρεση κατεστραμμένων οχημάτων, ερείπια ή οποιωνδήποτε άλλων εμποδίων και την αποκατάσταση τυχόν ζημιών στον δρόμο ή την υποδομή. Η διαχείριση περιστατικών στα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών είναι κρίσιμη για την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα και την ομαλή λειτουργία των μεταφορών. Με τη χρήση τεχνολογίας και τη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων φορέων, μπορούμε να βελτιώσουμε την ανταπόκριση σε περιστατικά και να διασφαλίσουμε μια ασφαλή και αποτελεσματική κυκλοφορία στα έξυπνα συστήματα μεταφορών [12].

Τεχνολογίες ελέγχου οχημάτων (Vehicle Control Technologies): Οι τεχνολογίες ελέγχου οχημάτων παίζουν ένα κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της ασφάλειας των οχημάτων, της άνεσης της οδήγησης και της μείωσης του κινδύνου ατυχημάτων. Εξελίσσονται συνεχώς και ενσωματώνονται σε σύγχρονα οχήματα για να παρέχουν καλύτερο έλεγχο, υποστήριξη και άνεση στους οδηγούς. Μερικές από τις τεχνολογίες ελέγχου οχημάτων στα έξυπνα συστήματα μεταφοράς είναι:

Ρυθμιστής Ταχύτητας (Cruise Control): Ο ρυθμιστής ταχύτητας είναι ένα σύστημα που επιτρέπει στον οδηγό να ορίσει μια σταθερή ταχύτητα για το όχημα χωρίς να χρειάζεται να πατά συνεχώς το πεντάλ του γκαζιού. Βοηθά στη διατήρηση μιας σταθερής ταχύτητας, που μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τη διάρκεια μακρών οδηγήσεων στον αυτοκινητόδρομο.

Αντιμπλοκάρισμα Φρένων (ABS): Τα αντιμπλοκάρια συστήματα φρένων σχεδιάστηκαν για να αποτρέπουν τον κλείσιμο των τροχών κατά τη διάρκεια του σκληρού φρεναρίσματος. Μέσω της γρήγορης ρύθμισης της πίεσης των φρένων σε κάθε τροχό, το ABS επιτρέπει στον οδηγό να διατηρεί τον έλεγχο του τιμονιού, μειώνοντας την απόσταση φρεναρίσματος. Αυτή η τεχνολογία βελτιώνει την ευστάθεια του οχήματος και μειώνει τον κίνδυνο ολίσθησης.

Ηλεκτρονικό Σύστημα Σταθερότητας (ESC): Το ηλεκτρονικό σύστημα σταθερότητας ανιχνεύει και μειώνει την απώλεια τριβής (ολίσθηση) κατά τη διάρκεια στροφών ή εκτροπών. Εφαρμόζει ξεχωριστά τα φρένα και προσαρμόζει την ισχύ του κινητήρα για να βοηθήσει τον οδηγό να διατηρήσει τον έλεγχο του οχήματος. Το ESC είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην πρόληψη ανατροπών και βελτιώνει συνολικά την ευστάθεια του οχήματος.

Δείκτες Δυσλειτουργίας: Τα σύγχρονα οχήματα είναι εξοπλισμένα με διαγνωστικά συστήματα που παρακολουθούν διάφορα εξαρτήματα και συστήματα. Οι δείκτες δυσλειτουργίας, γνωστοί και ως λυχνίες ελέγχου κινητήρα, ειδοποιούν τον οδηγό όταν εντοπίζεται ένα πιθανό πρόβλημα ή βλάβη στο όχημα. Αυτοί οι δείκτες βοηθούν στον εντοπισμό προβλημάτων εγκαίρως και καλούν τους οδηγούς να ζητήσουν επαγγελματική βοήθεια για διάγνωση και επισκευές.

Αυτοματοποιημένα Συστήματα Αυτοκινητοδρόμων: Τα αυτοματοποιημένα συστήματα αυτοκινητοδρόμων, γνωστά και ως αυτόνομα ή αυτόματα συστήματα οδήγησης, στοχεύουν να αυτοματοποιήσουν ορισμένες πτυχές της οδήγησης, από απλές εργασίες όπως η διατήρηση της θέσης στη λωρίδα έως και σε πιο πολύπλοκες κινήσεις όπως η αλλαγή λωρίδας και η ενσωμάτωση στον αυτοκινητόδρομο. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν αισθητήρες, κάμερες, ραντάρ και προηγμένους αλγόριθμους για να ερμηνεύουν το περιβάλλον και να λαμβάνουν αποφάσεις οδήγησης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα πλήρως αυτόνομα οχήματα εξακολουθούν να αναπτύσσονται και δεν είναι ακόμα διαθέσιμα ευρέως για τη χρήση των καταναλωτών [13].

Προηγμένα Συστήματα Πληροφόρησης Ταξιδιωτών (Advanced Travelers Information): Σε αυτή την τεχνολογία τα συστήματα συλλέγουν πληροφορίες από το γενικό σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας και έχουν ως σκοπό την πληροφόρηση των ταξιδιωτών σε πραγματικό χρόνο. Οι πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες κυκλοφορίας του συστήματος μεταφοράς επηρεάζουν τους οδηγούς έτσι ώστε να κάνουν καλύτερη χρήση του συστήματος επιτρέποντας την μείωση της συμφόρησης, βελτιστοποιώντας την κυκλοφοριακή ροή και μειώνοντας την

ρύπανση. Με αυτό το σύστημα οι ταξιδιώτες από όπου κι αν βρίσκονται μπορούν να αποφασίζουν ποια είναι η πιο συμφέρουσα διαδρομή για να ακολουθήσουν με στόχο να φτάσουν στον προορισμό τους με τον πιο ευνοϊκότερο μέσο μεταφοράς και το πιο κατάλληλο πρόγραμμα για να υιοθετήσουν. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να προσπελάσουν μέσω ηλεκτρονικών συσκευών είτε πρόκειται για φορητές συσκευές με πρόσβαση στο διαδίκτυο, προσφέροντας μια ποικιλομορφία πληροφοριών όπως δημοσιές μεταφορές, εναλλακτικοί αυτοκινητόδρομοι, πρατήρια καυσίμων, χώροι στάθμευσης, ξενοδοχεία είτε πρόκειται για συστήματα εντός οχημάτων που επιδεικνύει το χάρτη, με τις πληροφορίες της θέσης του οχήματος, την κατάσταση της κυκλοφορίας στην γύρω περιοχή, των καθυστερήσεων ή των ατυχημάτων [14].

1.4 Οφέλη στην κατανάλωση καυσίμου

Οι τεχνολογίες ITS εφαρμόζονται στη διαχείριση του συστήματος (διαμετακόμιση και αυτοκινητόδρομοι) μειώνοντας την κατανάλωση του καυσίμου δραστικά, εξυπηρετώντας την [2]:

Διευκόλυνση του βέλτιστου σχεδιασμού και συγχρονισμού των διαδρομών: Η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών και δεδομένων μπορεί να βοηθήσει στον βέλτιστο σχεδιασμό των διαδρομών με βάση την κίνηση και τη ζήτηση. Έξυπνα συστήματα πλοήγησης μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για την κίνηση και να προτείνουν βέλτιστες διαδρομές για να μειώσουν τη συμφόρηση και τον χρόνο ταξιδιού.

Εξομάλυνση των επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων και οδήγηση με στάση και κίνηση: Η χρήση προηγμένων συστημάτων αυτοματισμού και ανάκτησης ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην εξομάλυνση των επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων των οχημάτων, προσφέροντας ομαλότερη οδήγηση και μείωση της κατανάλωσης καυσίμων.

Μείωση της συμφόρησης: Η χρήση έξυπνων συστημάτων διαχείρισης της κυκλοφορίας, όπως ο έξυπνος σηματοδότης, η ανάπτυξη εναλλακτικών διαδρομών

και η προώθηση της δημόσιας μεταφοράς μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της συμφόρησης και στη βελτίωση της ροής της κυκλοφορίας.

Τιμολόγηση και διαχείριση της ζήτησης: Μέσω της εφαρμογής στρατηγικών τιμολόγησης και διαχείρισης της ζήτησης, όπως η διαφοροποίηση των τιμών των διοδίων ανάλογα με την κίνηση και η προώθηση της μετακίνησης εκτός αιχμής, μπορούν να επιτευχθούν πιο ισορροπημένες και αποδοτικές μετακινήσεις.

Ελκυστικότητα της δημόσιας χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς: Προωθώντας την πρόσβαση, την άνεση, την ασφάλεια και την αξιοπιστία των μέσων μαζικής μεταφοράς, μπορεί να αυξηθεί η ελκυστικότητά τους για τους ανθρώπους, προωθώντας έτσι τη χρήση τους και μειώνοντας την κίνηση με ιδιωτικά οχήματα.

Προσαρμογή της μετάδοσης των οχημάτων σε διάφορες οδικές συνθήκες και εδάφη: Η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών μετάδοσης και τον σχεδιασμό οχημάτων που μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικές οδικές συνθήκες και τις συνθήκες του εδάφους, μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια και την απόδοση των οχημάτων.

Διευκόλυνση μικρών διμοιριών με στενή απόσταση μεταξύ των οχημάτων: Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων αυτόνομης οδήγησης και επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων μπορεί να διευκολύνει τη δημιουργία μικρών διμοιριών με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, επιτρέποντας την μείωση του βάρους των οχημάτων χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια των επιβατών [2].

1.5 Ενεργειακές επιπτώσεις - εργαλεία αξιολόγησης

Η έκθεση του 1998 της EPA εξέτασε τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ITS. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη καυσίμων ITS είναι δύσκολη λόγω της σύνθετης σχέσης μεταξύ τους και της ταξιδιωτικής συμπεριφοράς. Προσομοίωση και μοντέλα ζήτησης μπορούν να βοηθήσουν, αλλά απαιτείται περαιτέρω εργασία. Το ολοκληρωμένο ITS απαιτεί μοντέλα για την πρόβλεψη επιπτώσεων στην κυκλοφορία και την ταξιδιωτική συμπεριφορά. Τα παραδοσιακά

εργαλεία δεν ανταποκρίνονται στις συνδέσεις μεταξύ των τεχνολογιών ITS και των ανατροφοδοτητικών μηχανισμών.

Για παράδειγμα, τα μοντέλα ταξιδιωτικής ζήτησης συνήθως δεν ανταποκρίνονται σε βελτιώσεις που σχετίζονται με την πληροφόρηση (π.χ. οδικές συνθήκες) και αλλαγές σε επίπεδο διασταυρώσεων και διαδρόμων. Τέτοιες επιπτώσεις αξιολογούνται συνήθως με τη χρήση παραδοσιακών εργαλείων μικροπροσομοίωσης, τα οποία στερούνται τις συμπεριφορικές παραδοχές της ταξιδιωτικής συμπεριφοράς. Συνεπώς, απαιτούνται νέες προσεγγίσεις για την καταγραφή σε πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις και επιπτώσεις των ITS. Αυτά τα εργαλεία πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να αντικατοπτρίζουν διαφορετικές σενάρια (π.χ. διεύθυνση στην αγορά και συμπεριφορά παραδοχές), να καταγράφουν τις επιπτώσεις των ITS στη δυναμική επιλογή τρόπου και διαδρομής και να προσομοιώνουν μεμονωμένες μοτίβα οδήγησης οχημάτων [2].

Το Integration, το DynaSmart, το Transmis και το FOT (Field Operational Tests) είναι εργαλεία αξιολόγησης και μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην έρευνα και ανάλυση των μεταφορών. Εδώ παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση για καθένα από αυτά:

Integration: Το Integration είναι ένα προηγμένο μοντέλο μικροπροσομοίωσης που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τεχνολογιών Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών (ITS). Σχεδιάστηκε για να προσομοιώνει ολοκληρωμένα δίκτυα που αποτελούνται από αυτοκινητόδρομους και αρτηριακούς δρόμους, επιτρέποντας την αξιολόγηση διάφορων σεναρίων ITS. Το Integration παρέχει εκτιμήσεις αποτελεσματικότητας για μεμονωμένα οχήματα, συνδέσμους, ζεύγη αφετηρίας-προορισμού και πλήρη δίκτυα. Αυτές οι εκτιμήσεις περιλαμβάνουν χρόνο ταξιδιού, κατανάλωση καυσίμων, εκπομπές οχημάτων και άλλες σχετικές παραμέτρους.

DynaSmart: Το DynaSmart είναι ένα άλλο μοντέλο μικροπροσομοίωσης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μεταφορικών συστημάτων και των εφαρμογών ITS. Επικεντρώνεται ιδιαίτερα στη μοντελοποίηση των δυναμικών λειτουργιών της κυκλοφορίας και την ανάλυση των επιπτώσεων διαφορετικών

στρατηγικών μεταφορών. Το DynaSmart μπορεί να προσομοιώσει πολύπλοκα φαινόμενα κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένης της συμφόρησης, των κινήσεων οχημάτων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ οχημάτων και συσκευών ελέγχου κυκλοφορίας. Παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα κυκλοφορίας, την ανάλυση χωρητικότητας και τις μετρήσεις απόδοσης για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των μεταφορών.

Transmis: Το Transmis (Transportation Management and Information Systems) είναι ένα εργαλείο αξιολόγησης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των επιπτώσεων και των οφελών των συστημάτων διαχείρισης και πληροφορικής μεταφορών. Επικεντρώνεται στην αξιολόγηση προηγμένων τεχνολογιών και στρατηγικών για τη βελτίωση των λειτουργιών και της αποδοτικότητας των μεταφορών. Το Transmis ενσωματώνει δεδομένα από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των ανιχνευτών κυκλοφορίας, των συστημάτων πληροφόρησης των επιβατών και των συστημάτων διαχείρισης περιστατικών. Επιτρέπει την ανάλυση της εξοικονόμησης χρόνου ταξιδιού, της μείωσης συμφόρησης, της αποτελεσματικότητας διαχείρισης περιστατικών και άλλων μετρητών απόδοσης που σχετίζονται με τα συστήματα διαχείρισης μεταφορών.

FOT Evaluation Tools: Οι Field Operational Tests (FOT) είναι μεγάλης κλίμακας δοκιμές στο πραγματικό κόσμο που αξιολογούν την αποτελεσματικότητα νέων τεχνολογιών και συστημάτων μεταφορών. Τα εργαλεία αξιολόγησης FOT περιλαμβάνουν μια σειρά μεθόδων και μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών. Αυτά τα εργαλεία συνήθως περιλαμβάνουν στατιστική ανάλυση, εξόρυξη δεδομένων και τεχνικές οπτικοποίησης για την αξιολόγηση της απόδοσης, της ασφάλειας, της αποδοχής από τους χρήστες και άλλων σχετικών παραγόντων των δοκιμαζόμενων τεχνολογιών. Τα εργαλεία αξιολόγησης FOT βοηθούν τους ερευνητές και τους πολιτικούς λήψης αποφάσεων να λάβουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την εφαρμογή και την υλοποίηση νέων λύσεων μεταφορών [15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Επικοινωνία οχημάτων

2.1 Εισαγωγή στην επικοινωνία οχημάτων

Ο πρωταρχικός στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να καταδείξει τα απτά οφέλη από την ενσωμάτωση των ευφών συστημάτων στη μηχανική των μεταφορών, ιδίως όσον αφορά την οδική ασφάλεια. Στη σημερινή αυτοκινητοβιομηχανία, η ενίσχυση της οδικής ασφάλειας έχει καταστεί σημαντικός τομέας εστίασης, οδηγώντας στην εισαγωγή διαφόρων τεχνολογικών λύσεων στα σύγχρονα οχήματα. Οι λύσεις αυτές περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως αισθητήρες κατά της σύγκρουσης, προηγμένα συστήματα πλοήγησης, συστήματα ειδοποίησης του οδηγού, συστήματα υποβοηθούμενης στάθμευσης και δυνατότητες αυτόνομης οδήγησης. Ωστόσο, η πρόκληση έγκειται στην έλλειψη διαλειτουργικότητας μεταξύ των ιδιόκτητων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς κατασκευαστές, εμποδίζοντας την αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των οχημάτων. Κατά συνέπεια, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για τη δημιουργία ενός τυποποιημένου συστήματος που θα διευκολύνει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση και συνεργασία μεταξύ του ποικίλου φάσματος υπηρεσιών και εφαρμογών που διατίθενται στην αγορά.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού θα πρέπει να ανανεωθούν όλες ή τμήματα των υφιστάμενων υποδομών. Υπό αυτή την έννοια, όλες οι εθνικές κυβερνήσεις θα πρέπει να δημιουργήσουν συμπράξεις δημόσιου/ιδιωτικού τομέα που θα τους επιτρέψουν να βρουν τα απαραίτητα κεφάλαια για τον εκσυγχρονισμό ολόκληρου του οδικού δικτύου. Είναι επιθυμητό ότι οι επενδύσεις αυτές θα πρέπει να παρέχουν οικονομική απόδοση συμβατή με τις δημόσιες δαπάνες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα συστήματα μεταφορών συνήθως εξαρτώνται κυρίως από τα δεδομένα που συλλέγονται από το δίκτυο, ο κατάλληλος σχεδιασμός και η διαχείριση του δικτύου επικοινωνίας είναι ένα ουσιαστικό βήμα για τη διανομή του σημαντικότερου αριθμού εφαρμογών. Ο στόχος αυτός θα είναι ένα ουσιαστικό βήμα για να γίνουν τα συστήματα αυτά στιβαρά και αξιόπιστα. Μεταξύ των μοντέλων που είναι χρήσιμα για το σκοπό αυτό, οι επικοινωνίες Vehicle-to-Vehicle(V2V), Vehicle-

to- Infrastructure(V2I) και Vehicle-to-Everything(V2X) διαδραματίζουν αναμφίβολα ουσιαστικό ρόλο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο όρος "V2X" περιλαμβάνει όλες τις μορφές επικοινωνίας οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των V2V και V2I. Ωστόσο, για τους σκοπούς του παρόντος κεφαλαίου, κάθε τομέας επικοινωνίας εξετάζεται χωριστά, προκειμένου να αναδειχθούν λεπτομερέστερα τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Το παρόν κεφάλαιο έχει την ακόλουθη διάρθρωση : Το υποκεφάλαιο 2.2 επικεντρώνεται στην επικοινωνία V2V, συζητώντας τα βασικά συστήματα και τις εφαρμογές που πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την επιτυχή τεχνολογική συνεργασία μεταξύ οχημάτων. Στη συνέχεια, τα υποκεφάλαια 2.3 και 2.4 εμβαθύνουν στα κύρια χαρακτηριστικά των V2I και V2X, αντίστοιχα.

2.2 Όχημα-προς-όχημα (vehicle-to-vehicle)

Ο βασικός σκοπός της επικοινωνίας από οχήματος προς οχήματος (Vehicle-to-Vehicle - V2V) είναι να ενισχύσει την οδική ασφάλεια και να προλάβει ατυχήματα. Με τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων μεταξύ μηχανοκίνητων οχημάτων, η τεχνολογία V2V επιτρέπει στα οχήματα σε κίνηση να ανταλλάσσουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη θέση, την ταχύτητα και άλλα σχετικά δεδομένα [16].

Μέσω της επικοινωνίας V2V, τα οχήματα μπορούν να δημιουργήσουν ένα αυθόρμητο δίκτυο δικτύου (mesh network), όπου ανταλλάσσουν πραγματικού χρόνου πληροφορίες μεταξύ τους. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν δεδομένα σχετικά με την τρέχουσα θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και την κατεύθυνση των οχημάτων. Λαμβάνοντας αυτά τα δεδομένα από τα γύρω οχήματα, ένα όχημα μπορεί να δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη εικόνα του κυκλοφοριακού περιβάλλοντος. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται μέσω της επικοινωνίας V2V επιτρέπουν στα οχήματα να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις πραγματικού χρόνου. Για παράδειγμα, αν ένα όχημα ανιχνεύσει ότι ένα άλλο όχημα μπροστά αφήνει ξαφνικά το πόδι από το γκάζι ή κάνει μια ξαφνική αλλαγή λωρίδας, μπορεί να ειδοποιήσει τον οδηγό ή ακόμη και να ενεργοποιήσει αυτόματα συστήματα φρεναρίσματος για να αποτρέψει μια πιθανή σύγκρουση. Επίσης, η επικοινωνία

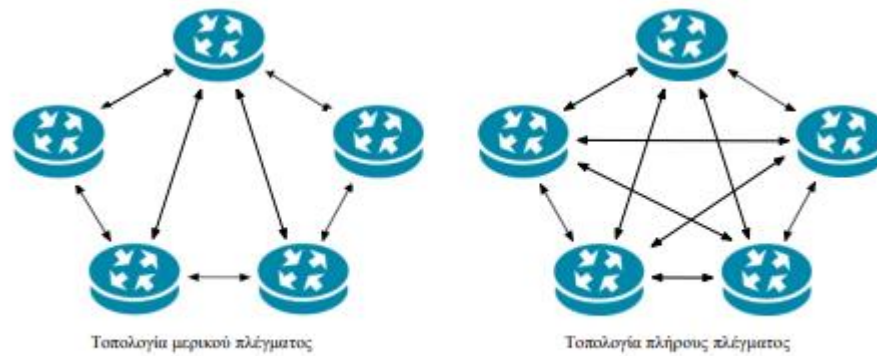
V2V μπορεί να προειδοποιήσει τους οδηγούς για την παρουσία έκτακτων οχημάτων ή άλλων δυνητικών κινδύνων στον δρόμο [16].

Μέσω της κοινής αντίληψης του περιβάλλοντος από τα οχήματα, η επικοινωνία V2V βελτιώνει τη συνολική κατανόηση της κατάστασης και βοηθά στην πρόληψη ατυχημάτων που προκαλούνται από ανθρώπινο λάθος, απότομες κινήσεις ή τυφλά σημεία. Αποτελεί μια επιπλέον στρώση ασφάλειας που συμπληρώνει τα υπάρχοντα συστήματα ασφαλείας, όπως οι τεχνολογίες αποφυγής σύγκρουσης, τα προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού και η οδική υποδομή. Συνολικά, ο σκοπός της επικοινωνίας V2V είναι να δημιουργήσει ένα πιο ασφαλές και αποδοτικό σύστημα μεταφορών με τη διευκόλυνση προαγωγής επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ οχημάτων στον δρόμο. Μειώνοντας την πιθανότητα ατυχημάτων και βελτιώνοντας τη συνολική ροή της κυκλοφορίας, η τεχνολογία V2V έχει τη δυνατότητα να σώσει ζωές, να μειώσει τη συμφόρηση και να βελτιώσει την συνολική εμπειρία οδήγησης [16].

Το δίκτυο πλέγματος μπορεί να έχει δύο τύπους συνδεσιμότητας: πλήρως συνδεδεμένο(Full-Mesh topology) και μερικώς συνδεδεμένο (Partial-Mesh topology), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1** [16]. Σε ένα πλήρως συνδεδεμένο πλέγμα, κάθε κόμβος είναι άμεσα συνδεδεμένος με όλους τους άλλους κόμβους, ενώ σε ένα μερικώς συνδεδεμένο πλέγμα, ορισμένοι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με όλους τους άλλους και οι υπόλοιποι είναι συνδεδεμένοι με εκείνους με τους οποίους ανταλλάσσουν συχνά δεδομένα. Αυτό επιτρέπει στους κόμβους σε ένα δίκτυο πλέγματος να ανταλλάσσουν μηνύματα με κοντινούς κόμβους με τους οποίους είναι άμεσα συνδεδεμένοι ή να επιλέγουν διαφορετικές διαδρομές για να φτάσουν στον προορισμό τους μέσω γειτονικών κόμβων (multi-hop) [17].

Η τοπολογία του δικτύου πλέγματος ενισχύει την ανθεκτικότητα του δικτύου. Εάν ένας κόμβος αποτύχει ή αντιμετωπίσει προσωρινά προβλήματα, το δίκτυο υπολογίζει εκ νέου τις διαδρομές μέσα στους πίνακες προώθησης για να διασφαλίσει ότι όλοι οι προορισμοί εξακολουθούν να είναι προσβάσιμοι. Στο παρελθόν, η κατασκευή ενσύρματων δικτύων πλέγματος ήταν δαπανηρή και δύσκολη, καθώς κάθε κόμβος απαιτούσε φυσικές συνδέσεις. Ωστόσο, η ασύρματη επικοινωνία και η εμφάνιση των ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής (WPAN) ξεπέρασαν αυτούς τους περιορισμούς. Στα WPAN, κάθε αυτόνομος και κινητός

κόμβος σχηματίζει ένα μερικώς συνδεδεμένο δίκτυο πλέγματος χωρίς να βασίζεται σε έναν κεντρικό σταθμό βάσης. Αντ' αυτού, οι κόμβοι προωθούν πακέτα μεταξύ τους. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή να συνδέονται στο Διαδίκτυο για την παροχή πρόσθετων υπηρεσιών [17].



Σχήμα 1. Τοπολογίες πλέγματος.

Ανάλογα με την εξέλιξή της, η τεχνολογία V2V μπορεί να παρέχει προειδοποιήσεις στους οδηγούς για πιθανά ατυχήματα ή να επιτρέπει στα οχήματα να αναλαμβάνουν αυτόνομα προληπτικές ενέργειες, όπως πέδηση έκτακτης ανάγκης. Σε αντίθεση με τα τρέχοντα ενσωματωμένα συστήματα στα οχήματα που βασίζονται αποκλειστικά σε αισθητήρες, κάμερες και ραντάρ τα οποία σχεδιάζονται από τον κατασκευαστή αρχικού εξοπλισμού (OEM), οι επικοινωνίες V2V αναμένεται να είναι πιο αποτελεσματικές στην ενίσχυση της ασφάλειας των οχημάτων. Αυτά τα ενσωματωμένα συστήματα αντιδρούν σε επικίνδυνες καταστάσεις με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους που ανιχνεύονται από τις ενσωματωμένες συσκευές, όπως η ταχύτητα, η απόσταση από τα εμπόδια ή η παρουσία οχημάτων στα τυφλά σημεία. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει κίνδυνος σφαλμάτων υπολογισμού σε αυτές τις τεχνολογίες, παρά την αυξανόμενη αξιοπιστία τους [18].

Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας V2V έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν σημαντικά τις επιδόσεις ασφάλειας, επιτρέποντας στα οχήματα να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων εντός του δικτύου πλέγματος μπορεί να βοηθήσει ένα όχημα που βρίσκεται σε κίνδυνο, όπως όταν ο οδηγός κοιμάται, ένα εξάρτημα δυσλειτουργεί ή υπάρχει εμπόδιο στη λωρίδα κυκλοφορίας, να λάβει καλύτερες αποφάσεις για την επίλυση του

αναδυόμενου προβλήματος. Ως εκ τούτου, ο κύριος στόχος κάθε κόμβου εντός του δικτύου πλέγματος είναι να συλλέγει δεδομένα και να διασφαλίζει την ασφάλεια του ίδιου και των γειτονικών του οχημάτων [19].

Μια επισκόπηση των σημερινών αυτονόμων συστημάτων ασφάλειας OEM (που χρησιμοποιούνται στα οχήματα τελευταίας γενιάς) θα παράσχει πλήρη γνώση των τεχνολογιών που είναι διαθέσιμες σήμερα στην αγορά. Τα κεντρικά συστήματα OEM που είναι σήμερα ευρέως διαδεδομένα είναι τα ακόλουθα:

Η παρακολούθηση τυφλού σημείου (Blind Spot Monitoring) είναι ένα χαρακτηριστικό ασφαλείας του οχήματος που βοηθά τους οδηγούς να εντοπίζουν και να διαχειρίζονται τα τυφλά σημεία, δηλαδή τις περιοχές γύρω από το όχημα που δεν είναι ορατές από τους πλευρικούς καθρέφτες ή τους καθρέφτες οπισθοπορείας. Τα συστήματα BSM χρησιμοποιούν συνήθως αισθητήρες, όπως ραντάρ ή κάμερες, για την παρακολούθηση των παρακείμενων λωρίδων δίπλα στο όχημα. Όταν ένα όχημα εισέρχεται στο τυφλό σημείο του οδηγού, το σύστημα BSM παρέχει οπτικές ή ηχητικές ειδοποιήσεις για να προειδοποιήσει τον οδηγό για τον πιθανό κίνδυνο σύγκρουσης. Αυτή η τεχνολογία ενισχύει την επίγνωση της κατάστασης και βοηθά στην ασφαλέστερη αλλαγή λωρίδας, μειώνοντας τις πιθανότητες ατυχημάτων που προκαλούνται από απαρατήρητα οχήματα στα τυφλά σημεία. Το BSM έχει γίνει κοινό χαρακτηριστικό στα σύγχρονα οχήματα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ασφάλειας του οδηγού και στην αποφυγή συγκρούσεων κατά τη διάρκεια ελιγμών στη λωρίδα κυκλοφορίας[20].

Το Anti-Schlupf Regierung (ASR), επίσης γνωστό ως Σύστημα ελέγχου πρόσφυσης (Traction Control System) ή Αυτόματος έλεγχος ευστάθειας (Automatic Stability Control), είναι ένα χαρακτηριστικό ασφαλείας του οχήματος που έχει σχεδιαστεί για να αποτρέπει την απώλεια πρόσφυσης των τροχών κατά την επιτάχυνση ή σε ολισθηρές οδικές συνθήκες. Τα συστήματα ASR/TCS/ASC λειτουργούν παρακολουθώντας συνεχώς την ταχύτητα περιστροφής κάθε τροχού και συγκρίνοντας την με την ταχύτητα του οχήματος και άλλες εισόδους αισθητήρων. Όταν ανιχνεύεται ολίσθηση των τροχών, το σύστημα επεμβαίνει μειώνοντας την ισχύ του κινητήρα και εφαρμόζοντας δύναμη πέδησης στους περιστρεφόμενους

τροχούς, επιτρέποντας στα ελαστικά να ανακτήσουν την πρόσφυση και να διατηρήσουν την ευστάθεια. Αυτή η τεχνολογία βελτιώνει τον έλεγχο του οχήματος, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το οδόστρωμα είναι βρεγμένο, παγωμένο ή ανώμαλο, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο ολίσθησης ή απώλειας ελέγχου. Τα συστήματα ASR/TCS/ASC συναντώνται συνήθως στα σύγχρονα οχήματα και συμβάλλουν στη βελτίωση της ασφάλειας βοηθώντας τους οδηγούς να διατηρούν τη βέλτιστη πρόσφυση και σταθερότητα κατά την επιτάχυνση και τους ελιγμούς [21].

Το Ηλεκτρονικό Πρόγραμμα Ευστάθειας (Electronic Stability Program)

είναι ένα χαρακτηριστικό ασφαλείας του οχήματος που βοηθά στη διατήρηση του ελέγχου και της ευστάθειας σε διάφορες συνθήκες οδήγησης. Γνωστό και ως Ηλεκτρονικός Έλεγχος Ευστάθειας (ESC) ή Δυναμικός Έλεγχος Ευστάθειας (DSC), το ESP χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό αισθητήρων για τη συνεχή παρακολούθηση της δυναμικής του οχήματος, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας των τροχών, της γωνίας διεύθυνσης, της πλευρικής επιτάχυνσης και του ρυθμού εκτροπής. Αναλύοντας αυτές τις εισροές, το σύστημα ESP μπορεί να ανιχνεύσει πότε το όχημα αποκλίνει από την προβλεπόμενη πορεία ή παρουσιάζει αστάθεια. Σε τέτοιες καταστάσεις, το σύστημα εφαρμόζει επιλεκτικά δύναμη πέδησης σε μεμονωμένους τροχούς και ρυθμίζει την ισχύ του κινητήρα για να βοηθήσει να επανέλθει το όχημα στην πορεία του. Το ESP είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη μείωση του κινδύνου ολίσθησης ή απώλειας ελέγχου κατά τη διάρκεια ελιγμών έκτακτης ανάγκης, ξαφνικών στροφών ή ολισθηρών οδικών συνθηκών. Αυτή η τεχνολογία ενισχύει σημαντικά την ασφάλεια του οχήματος, βοηθώντας τους οδηγούς στη διατήρηση της σταθερότητας και μειώνοντας την πιθανότητα ατυχημάτων που προκαλούνται από υπερστροφή, υποστροφή ή απώλεια ελέγχου. Το ESP αποτελεί πλέον βασικό χαρακτηριστικό σε πολλά οχήματα, συμβάλλοντας σε ασφαλέστερες και πιο ελεγχόμενες εμπειρίες οδήγησης [22].

Η προειδοποίηση εμπρόσθιας σύγκρουσης (Forward Collision Warning)

είναι ένα σύστημα ασφαλείας οχήματος που χρησιμοποιεί αισθητήρες, όπως ραντάρ ή κάμερες, για να ανιχνεύει πιθανές συγκρούσεις με προπορευόμενα οχήματα ή εμπόδια. Το σύστημα FCW παρακολουθεί συνεχώς την απόσταση μεταξύ του

οχήματος και του προπορευόμενου αντικειμένου, καθώς και τη σχετική ταχύτητα. Εάν το σύστημα διαπιστώσει ότι επίκειται σύγκρουση ή ότι η απόσταση μειώνεται ραγδαία, ειδοποιεί τον οδηγό μέσω οπτικών ή ακουστικών προειδοποιήσεων, προτρέποντάς τον να λάβει μέτρα αποφυγής. Το FCW έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ένα πρόσθετο επίπεδο ασφάλειας, βοηθώντας τους οδηγούς να αναγνωρίζουν και να αντιδρούν σε πιθανές μετωπικές συγκρούσεις, ειδικά σε καταστάσεις όπου η προσοχή τους μπορεί να αποσπαστεί στιγμιαία ή να μην αντιληφθούν τον κίνδυνο. Αυτή η τεχνολογία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη μείωση της σοβαρότητας και της συχνότητας των μετωπικών συγκρούσεων, σώζοντας ενδεχομένως ζωές και ελαχιστοποιώντας τις υλικές ζημιές στο δρόμο. Το FCW έχει γίνει όλο και πιο διαδεδομένο στα σύγχρονα οχήματα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ευαισθητοποίησης του οδηγού και της συνολικής ασφάλειας [23].

Η αυτόματη πέδηση έκτακτης ανάγκης (Automatic Emergency Braking)

είναι ένα προηγμένο χαρακτηριστικό ασφαλείας στα οχήματα που συμβάλλει στον μετριασμό ή την αποτροπή συγκρούσεων, εφαρμόζοντας αυτόματα τα φρένα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Τα συστήματα AEB χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό αισθητήρων, όπως ραντάρ, κάμερες ή lidar, για να παρακολουθούν συνεχώς τον δρόμο μπροστά τους και να ανιχνεύουν πιθανούς κινδύνους σύγκρουσης με άλλα οχήματα, πεζούς ή εμπόδια. Εάν το σύστημα διαπιστώσει ότι επίκειται σύγκρουση και ο οδηγός δεν αντιδράσει εγκαίρως, επεμβαίνει εφαρμόζοντας αυτόνομα τα φρένα για να μειώσει την ταχύτητα του οχήματος ή να το σταματήσει εντελώς. Τα συστήματα AEB έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε ένα εύρος ταχυτήτων και μπορούν να είναι αποτελεσματικά στην πρόληψη ή τη μείωση της σοβαρότητας των οπίσθιων συγκρούσεων και άλλων μετωπικών συγκρούσεων. Αυτή η τεχνολογία ενισχύει σημαντικά την ασφάλεια του οχήματος παρέχοντας ένα πρόσθετο επίπεδο προστασίας, ιδίως σε καταστάσεις όπου ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού μπορεί να είναι μειωμένος. Το AEB ενσωματώνεται όλο και περισσότερο ως βασικό χαρακτηριστικό στα οχήματα, συμβάλλοντας σε μια ασφαλέστερη εμπειρία οδήγησης και μειώνοντας το ενδεχόμενο ατυχημάτων [24].

Το σύστημα υποβοήθησης πέδησης (Brake Assist System) είναι ένα χαρακτηριστικό ασφαλείας στα οχήματα που έχει σχεδιαστεί για να βοηθά τους οδηγούς να εφαρμόζουν τη βέλτιστη δύναμη πέδησης κατά τη διάρκεια έκτακτης πέδησης. Το BAS λειτουργεί ανιχνεύοντας την ταχύτητα και τη δύναμη με την οποία ο οδηγός πατάει το πεντάλ του φρένου. Εάν το σύστημα διαπιστώσει ότι ο οδηγός επιχειρεί να σταματήσει σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, αλλά η εφαρμοζόμενη δύναμη δεν επαρκεί για την ενεργοποίηση του μέγιστου δυναμικού πέδησης του οχήματος, το BAS επεμβαίνει και αυξάνει αυτόματα τη δύναμη πέδησης για να βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη επιβράδυνση του οχήματος. Αυτή η ταχεία αντίδραση του BAS μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόσταση ακινητοποίησης και να βελτιώσει τη συνολική απόδοση πέδησης, ειδικά σε κρίσιμες καταστάσεις όπου ο οδηγός μπορεί να μην εφαρμόσει αρκετή δύναμη λόγω πανικού ή δισταγμού. Το BAS είναι ένα πολύτιμο χαρακτηριστικό ασφαλείας που βελτιώνει τον έλεγχο του οχήματος και μειώνει τον κίνδυνο ατυχημάτων παρέχοντας πρόσθετη βοήθεια κατά την πέδηση έκτακτης ανάγκης, βοηθώντας τελικά τους οδηγούς να σταματήσουν τα οχήματά τους πιο αποτελεσματικά και με ασφάλεια [25].

Το σύστημα προειδοποίησης αλλαγής λωρίδας (Lane Departure Warning System) είναι ένα χαρακτηριστικό ασφαλείας στα οχήματα που βοηθά τους οδηγούς να ειδοποιούνται όταν το όχημά τους παρεκκλίνει ακούσια από τη λωρίδα του. Το σύστημα LDWS χρησιμοποιεί συνήθως κάμερες ή αισθητήρες για την παρακολούθηση της θέσης του οχήματος εντός της διαγράμμισης της λωρίδας κυκλοφορίας στο δρόμο. Εάν το σύστημα ανιχνεύσει ότι το όχημα διασχίζει τη διαγράμμιση της λωρίδας κυκλοφορίας χωρίς ο οδηγός να ενεργοποιήσει το φλας, παρέχει οπτικές, ακουστικές ή απτικές προειδοποιήσεις για να ειδοποιήσει τον οδηγό για την πιθανή απομάκρυνση από τη λωρίδα κυκλοφορίας. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την πρόληψη ατυχημάτων που προκαλούνται από απόσπαση της προσοχής του οδηγού, υπνηλία ή στιγμιαία απώλεια προσοχής. Το LDWS στοχεύει στην ενίσχυση της ευαισθητοποίησης του οδηγού και στην προώθηση ασφαλών οδηγικών συνηθειών, ενθαρρύνοντας έγκαιρες διορθωτικές ενέργειες για την παραμονή εντός της προβλεπόμενης λωρίδας, μειώνοντας τον κίνδυνο σύγκρουσης ή εκτροπής από το δρόμο. Το LDWS έχει γίνει κοινό

χαρακτηριστικό στα σύγχρονα οχήματα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και στην πρόληψη των ατυχημάτων [26].

Αρκετοί κορυφαίοι κατασκευαστές αυτοκινήτων, συμπεριλαμβανομένων των General Motors, BMW, Audi, Daimler και Volvo, εργάζονται ενεργά πάνω στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS) και στις επικοινωνίες οχήματος με όχημα (V2V). Αυτοί οι κατασκευαστές αναγνωρίζουν τη σημασία των προηγμένων τεχνολογιών για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και τη βελτίωση της οδηγικής εμπειρίας. Η BMW έχει επικεντρωθεί στα συστήματα ITS, ενσωματώνοντας στα οχήματά της χαρακτηριστικά όπως η διαχείριση της κυκλοφορίας, η συνδεσιμότητα των οχημάτων και τα συστήματα υποβοήθησης του οδηγού. Η Audi συμμετέχει επίσης ενεργά στην έρευνα και ανάπτυξη V2V, με στόχο την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας μέσω της βελτιωμένης επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων. Η Daimler, η μητρική εταιρεία της Mercedes-Benz, έχει επενδύσει σε τεχνολογίες ITS, συμπεριλαμβανομένης της επικοινωνίας V2V και V2X (Vehicle-to-Everything), για να επιτρέψει τη συνεργατική οδήγηση και την ασφαλέστερη μεταφορά. Η Volvo υπήρξε πρωτοπόρος στις επικοινωνίες V2V, αναπτύσσοντας συστήματα που επιτρέπουν στα οχήματα να ανταλλάσσουν δεδομένα σχετικά με τους οδικούς κινδύνους και τις συνθήκες κυκλοφορίας για την αύξηση της συνολικής ασφάλειας. Αυτοί οι κατασκευαστές είναι αφοσιωμένοι στην προώθηση των τεχνολογιών ITS και V2V, κάνοντας σημαντικά βήματα στη διαμόρφωση του μέλλοντος των συνδεδεμένων και ασφαλέστερων οχημάτων στους δρόμους [27].

2.3 Όχημα-προς-υποδομή (vehicle-to-infrastructure)

Η τεχνολογία Vehicle-to-Infrastructure (V2I) είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας που επιτρέπει στα οχήματα να αλληλοεπιδρούν με την περιβάλλουσα υποδομή, όπως τα φανάρια, οι οδικές πινακίδες και τα συστήματα μεταφορών. Αποτελεί βασικό στοιχείο της ευρύτερης έννοιας των ευφυών συστημάτων μεταφορών (ITS) και της ανάπτυξης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων. Η τεχνολογία V2I χρησιμοποιεί ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως τα Dedicated Short-Range Communications (DSRC), για τη δημιουργία σύνδεσης σε πραγματικό χρόνο μεταξύ οχημάτων και υποδομής. Τα οχήματα της General

Motors, για παράδειγμα, είναι εξοπλισμένα με την τεχνολογία αυτή. Μέσω αυτής της σύνδεσης, τα οχήματα μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες με την υποδομή και να λαμβάνουν σημαντικά δεδομένα για τη βελτίωση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και της συνολικής οδηγικής εμπειρίας. Οι πληροφορίες αυτές αποστέλλονται από τα στοιχεία της υποδομής στο όχημα, ή αντίστροφα, μέσω ενός ad-hoc δικτύου [28].

Με το V2I, τα οχήματα μπορούν να επικοινωνούν με τα σήματα κυκλοφορίας για να λαμβάνουν πληροφορίες φάσης και χρονισμού του σήματος (SPaT). Αυτό επιτρέπει στους οδηγούς να προβλέπουν τις επερχόμενες αλλαγές στα σήματα, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στη μείωση των περιττών στάσεων, στη βελτίωση της ροής της κυκλοφορίας και στη μείωση των εκπομπών. Το V2I διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη και λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων. Επιτρέπει στα αυτόνομα οχήματα να συλλέγουν πληροφορίες από την υποδομή, όπως λεπτομερείς χάρτες, δεδομένα κυκλοφορίας και ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά βοηθούν τα αυτόνομα οχήματα να πλοηγούνται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα σε πολύπλοκα κυκλοφοριακά περιβάλλοντα. Τα δεδομένα V2I μπορούν να αξιοποιηθούν από τους σχεδιαστές μεταφορών για την ανάλυση των προτύπων κυκλοφορίας, τον εντοπισμό σημείων συμφόρησης και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της σχεδίασης υποδομών. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της χωρητικότητας των δρόμων, στη μείωση των σημείων συμφόρησης και στη βελτίωση της συνολικής υποδομής μεταφορών [28].

Το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ εξέδωσε κατευθυντήριες γραμμές τον Ιανουάριο του 2017 για την ενίσχυση της ασφάλειας και της κινητικότητας με την επιτάχυνση της ανάπτυξης συστημάτων επικοινωνίας. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές βοηθούν τις πολιτειακές κυβερνήσεις στην προετοιμασία για έργα V2I και στη διαχείριση των απαραίτητων δεδομένων. Μια σημαντική πρόκληση για την υλοποίηση αυτών των πρωτοβουλιών είναι η χρηματοδότηση και η απόκτηση πόρων. Το κόστος που συνδέεται με την ανάπτυξη υποδομών V2I και τη συντήρηση των συστημάτων επικοινωνίας δεν μπορεί να καλυφθεί αποκλειστικά από τα κρατικά έσοδα που προέρχονται από τους φόρους καυσίμων και τα διόδια των αυτοκινητοδρόμων.

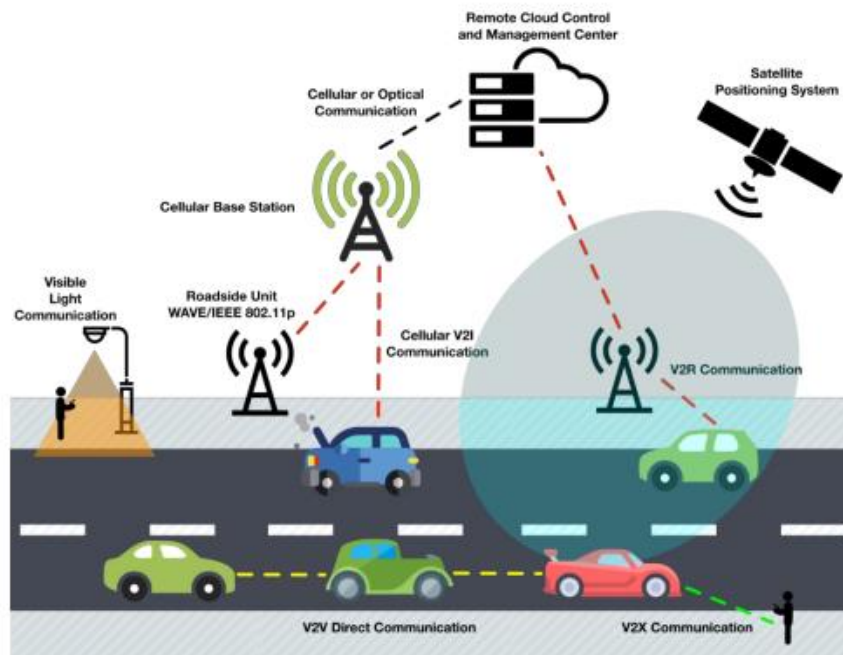
Κατά συνέπεια, οι συνεργασίες με τους κατασκευαστές οχημάτων αποκτούν ζωτική σημασία. Η συνεργασία με τους κατασκευαστές οχημάτων μπορεί να προσφέρει αμοιβαία οφέλη. Οι κατασκευαστές μπορούν να αξιοποιήσουν τα μεγάλα δεδομένα που παράγονται μέσω των επικοινωνιών V2I για τους δικούς τους εμπορικούς σκοπούς. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να είναι πολύτιμα για τη βελτίωση των τεχνολογιών οχημάτων, την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας των πελατών. Με τη συνεργασία με τους κατασκευαστές οχημάτων, οι κυβερνήσεις μπορούν να αξιοποιήσουν πρόσθετες πηγές χρηματοδότησης και πόρους για την υποστήριξη της υλοποίησης πρωτοβουλιών V2I. Η συνεργασία αυτή επιτρέπει στους κατασκευαστές να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τους εμπορικούς τους στόχους, ενώ οι κυβερνήσεις λαμβάνουν την οικονομική και τεχνική υποστήριξη που απαιτείται για την αποτελεσματική ανάπτυξη και συντήρηση της υποδομής V2I [29].

2.4 Όχημα-προς-όλα (vehicle-to-everything)

Το V2X είναι ένα γενικευμένο μοντέλο επικοινωνίας το οποίο ολοκληρώνει τα δυο παραπάνω V2V και V2I. Σκοπός του V2X είναι η μεταφορά δεδομένων από ένα όχημα σε οποιαδήποτε οντότητα με την οποία αλληλοεπιδρά. Ειδικότερα ενσωματώνει τύπους επικοινωνίας, για παράδειγμα όχημα-πεζόδρομος, όχημα-οδός, όχημα-συσσκευή, και όχημα-δίκτυο όπως αυτά αναπαρίστανται στο **Σχήμα 2**.

Σύμφωνα με την παγκόσμια έκθεση για την οδική ασφάλεια, περίπου 1,25 εκατομμύρια άτομα χάνουν τη ζωή τους κάθε χρόνο λόγω τροχαίων ατυχημάτων παγκοσμίως. Σχεδόν τα μισά από αυτά τα θύματα ανήκουν στην κατηγορία που είναι γνωστή ως ευάλωτοι χρήστες του οδικού δικτύου (Vulnerable Road Users - VRU), η οποία περιλαμβάνει πεζούς, ποδηλάτες και μοτοσικλετιστές. Τα άτομα αυτά αντιμετωπίζουν υψηλότερο κίνδυνο στους δρόμους, εν μέρει λόγω του ανεπαρκούς σχεδιασμού των δρόμων και του ανεπαρκούς διαχωρισμού από την κυκλοφορία των οχημάτων [30].

Μια σημαντική ανησυχία, ιδίως στις αστικές περιοχές, είναι η απόσπαση της προσοχής των πεζών που προκαλείται από τη χρήση ακουστικών και smartphones κατά τη διάρκεια του περπατήματος. Συνεπώς, είναι ζωτικής σημασίας να αναπτυχθεί ένα σύστημα προειδοποίησης ειδικά και για τους πεζούς.



Σχήμα 2. Επικοινωνίες V2V, V2I και V2X.

Η τεχνολογία V2X (Vehicle-to-Everything) έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και διαφόρων οντοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των πεζών, με στόχο την μείωση των ατυχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των θανατηφόρων. Μια πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα αυτό είναι το σύστημα προειδοποίησης σύγκρουσης πεζών (Pedestrian Collision Warning - PCW), το οποίο χρησιμοποιεί ασύρματες μονάδες που βρίσκονται στα κινητά τηλέφωνα, όπως Wi-Fi, Bluetooth και Near Field Communication (NFC). Η αρχιτεκτονική PCW ενσωματώνει αυτές τις ασύρματες μονάδες για τη δημιουργία ενός συστήματος ανίχνευσης. Για παράδειγμα, η μονάδα Wi-Fi χρησιμοποιείται για την υλοποίηση ενός ενεργού μηχανισμού ασφαλείας για τους ευάλωτους χρήστες του δρόμου (Vulnerable Road Users - VRUs), προειδοποιώντας τους πεζούς για πιθανούς κινδύνους μέσω μιας τεχνικής που ονομάζεται beacon stuffing [31].

Ωστόσο, η μονάδα Wi-Fi που χρησιμοποιείται στην αρχιτεκτονική PCW και στις επικοινωνίες V2X, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Wi-Safe, έχει έναν περιορισμό, καθώς λειτουργεί με μονόδρομο τρόπο, όπου μόνο οι πεζοί λαμβάνουν ειδοποιήσεις. Από την άλλη πλευρά, το Wi-Fi Direct, ένα ασύρματο πρότυπο peer-

to-peer που επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ smartphones χωρίς την ανάγκη ενός σημείου πρόσβασης, έχει διερευνηθεί σε αυτό το πλαίσιο. Παρ' όλα αυτά, οι προσεγγίσεις που βασίζονται στο Wi-Fi έχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Πρώτον, τείνουν να καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια, ιδίως όταν λειτουργούν στη λειτουργία Access Point/Client. Επιπλέον, ο ρυθμός παράδοσης πακέτων και η καθυστέρηση κατά την περίοδο σάρωσης δεν είναι τόσο αποδοτικοί όσο οι εγγενείς τεχνολογίες που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για επικοινωνίες οχημάτων [31].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και πριν από αρκετά χρόνια, εταιρείες όπως η General Motors αξιολογούσαν ήδη τις δυνατότητες των Dedicated Short-Range Communications (DSRC) σε σενάρια V2X. Το DSRC είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία οχημάτων, επιτρέποντας στα οχήματα να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους και με τις υποδομές του δρόμου για να βελτιώσουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα στους δρόμους [32].

Οι αρχιτεκτονικές V2X και PCW προσφέρουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την εφαρμογή ενός συστήματος πρόληψης. Μια επιλογή περιλαμβάνει τη χρήση καμερών και επικοινωνίας ορατού φωτός (VLC), αλλά αυτή η λύση επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Μπορεί να ληφθούν ανακριβή δεδομένα εάν οι καιρικές ή οδικές συνθήκες είναι δυσμενείς. Υπάρχουν επίσης υπολογιστικοί περιορισμοί και πιθανά σφάλματα στην τρισδιάστατη αναγνώριση αντικειμένων και στην επεξεργασία εικόνας. Μια άλλη λύση είναι η χρήση ενός συστήματος υποβοήθησης οδήγησης, όπως το Adaptive Cruise Control (ACC) και το Autonomous Emergency Braking (AEB). Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί ραντάρ χιλιοστομετρικών κυμάτων, LiDAR και άλλους εξειδικευμένους αισθητήρες στο όχημα. Αυτοί οι αισθητήρες υπολογίζουν τη σχετική ταχύτητα και απόσταση αναλύοντας τις διαφορές χρόνου και συχνότητας μεταξύ των μεταδιδόμενων και των λαμβανόμενων σημάτων [33]. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση έχει περιορισμούς, όπως τα ασθενή σήματα που καλύπτονται από θόρυβο ή η ανεπάρκεια σε σύνθετα σενάρια με υψηλές ταχύτητες και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων.

Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του Wi-Fi, του VLC και των αισθητήρων ελέγχου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Bluetooth Low Energy (BLE). Το BLE επιτρέπει αξιόπιστη αμφίδρομη επικοινωνία με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι ήδη ενσωματωμένο στα τελευταία smartphones και στοχεύει να γίνει το

πρότυπο επικοινωνίας για το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Η χρήση του BLE σε περιβάλλοντα PCW μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Με τις εξελίξεις στο LTE-V2X και την αναδυόμενη τεχνολογία 5G, η συνεργατική καινοτομία σε όλους τους κλάδους μπορεί να επιτρέψει την πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση και καινοτόμες υπηρεσίες οχημάτων. Αυτή η συνεργατική προσπάθεια ενέχει μεγάλες δυνατότητες για σημαντικές εξελίξεις στον τομέα [34].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Κανάλια επικοινωνιών για οχήματα

3.1 Εισαγωγή στα κανάλια επικοινωνίας των οχημάτων για μετά το 5G και 6G

Στο παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στη διεξαγωγή έρευνας και ανάλυσης σχετικά με τις μετρήσεις και τη μοντελοποίηση καναλιών ειδικά για τα κανάλια οχημάτων (Beyond) 5G και 6G. Ο πρωταρχικός στόχος είναι να αντιμετωπιστούν οι νέες απαιτήσεις και προκλήσεις που προκύπτουν με την εισαγωγή των τεχνολογιών και ζωνών συχνοτήτων B5G και 6G στις επικοινωνίες οχημάτων. Για την αποτελεσματική σχεδίαση βελτιωμένων συστημάτων επικοινωνίας, είναι ζωτικής σημασίας η προσαρμογή της σχεδίασης του συστήματος στα χαρακτηριστικά των καναλιών με την κατάλληλη ενσωμάτωσή τους, η οποία αναφέρεται ως εφαρμογή καναλιού σε αυτό το κεφάλαιο.

Επιπλέον, θα δοθούν προτάσεις σχετικά με την επιλογή μοντέλων καναλιών που διευκολύνουν το σχεδιασμό διαφόρων συστημάτων ή διαφορετικών επιπέδων εντός ενός συστήματος. Οι επόμενες ενότητες του κεφαλαίου οργανώνονται ως εξής: Το υποκεφάλαιο 3.2 παρέχει μια επισκόπηση της υπάρχουσας έρευνας στη μέτρηση και μοντελοποίηση καναλιών οχημάτων B5G και 6G, ενώ ακολουθούν οι προτεινόμενες εφαρμογές καναλιών οχημάτων B5G και 6G στο υποκεφάλαιο 3.3. Τέλος στο υποκεφάλαιο 3.4, αναφέρονται οι μελλοντικές προκλήσεις στη μέτρηση, τη μοντελοποίηση και τις εφαρμογές καναλιών οχημάτων B5G και 6G.

3.2 Μετρήσεις καναλιών οχημάτων και μοντελοποίηση για B5G και 6G

Οι επικοινωνίες οχημάτων με δυνατότητα B5G και 6G

Στην επερχόμενη εποχή B5G και 6G, θα υπάρξει αυξημένη ζήτηση για προηγμένες εφαρμογές σε σχέση με τα αυτόνομα και έξυπνα οχήματα. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν επικοινωνίες οχημάτων για τη μετάδοση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων. Μια κρίσιμη πτυχή των B5G και 6G είναι ο ρυθμός μετάδοσης, ο οποίος

στοχεύει στην υποστήριξη ρυθμών έως και 1 terabit/s (Tbps) για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης κίνησης. Για την ενίσχυση του ρυθμού μετάδοσης στα ασύρματα συστήματα, δύο συνήθως χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος και η αύξηση του εύρους ζώνης μετάδοσης [35].

Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων τεχνολογιών για τη βελτίωση της αποδοτικότητας φάσματος, χρησιμοποιείται ευρέως η (υπερ)μαζική πολλαπλή είσοδος πολλαπλής εξόδου (MIMO), η οποία περιλαμβάνει συνήθως περισσότερες από 100 κεραιές. Επιπλέον, για να αντιμετωπιστεί η ανάγκη για αυξημένο εύρος ζώνης, εξετάζεται η ζώνη συχνοτήτων millimeter wave (mmWave)/Terahertz (THz) με εύρος ζώνης GHz/THz. Αξίζει να σημειωθεί ότι η 6G ενσωματώνει επίσης επικοινωνίες THz, οι οποίες προσφέρουν διακριτά πλεονεκτήματα για τις εφαρμογές 6G. Οι μετρήσεις των καναλιών mmWave/THz αποκαλύπτουν σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τις ζώνες συχνοτήτων κάτω των 6 GHz, και η χρήση των συχνοτήτων mmWave και THz καθιστά πιο βιώσιμη την (υπερ)μαζική MIMO με βελτιωμένους συντελεστές μορφής [36].

Μετρήσεις καναλιών οχημάτων για B5G και 6G

Τα κανάλια επικοινωνίας οχημάτων παρουσιάζουν μοναδικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από τα παραδοσιακά κυψελοειδή κανάλια. Τα κανάλια αυτά περιλαμβάνουν οχήματα εξοπλισμένα με κεραιές χαμηλού υψομέτρου, τόσο ως πομποί (Tx) όσο και ως δέκτες (Rx). Τα οχήματα κινούνται συνήθως με υψηλές ταχύτητες και περιβάλλονται από πολυάριθμους κινητούς διασκορπιστές/σμήνη. Λόγω αυτών των παραγόντων, οι ιδιότητες των καναλιών οχημάτων διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των συμβατικών κυψελοειδών καναλιών. Ορισμένες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη μέτρηση καναλιών επικοινωνίας οχημάτων κάτω των 6 GHz, χρησιμοποιώντας μία έως τέσσερις κεραιές. Οι μετρήσεις αυτές παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά αυτών των καναλιών. Ωστόσο, η εμφάνιση νέων τεχνολογιών, όπως η (υπερ)μαζική MIMO και τα mmWave/THz, επιφέρει διακριτά χαρακτηριστικά στα κανάλια των συστημάτων επικοινωνίας οχημάτων Beyond 5G (B5G) και 6G. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναπτυχθούν ειδικές τεχνικές μέτρησης και μοντελοποίησης καναλιών που να ανταποκρίνονται σε αυτές τις τεχνολογίες.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις καναλιών και η μοντελοποίηση είναι αλληλένδετες και αλληλοεπηρεάζονται. Οι μετρήσεις καναλιών παρέχουν θεμελιώδεις πληροφορίες για τη μοντελοποίηση καναλιών, επιτρέποντας τη δημιουργία ακριβών μοντέλων που μπορούν να επικυρωθούν μέσω δεδομένων μετρήσεων. Ταυτόχρονα, η μοντελοποίηση καναλιού ενημερώνει το σχεδιασμό και την εκτέλεση των μετρήσεων καναλιού, διασφαλίζοντας ότι αυτές καταγράφουν τα σχετικά χαρακτηριστικά. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα γίνει μια σύντομη επισκόπηση των μετρήσεων καναλιών οχημάτων B5G και 6G, λαμβάνοντας υπόψη τις προοπτικές των τεχνολογιών mmWave/THz και (υπερ)μαζικής MIMO, αντίστοιχα [37].

Η προοπτική MmWave/THz:

Οι επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) και τεραχέρτζ (THz) είναι αναδυόμενες τεχνολογίες που λειτουργούν σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων άνω των 30 GHz και 300 GHz, αντίστοιχα. Αυτές οι περιοχές συχνοτήτων προσφέρουν άφθονους πόρους φάσματος για την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών ρυθμών δεδομένων και τεράστιας χωρητικότητας σε μελλοντικά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Οι επικοινωνίες MmWave και THz αξιοποιούν τα μεγάλα διαθέσιμα εύρη ζώνης και τις τεχνικές κατευθυντικής διαμόρφωσης δέσμης για να ξεπεράσουν τις προκλήσεις των υψηλών απωλειών διαδρομής και της ατμοσφαιρικής απορρόφησης που σχετίζονται με αυτές τις συχνότητες. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την ανάπτυξη ιδιαίτερα πυκνών δικτύων με μικρές κυψέλες και παρέχουν ρυθμούς δεδομένων πολλών gigabit ανά δευτερόλεπτο, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές όπως το 5G και πέραν αυτού, καθώς και για μελλοντικά συστήματα 6G. Οι επικοινωνίες MmWave και THz προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες για διάφορες εφαρμογές, μεταξύ άλλων για ροή πολυμέσων υψηλής ευκρίνειας, εικονική πραγματικότητα, επαυξημένη πραγματικότητα, αυτόνομα οχήματα και έξυπνες πόλεις. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες θέτουν επίσης μοναδικές προκλήσεις σχεδιασμού που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά διάδοσης, τη διαχείριση της κινητικότητας, τη διαχείριση των παρεμβολών και την αποδοτική ανάπτυξη, οι οποίες απαιτούν προηγμένους αλγορίθμους και τεχνικές βελτιστοποίησης του συστήματος για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά [38].

Προοπτική της (υπερ)μαζικής MIMO

Η εξαιρετικά μαζική τεχνολογία πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO) είναι μια προηγμένη τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών που χρησιμοποιεί εξαιρετικά μεγάλο αριθμό κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Αυτή η τεχνολογία στα ασύρματα συστήματα, προσφέρει πρωτοφανή χωρική πολυπλεξία, βελτιωμένη φασματική απόδοση, ενισχυμένη κάλυψη και αυξημένη ενεργειακή απόδοση. Με εκατοντάδες ή και χιλιάδες κεραιές, τα συστήματα υπερ-μαζικής MIMO μπορούν να εκμεταλλευτούν τη χωρική διάσταση για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών, με αποτέλεσμα σημαντικά κέρδη στη χωρητικότητα και την απόδοση του συστήματος. Με τη χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, όπως η προ κωδικοποίηση και η διαμόρφωση δέσμης, τα υπερ-μαζικά συστήματα MIMO μπορούν να μετριάσουν τις παρεμβολές, να βελτιώσουν την αξιοπιστία του καναλιού και να παρέχουν ισχυρή επικοινωνία σε δύσκολα περιβάλλοντα [39].

Μοντέλα καναλιών οχημάτων για B5G και 6G

Τα μοντέλα καναλιών οχημάτων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο σχεδιασμό και την αξιολόγηση συστημάτων επικοινωνίας για δίκτυα B5G και 6G. Αυτά τα προηγμένα δίκτυα αναμένεται να υποστηρίζουν εξαιρετικά δυναμικά και απαιτητικά σενάρια επικοινωνίας οχημάτων. Οι κύριοι υποψήφιοι για τη μοντελοποίηση καναλιών οχημάτων σε αυτές τις μελλοντικές γενιές δικτύων είναι τα ντετερμινιστικά μοντέλα με βάση τη γεωμετρία (GBDM), τα στοχαστικά μοντέλα με βάση τη γεωμετρία (GBSM) και οι συνδυασμοί τους. Τα GBDM, όπως τα μοντέλα που βασίζονται στην ανίχνευση ακτινών, υιοθετούνται ευρέως στα κανάλια επικοινωνίας οχημάτων. Αποσκοπούν στην ακριβή αναπαραγωγή της φυσικής διαδικασίας ραδιοδιάδοσης σε συγκεκριμένα σενάρια οχημάτων.

Τα GBDM απαιτούν λεπτομερείς μετρήσεις και ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό του περιβάλλοντος διάδοσης σε συγκεκριμένη τοποθεσία. Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του περιβάλλοντος σκέδασης, τα GBDM μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη διάδοση του σήματος, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών διαδρομής, της σκίασης και των επιδράσεων πολλαπλών διαδρομών.

Τα GBSMs, από την άλλη πλευρά, αναπαριστούν τις παραμέτρους του καναλιού με στοχαστικό τρόπο. Μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε GBSMs κανονικού σχήματος (RS-GBSMs) και GBSMs ακανόνιστου σχήματος (IS-GBSMs). Οι RS-GBSM έχουν χαμηλότερη πολυπλοκότητα και χρησιμοποιούνται ευρέως σε θεωρητικές μελέτες, ενώ οι IS-GBSM προσφέρουν υψηλότερη ακρίβεια και υιοθετούνται συνήθως σε τυποποιημένα μοντέλα καναλιών. Τα GBSMs λαμβάνουν υπόψη τη στοχαστική κατανομή των αποτελεσματικών σκεδαστών, απλοποιώντας τους θεμελιώδεις νόμους της διάδοσης των κυμάτων.

Για την μοντελοποίηση καναλιών οχημάτων για δίκτυα B5G και 6G, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός GBDMs και GBSMs. Αυτή η υβριδική προσέγγιση αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων μοντελοποίησης. Με την εξέταση της υποκείμενης γεωμετρίας σκέδασης και την ενσωμάτωση στοχαστικών μεταβολών, τα μοντέλα αυτά μπορούν να παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη αναπαράσταση του δυναμικού περιβάλλοντος επικοινωνίας οχημάτων [40].

Τρισδιάστατη μη στασιμότητα χώρου-χρόνου-συχνότητας

Η τρισδιάστατη μη στασιμότητα χώρου-χρόνου-συχνότητας αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο οι στατιστικές ιδιότητες ενός σήματος ή ενός συστήματος μεταβάλλονται σε τρεις διαστάσεις: χώρο, χρόνο και συχνότητα. Στην παραδοσιακή επεξεργασία σήματος, συχνά θεωρείται ότι οι στατιστικές ιδιότητες ενός σήματος ή ενός συστήματος είναι στάσιμες, δηλαδή δεν μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου.

Ωστόσο, σε πολλά σενάρια του πραγματικού κόσμου, όπως οι ασύρματες επικοινωνίες, το ραντάρ και η επεξεργασία ήχου, οι στατιστικές ιδιότητες των σημάτων και των συστημάτων είναι μη στάσιμες. Στο πλαίσιο της τρισδιάστατης μη στασιμότητας χώρου-χρόνου-συχνότητας, η χωρική διάσταση αναφέρεται στις φυσικές θέσεις όπου παρατηρούνται ή υποβάλλονται σε επεξεργασία τα σήματα.

Η χρονική διάσταση σχετίζεται με τις αλλαγές που συμβαίνουν με την πάροδο του χρόνου, ενώ η διάσταση της συχνότητας αφορά τις διάφορες συνιστώσες συχνότητας που υπάρχουν στα σήματα. Η μη στασιμότητα μπορεί να προκύψει λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως η κίνηση αντικειμένων, οι μεταβαλλόμενες

περιβαλλοντικές συνθήκες ή τα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά των ίδιων των σημάτων.

Η κατανόηση και η μοντελοποίηση της τρισδιάστατης μη στασιμότητας χώρου-χρόνου-συχνότητας είναι ζωτικής σημασίας σε πολλές εφαρμογές. Συνολικά, η μελέτη της μη στασιμότητας στο τρισδιάστατο πεδίο χώρου-χρόνου-συχνότητας απαιτεί εξειδικευμένες τεχνικές και αλγορίθμους που μπορούν να συλλάβουν τις δυναμικές μεταβολές του σήματος στο χώρο, το χρόνο και τη συχνότητα, επιτρέποντας την ακριβέστερη ανάλυση και ερμηνεία πολύπλοκων σημάτων σε διάφορες εφαρμογές [41]. Οι μέθοδοι αυτοί είναι:

Η παραμετρική μέθοδος

Η παραμετρική μέθοδος βασίζεται σε μαθηματικές προσεγγίσεις για τον χαρακτηρισμό της μη στασιμότητας του καναλιού, ιδίως στο πλαίσιο των συστημάτων χωρικής διαμόρφωσης επόμενης γενιάς (NGSM). Το NGSM αναφέρεται σε προηγμένα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν τεχνολογία πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) μαζί με τεχνικές χωρικής διαμόρφωσης. Αυτές οι μαθηματικές προσεγγίσεις επιτρέπουν την ακριβή και αναλυτική αναπαράσταση της μη στάσιμης συμπεριφοράς του καναλιού στα συστήματα NGSM.

Με την μοντελοποίηση της εμφάνισης και εξαφάνισης σκεδαστών/συστάδων, καθώς και της συσχετισμένης σκέδασης, η παραμετρική μέθοδος παρέχει πληροφορίες για τις χρονικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες του καναλιού και βοηθά στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και στον μετριάσμό των επιπτώσεων παρεμβολών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η παραμετρική μέθοδος μπορεί να απαιτεί ακριβή εκτίμηση των παραμέτρων που εμπλέκονται στα μαθηματικά μοντέλα, η οποία μπορεί να είναι πρόκληση σε πρακτικά σενάρια [42].

Γεωμετρική μέθοδος

Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης του καναλιού, η γεωμετρική μέθοδος περιλαμβάνει την αναπαράσταση των φυσικών γεωμετρικών περιβαλλόντων σκέδασης για την αποτύπωση της μη στασιμότητας του καναλιού. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την άμεση περιγραφή των θέσεων, των τύπων και των κινήσεων των πομπών (Tx), των δεκτών (Rx) και των σκεδαστών/συσσωρεύσεων στο

περιβάλλον. Με τη ρητή μοντελοποίηση της γεωμετρίας της σκέδασης, αυτές οι γεωμετρικές μέθοδοι μπορούν να συλλάβουν αποτελεσματικά τις χωρικές και χρονικές μεταβολές των χαρακτηριστικών του καναλιού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μη στασιμότητα του καναλιού προκύπτει από αλλαγές στο περιβάλλον διάδοσης, όπως οι θέσεις και οι κινήσεις των πομπών, των δεκτών και των σκεδαστών [43].

Υβριδική μέθοδος

Η υβριδική μέθοδος συνδυάζει αποτελεσματικά παραμετρικές και γεωμετρικές μεθόδους για να επιτύχει ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και πολυπλοκότητας στην καταγραφή της μη στασιμότητας του καναλιού. Στην υβριδική μέθοδο, χρησιμοποιούνται μαθηματικά εργαλεία για τη μείωση της πολυπλοκότητας που συνεπάγεται ο χαρακτηρισμός του δυναμικού γεωμετρικού περιβάλλοντος σκέδασης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού παραμετρικής μοντελοποίησης και ενημέρωσης των παραμέτρων των σκεδαστών/συστάδων με την πάροδο του χρόνου. Ακολουθεί μια ανάλυση του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό [44].

Η διαδικασία γέννησης-θανάτου αποτυπώνει τη συνολική δυναμική της εμφάνισης και εξαφάνισης των σκεδαστών/συστάδων, ενώ το γεωμετρικό περιβάλλον παρέχει ένα πλαίσιο για την ενημέρωση και τη διατήρηση των παραμέτρων των σκεδαστών/συστάδων με την πάροδο του χρόνου. Συνδυάζοντας τη διαδικασία γέννησης-θανάτου με το δυναμικό γεωμετρικό περιβάλλον σκέδασης, η υβριδική μέθοδος επιτρέπει την αποτελεσματική μοντελοποίηση και αναπαράσταση της μη στάσιμης συμπεριφοράς του καναλιού. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στην υβριδική μέθοδο να μειώσει την πολυπλοκότητα με την αξιοποίηση μαθηματικών εργαλείων, ενώ εξακολουθεί να καταγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά της μη στασιμότητας του καναλιού.

Με την κατάλληλη ενημέρωση των παραμέτρων των σκεδαστών/συστάδων, η μέθοδος μπορεί να απεικονίσει με ακρίβεια την εξελισσόμενη φύση του καναλιού και να επιτρέψει την αποτελεσματικότερη ανάλυση, μοντελοποίηση και σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες τεχνικές και προσεγγίσεις στο πλαίσιο της υβριδικής μεθόδου μπορούν να

διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις του υπό μελέτη καναλιού. Η βασική ιδέα είναι ο συνδυασμός παραμετρικών και γεωμετρικών μεθόδων με τρόπο που να αποτυπώνει αποτελεσματικά τη μη στασιμότητα του καναλιού και ταυτόχρονα να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα [43-44].

3.3 Εφαρμογή καναλιών οχημάτων για B5G και 6G

Η μοντελοποίηση του καναλιού παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας. Παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του ασύρματου καναλιού και επιτρέπει την ανάπτυξη ακριβών και πρακτικών μοντέλων καναλιού. Ο απώτερος στόχος της μοντελοποίησης καναλιού είναι να διευκολύνει το σχεδιασμό αποδοτικών και αποτελεσματικών συστημάτων επικοινωνίας. Ο στόχος αυτός ισχύει για τα αναδυόμενα πεδία των επικοινωνιών οχημάτων Beyond 5G (B5G) και 6G.

Στο πλαίσιο αυτό, προσδιορίζονται δύο κύριες προσεγγίσεις: ο σχεδιασμός αλγορίθμων και η προσομοίωση συστημάτων. Ο σχεδιασμός αλγορίθμων χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά του καναλιού για την ενίσχυση της απόδοσης του αλγορίθμου και την επικύρωση της πραγματικής απόδοσης των αλγορίθμων που αναπτύσσονται. Από την άλλη πλευρά, οι προσομοιώσεις συστημάτων χρησιμοποιούν το κανάλι ως πλατφόρμα για την αξιολόγηση και την επαλήθευση της απόδοσης των συστημάτων επικοινωνίας οχημάτων B5G και 6G. Και οι δύο προσεγγίσεις απαιτούν την επιλογή και την εφαρμογή κατάλληλων μοντέλων καναλιών οχημάτων B5G και 6G με βάση τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του σχεδιασμού.

Το παρόν υποκεφάλαιο διερευνά την εφαρμογή των μοντέλων καναλιών οχημάτων B5G και 6G στο σχεδιασμό αλγορίθμων και την προσομοίωση συστημάτων. Συζητείται η ευέλικτη χρήση των μοντέλων καναλιών και η κατάλληλη επιλογή μοντέλων με βάση τον επιδιωκόμενο σκοπό. Λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις των επικοινωνιών οχημάτων B5G και 6G, το υποκεφάλαιο αυτό παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αξιοποίηση της ανάλυσης και μοντελοποίησης καναλιών για τον επιτυχή σχεδιασμό και την υλοποίηση αυτών των προηγμένων συστημάτων επικοινωνίας [42-43].

Προοπτική σχεδιασμού αλγορίθμων

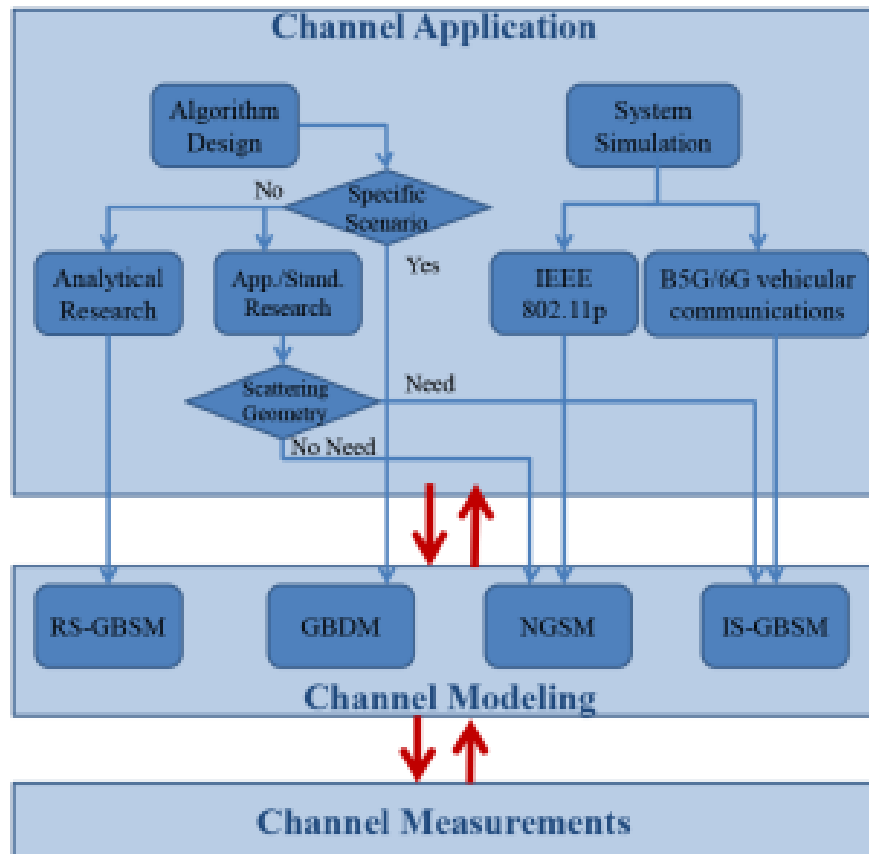
Από την άποψη της εφαρμογής του καναλιού, ο σχεδιασμός αλγορίθμων μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε προηγμένη αναλυτική έρευνα και σε έρευνα πρακτικής εφαρμογής/τυποποίησης. Στην περίπτωση της προηγμένης αναλυτικής έρευνας, η έμφαση δίνεται σε μοντέλα καναλιών με αποδεκτή πολυπλοκότητα που μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες αναλυτικές έρευνες. Σε αυτό το πλαίσιο, το RS-GBSM, το οποίο δεν βασίζεται σε μετρήσεις καναλιού, αποτελεί προτιμώμενη επιλογή λόγω της μέτριας πολυπλοκότητας και της ευελιξίας του.

Το GBDM, που προσφέρει μια καλή ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και ευελιξίας, αποτελεί τη δεύτερη επιλογή, ενώ τα εξαρτώμενα από μετρήσεις NGSM και IS-GBSM είναι λιγότερο ευνοϊκά. Από την άλλη πλευρά, η έρευνα για την πρακτική εφαρμογή/τυποποίηση δίνει έμφαση στην ακρίβεια των μοντέλων καναλιών. Ως εκ τούτου, τα NGSM που βασίζονται σε μετρήσεις και IS-GBSM ευνοούνται ιδιαίτερα, ακολουθούμενα από τα GBDM και RS-GBSM. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανεξάρτητα από το αν πρόκειται για μια καθαρά αναλυτική μελέτη ή μια έρευνα προσανατολισμένη στην εφαρμογή, η επιλογή μεταξύ GBDM και GBSM καθίσταται απαραίτητη όταν απαιτούνται πληροφορίες για το δυναμικό περιβάλλον διάδοσης, όπως η θέση του οχήματος, η κατεύθυνση κίνησης και η ταχύτητα.

Επιπλέον, εάν ο σχεδιασμός του αλγορίθμου στοχεύει σε ένα συγκεκριμένο σενάριο, όπως η ανταλλαγή πληροφοριών σε μια διασταύρωση, το GBDM, ικανό να μοντελοποιήσει με ακρίβεια ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, γίνεται η καλύτερη επιλογή [45].

Προοπτική προσομοίωσης συστήματος

Η προσομοίωση και η επαλήθευση συστημάτων διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων επικοινωνίας οχημάτων B5G και 6G. Αυτές οι προσομοιώσεις απαιτούν τη συμπερίληψη μεγάλου αριθμού οδικών υποδομών, οχημάτων και διαφόρων συνδέσεων μετάδοσης για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης σε σενάρια ανάπτυξης στον πραγματικό κόσμο. Κατά συνέπεια, τα μοντέλα καναλιών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις προσομοιώσεις πρέπει να παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο ακρίβειας, διατηρώντας παράλληλα αποδεκτή πολυπλοκότητα.



Σχήμα 3. Εφαρμογή καναλιών οχημάτων για B5G και 6G

Τα τυποποιημένα μοντέλα καναλιών συνήθως υιοθετούνται για προσομοιώσεις σε επίπεδο συστήματος, αλλά επί του παρόντος, υπάρχει έλλειψη τυποποιημένων μοντέλων για τα κανάλια οχημάτων B5G και 6G, ενώ μόνο το NGSM είναι διαθέσιμο για το VCN. Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες προσπάθειες τυποποίησης για τα κυψελωτά συστήματα B5G και 6G, σε συνδυασμό με την υψηλή δυναμική των σεναρίων οχημάτων, καθιστούν τα IS-GBSM και GBDM εξέχουσες επιλογές. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα, το IS-GBSM αναδεικνύεται ως η καλύτερη επιλογή για συστήματα προσομοίωσης. Η εφαρμογή καναλιών για B5G και 6G συνοψίζονται στο **Σχήμα 3** [47], όπου διαπιστώνουμε ότι 1) τα GBSM και GBDM είναι οι κορυφαίες υποψήφιες λύσεις 2) το RS-GBSM είναι το πιο ευνοϊκό για αναλυτική έρευνα 3) IS-GBSM είναι το πιο εφικτό για μελέτες πρακτικών εφαρμογών και 4) το GBDM θα πάρει την θέση του GBSM ως η κορυφαία επιλογή εάν η πολυπλοκότητα δεν αποτελέσει ζήτημα [45,47].

3.4 Μελλοντικές προκλήσεις στα κανάλια οχημάτων B5G και 6G

Προοπτική μέτρησης καναλιού

Οι μετρήσεις καναλιών οχημάτων B5G και 6G σε δυναμικά σενάρια υψηλής κινητικότητας παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις για διάφορους λόγους. Πρώτον, οι παραδοσιακές προσεγγίσεις μέτρησης VAA (Virtual Antenna Array) δεν είναι κατάλληλες για συστήματα (υπερ)μαζικής MIMO σε αυτά τα περιβάλλοντα, καθώς ο μικρός χρόνος συνοχής των καναλιών καθιστά αδύνατη την ολοκλήρωση των απαιτούμενων μετρήσεων. Η εναλλακτική προσέγγιση RAA (Real Antenna Array) αυξάνει το κόστος και απαιτεί πολύπλοκη βαθμονόμηση, ιδίως όταν εξετάζονται ζώνες συχνοτήτων mmWave/THz.

Δεύτερον, οι μετρήσεις καναλιών THz για τις επικοινωνίες οχημάτων B5G και 6G αντιμετωπίζουν περιορισμούς αξιοπιστίας και τεχνικούς περιορισμούς, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη νέων τεχνικών σάρωσης. Τέλος, η ακριβής μοντελοποίηση της μη στασιμότητας χώρου-χρόνου-συχνότητας στα κανάλια οχημάτων, συμπεριλαμβανομένης της επανεμφάνισης των σκεδαστών/συστάδων και των χρονικά μεταβαλλόμενων συνιστωσών, είναι ζωτικής σημασίας αλλά δύσκολο να επιτευχθεί με τις τρέχουσες δυνατότητες μέτρησης. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι απαραίτητη για την καθιέρωση ακριβών στρατηγικών για τριοδιάστατες μετρήσεις χωροχρονικής συχνότητας B5G και 6G σε κανάλια οχημάτων [46-47].

Προοπτική μοντελοποίησης καναλιού

Στο πλαίσιο των καναλιών οχημάτων B5G και 6G, υπάρχουν αρκετές μελλοντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν από την άποψη της μοντελοποίησης καναλιών. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν [46]:

Μοναδικότητα των περιβαλλόντων επικοινωνίας οχημάτων: Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των περιβαλλόντων επικοινωνίας οχημάτων B5G και 6G δημιουργούν προκλήσεις στη δημιουργία πλατφορμών μέτρησης για τον

χαρακτηρισμό καναλιών. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων μέτρησης καθιστά δύσκολη την ακριβή μοντελοποίηση αυτών των καναλιών.

Τρισδιάστατη μοντελοποίηση μη στασιμότητας: Οι τρέχουσες προσεγγίσεις μοντελοποίησης επικεντρώνονται κυρίως στη μη στασιμότητα σε μεμονωμένα πεδία (όπως ο χώρος/χρόνος) ή σε πεδία 2D (όπως ο χρόνος-συχνότητα/χρόνος-χώρος). Ωστόσο, ο κοινός χαρακτηρισμός της μη στασιμότητας καναλιών χώρου-χρόνου-συχνότητας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και απαιτεί περαιτέρω έρευνα και τεχνικές μοντελοποίησης.

Μοντελοποίηση χρονικής-χωρικής συνέπειας: Τα κανάλια οχημάτων B5G και 6G, ιδίως στις ζώνες συχνοτήτων mmWave και THz, παρουσιάζουν σημαντικές μετατοπίσεις Doppler, με αποτέλεσμα πολύ μικρό χρόνο συνοχής του καναλιού. Η μοντελοποίηση της χρονικής συνέπειας, όπου η κατάσταση του καναλιού πρέπει να ενημερώνεται συχνά και ρεαλιστικά, και της χωρικής συνέπειας, όπου η μεταβολή των παλμικών αποκρίσεων καναλιού (CIR) πρέπει να είναι ομαλή και συνεχής με την εξέλιξη των κεραιών, είναι ζωτικής σημασίας αλλά επί του παρόντος λείπει από τα υπάρχοντα μοντέλα καναλιών.

Μοντελοποίηση χωρικής συσχέτισης με κατάτμηση: Η μη στασιμότητα χώρου-χρόνου-συχνότητας στα κανάλια B5G και 6G οχημάτων (υπερ)μαζικής MIMO οδηγεί σε περιφερειακές ιδιότητες όσον αφορά τη χωρική συσχέτιση του καναλιού. Ωστόσο, οι τρέχουσες προσεγγίσεις μοντελοποίησης βασίζονται κυρίως σε γραμμικά μοντέλα χωρικής συσχέτισης που χρησιμοποιούνται στα κανάλια MIMO και δεν υπάρχει έρευνα για τη μοντελοποίηση χωρικής συσχέτισης με κατανομή. Αυτός ο τομέας απαιτεί περαιτέρω έρευνα για την ακριβή αποτύπωση των περιφερειοποιημένων ιδιοτήτων της χωρικής συσχέτισης του καναλιού.

Μοντελοποίηση καναλιού B5G και 6G με βάση τη συγχώνευση αισθητήρων και επικοινωνιών: Με την άνοδο των ευφυών οχημάτων, η συγχώνευση τεχνολογιών ανίχνευσης και επικοινωνίας καθίσταται απαραίτητη στα συστήματα επικοινωνίας οχημάτων B5G και 6G. Ωστόσο, τα υπάρχοντα μοντέλα

καναλιών έχουν αναπτυχθεί αποκλειστικά για συστήματα επικοινωνίας και δεν λαμβάνουν υπόψη τα συστήματα που βασίζονται στη συγχώνευση ανίχνευσης και επικοινωνίας. Επομένως, υπάρχει ανάγκη για έρευνα σχετικά με τη μοντελοποίηση καναλιών που να εξετάζει ειδικά την ενσωμάτωση της συγχώνευσης αισθητήρων και επικοινωνιών στις επικοινωνίες οχημάτων B5G και 6G.

Προοπτική εφαρμογής καναλιού

Ενώ η εκτεταμένη έρευνα έχει επικεντρωθεί στη χρήση μετρήσεων καναλιού για τη βελτίωση της ακρίβειας της μοντελοποίησης καναλιού, υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες που στοχεύουν στην απλοποίηση των μοντέλων καναλιού από την άποψη των εφαρμογών καναλιού. Επί του παρόντος, η έμφαση στη μοντελοποίηση καναλιών δίνεται κυρίως στην ακριβή αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών του καναλιού και όχι στην κατανόηση της σημασίας αυτών των χαρακτηριστικών στο πλαίσιο των επιπέδων επικοινωνίας και δικτύωσης.

Είναι ζωτικής σημασίας να δημιουργηθούν πλατφόρμες προσομοίωσης συστημάτων σε διαφορετικά επίπεδα για την αξιολόγηση και τη σύγκριση της σχετικής σημασίας των διαφόρων χαρακτηριστικών καναλιών και των αντίστοιχων μεθόδων μοντελοποίησης. Αυτό θα επέτρεπε τη λογική απλούστευση των μοντέλων καναλιών με βάση τη σημασία τους για τις εφαρμογές καναλιών.

Για παράδειγμα, συγκρίνοντας εφαρμογές καναλιών, μπορεί κανείς να επιλέξει κατάλληλα διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης μη στασιμότητας (π.χ. παραμετρικές, γεωμετρικές ή υβριδικές μέθοδοι) για διαφορετικά στρώματα σχεδιασμού και προσομοίωσης επικοινωνιών οχημάτων B5G και 6G. Επιπλέον, η υβριδική μέθοδος μπορεί να βελτιωθεί και να απλοποιηθεί με την προσαρμογή των αντίστοιχων βαρών της παραμετρικής και της γεωμετρικής μεθόδου [46-47].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σενάριο Εργασίας

(Υποκεφάλαιο 4.1) Υπόβαθρο πρωτοκόλλου 802.11p

(Ενότητα 4.1.1) το πρωτόκολλο οχηματικών επικοινωνιών 802.11p

Το 802.11p είναι ένα πρότυπο της οικογένειας πρωτοκόλλων IEEE 802.11 που έχει σχεδιαστεί ειδικά για επικοινωνίες οχημάτων. Είναι επίσης γνωστό ως Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) και αποσκοπεί στην επικοινωνία μεταξύ οχημάτων (V2V) και μεταξύ οχημάτων και οδικών υποδομών (V2I). Ακολουθούν ορισμένα βασικά σημεία σχετικά με το πρωτόκολλο 802.11p:

Ζώνη συχνοτήτων: Το 802.11p λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 5,9 GHz, η οποία προορίζεται για εφαρμογές ευφών συστημάτων μεταφορών (ITS). Αυτή η ζώνη συχνοτήτων παρέχει κατάλληλο περιβάλλον για επικοινωνίες οχημάτων, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές με άλλα ασύρματα συστήματα.

Φυσικό επίπεδο: Το 802.11p χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του σχήματος διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) για την επίτευξη υψηλών ρυθμών δεδομένων και ανθεκτικότητας σε περιβάλλοντα οχημάτων. Ο σχεδιασμός του φυσικού στρώματος λαμβάνει υπόψη την υψηλή κινητικότητα, τη διάχυση και τα χαρακτηριστικά διάδοσης πολλαπλών διαδρομών που συχνά συναντώνται σε σενάρια οχημάτων.

Στρώμα MAC: Το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) του 802.11p είναι προσαρμοσμένο για επικοινωνίες οχημάτων. Χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό πρόσβασης με βάση τον ανταγωνισμό που ονομάζεται Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) για τη διαχείριση της πρόσβασης στο ασύρματο μέσο. Το επίπεδο MAC περιλαμβάνει επίσης σχήματα πρόσβασης βάσει προτεραιότητας για την υποστήριξη κρίσιμων για τον χρόνο εφαρμογών ασφαλείας.

Μηχανισμός πρόσβασης στο κανάλι: Το 802.11p ορίζει έναν ειδικό μηχανισμό πρόσβασης στο κανάλι που ονομάζεται IEEE 802.11p Enhanced Distributed Channel Access (EDCA). Η EDCA παρέχει διαφορετικές κατηγορίες πρόσβασης

(ACs) με διαφορετικές προτεραιότητες και παραμέτρους, επιτρέποντας τη διαφοροποίηση μεταξύ διαφορετικών τύπων κυκλοφορίας και απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Εμβέλεια και κάλυψη: Το 802.11p έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις, επιτρέποντας στα οχήματα να επικοινωνούν μεταξύ τους και με τις οδικές υποδομές σε εμβέλεια εκατοντάδων μέτρων. Αυτή η ικανότητα επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας είναι απαραίτητη για εφαρμογές ασφαλείας, όπως η αποφυγή συγκρούσεων και η συνεργατική επίγνωση.

Εφαρμογές ασφαλείας: Το 802.11p προορίζεται κυρίως για εφαρμογές που σχετίζονται με την ασφάλεια σε περιβάλλοντα οχημάτων. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, μηνύματα συνεργατικής επίγνωσης, προειδοποίηση σύγκρουσης, ηλεκτρονικά φώτα πέδησης έκτακτης ανάγκης και προειδοποίηση σύγκρουσης σε διασταύρωση. Η χαμηλή καθυστέρηση και η αξιόπιστη επικοινωνία που παρέχει το 802.11p επιτρέπουν την έγκαιρη ανταλλαγή κρίσιμων για την ασφάλεια πληροφοριών μεταξύ οχημάτων.

Συνύπαρξη με το Wi-Fi: Αν και το 802.11p λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με ορισμένα πρότυπα Wi-Fi, έχει σχεδιαστεί για να συνυπάρχει με τα συστήματα Wi-Fi. Μηχανισμοί όπως η αξιολόγηση καθαρού καναλιού (CCA) και η αποφυγή παρεμβολών χρησιμοποιούνται για τον μετριασμό των παρεμβολών μεταξύ των δικτύων 802.11p και Wi-Fi, εξασφαλίζοντας αξιόπιστες και αποτελεσματικές επικοινωνίες και για τα δύο συστήματα.

Ενσωμάτωση με πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου: Το 802.11p χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου, όπως τα συστήματα Dedicated Short-Range Communications (DSRC) ή Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X). Αυτά τα πρωτόκολλα παρέχουν πρόσθετες λειτουργίες και υπηρεσίες για τις επικοινωνίες οχημάτων, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης του δικτύου, της ασφαλείας και της ολοκλήρωσης με τα κεντρικά συστήματα.

Συνολικά, το πρωτόκολλο 802.11p είναι ειδικά προσαρμοσμένο για την αντιμετώπιση των μοναδικών απαιτήσεων και προκλήσεων των επικοινωνιών οχημάτων. Παρέχει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία σε περιβάλλοντα οχημάτων, υποστηρίζοντας διάφορες εφαρμογές ασφάλειας και συνεργασίας που ενισχύουν την οδική ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

(Ενότητα 4.1.2) Απόδοση καναλιού στα 5,9 GHz για επικοινωνίες οχημάτων

Η απόδοση του καναλιού των 5,9 GHz, το οποίο χρησιμοποιείται για επικοινωνίες οχημάτων σύμφωνα με το πρότυπο 802.11p, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ακολουθούν ορισμένες βασικές πτυχές που επηρεάζουν την απόδοση:

Παρεμβολές: Η ζώνη συχνοτήτων 5,9 GHz διατίθεται αποκλειστικά για εφαρμογές ευφυών συστημάτων μεταφορών (ITS), γεγονός που συμβάλλει στον μετριασμό των παρεμβολών από άλλα ασύρματα συστήματα που λειτουργούν σε γειτονικές ζώνες συχνοτήτων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι παρεμβολές μπορούν ακόμη να προκύψουν από συσκευές που δεν ανήκουν στο σύστημα ITS ή από γειτονικές μεταδόσεις 5,9 GHz. Οι παρεμβολές μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα και την αξιοπιστία των επικοινωνιών στο κανάλι.

Εξασθένηση σήματος: Τα ασύρματα σήματα στα 5,9 GHz υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω εμποδίων, όπως κτίρια, δέντρα και άλλα οχήματα. Η παρουσία αυτών των εμποδίων μπορεί να προκαλέσει απώλεια σήματος, εξασθένηση και μειωμένη εμβέλεια. Η απόδοση του καναλιού των 5,9 GHz μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το συγκεκριμένο περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η επικοινωνία.

Εμβέλεια: Το κανάλι 5,9 GHz μπορεί να υποστηρίξει επικοινωνίες σχετικά μεγάλης εμβέλειας, γεγονός που είναι επωφελές για εφαρμογές οχημάτων. Επιτρέπει στα οχήματα να επικοινωνούν μεταξύ τους και με τις οδικές υποδομές σε αποστάσεις αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Ωστόσο, η πραγματική εμβέλεια που

μπορεί να επιτευχθεί μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες, την ισχύ του σήματος και τις παρεμβολές.

Ρυθμοί δεδομένων: Το κανάλι των 5,9 GHz, μαζί με το πρωτόκολλο 802.11p, παρέχει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων κατάλληλους για επικοινωνίες οχημάτων. Οι συγκεκριμένοι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζονται από το 802.11p μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Οι υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων διευκολύνουν την έγκαιρη ανταλλαγή πληροφοριών, συμπεριλαμβανομένων των μηνυμάτων ασφαλείας, μεταξύ οχημάτων και υποδομής.

Διείσδυση και ανάκλαση: Τα χαρακτηριστικά του καναλιού των 5,9 GHz επιτρέπουν καλή διείσδυση μέσα από ορισμένα υλικά, όπως το γυαλί, και μέτρια ανάκλαση από τις επιφάνειες. Αυτό μπορεί να είναι επωφελές για την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και στο εσωτερικό των οχημάτων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά διάδοσης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το συγκεκριμένο περιβάλλον και τα υλικά που εμπλέκονται.

Διάδοση πολλαπλών διαδρομών: Η διάδοση πολλαπλών διαδρομών αναφέρεται στο φαινόμενο όπου τα σήματα παίρνουν πολλαπλές διαδρομές για να φτάσουν στον δέκτη λόγω ανακλάσεων, περίθλασης και σκέδασης. Σε περιβάλλοντα οχημάτων, η διάδοση πολλαπλών διαδρομών μπορεί να είναι σημαντική και μπορεί να προκαλέσει εξασθένιση και υποβάθμιση του σήματος. Τεχνικές όπως η διαμόρφωση OFDM, που χρησιμοποιείται στο 802.11p, συμβάλλουν στον μετριασμό των επιπτώσεων της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών για τη διατήρηση αξιόπιστων επικοινωνιών.

Συμφόρηση καναλιού: Σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα οχημάτων ή υποδομών, το κανάλι των 5,9 GHz μπορεί να παρουσιάσει συμφόρηση, ιδίως εάν το διαθέσιμο εύρος ζώνης μοιράζεται μεταξύ πολλών χρηστών. Η συμφόρηση του καναλιού μπορεί να επηρεάσει την απόδοση, οδηγώντας σε αυξημένη απώλεια πακέτων, καθυστερήσεις και μειωμένη συνολική απόδοση.

Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση του καναλιού των 5,9 GHz, εξετάζονται παράγοντες όπως η διαχείριση παρεμβολών, η μοντελοποίηση διάδοσης σήματος και οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί κατανομής πόρων. Αυτές οι εκτιμήσεις αποσκοπούν στον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών, στη βελτίωση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας και στη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων του καναλιού σε περιβάλλοντα οχημάτων.

(Υποκεφάλαιο 4.2) Σενάριο εργασίας για αξιολόγηση πρωτοκόλλου 802.11p

(Ενότητα 4.2.1) Επιτυχής παράδοση και απώλεια πακέτων

Η εργασία μας επικεντρώνεται στην ανάπτυξη RSU για ένα σενάριο αυτοκινητόδρομου με βάση τις υπο-βέλτιστες συνθήκες. Αυτή η τοπολογία διαφέρει σημαντικά από τις συνθήκες που εξετάζονται σε σενάρια αστικής ανάπτυξης, όπου ένα περιβάλλον με πυκνά εμπόδια και σοβαρή διασπορά επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος. Σε ένα σενάριο αυτοκινητόδρομου, αναμένεται μια κυρίαρχη συνιστώσα γραμμής όρασης (LOS), με την κατάλληλη επιλογή του ύψους της κεραίας πομπού. Ως εκ τούτου, η μέση απώλεια διαδρομής μπορεί να εκτιμηθεί με αξιόπιστο τρόπο από τις ντετερμινιστικές εξαρτώμενες από την απόσταση απώλειες εξασθένησης [48].

Η πραγματική απόσταση πομπού-δέκτη (διαχωρισμός T-R) υπολογίστηκε με βάση τα πραγματικά ύψη των κεραιών, λαμβάνοντας υπόψη έναν χάρτη της περιοχής σε κατάλληλη κλίμακα καθώς και δεδομένα GPS. Λαμβάνονται υπόψη τα πραγματικά ύψη των κεραιών, επομένως οι υπολογισμοί μας πραγματοποιούνται με βάση ένα τρισδιάστατο μοντέλο καναλιού [48]. Το ύψος της κεραίας του πομπού θεωρήθηκε 7 μέτρα, ενώ για την κεραία του δέκτη θεωρήθηκε ύψος 3 μέτρων.

Το αυξημένο ύψος της κεραίας πομπού εξασφαλίζει ότι υπάρχει μια φαινομενικά αδιάλειπτη συνιστώσα LOS για ολόκληρη την περιοχή κάλυψης κάθε RSU [48]. Η ανάπτυξη της RSU πραγματοποιείται από την πλευρά της αριστερής λωρίδας κυκλοφορίας. Κάθε λωρίδα υποτίθεται ότι έχει πλάτος 9 μέτρα. Σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης εξετάζεται αυτοκινητόδρομος μήκους 6 χιλιομέτρων. Επομένως, πρέπει να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο κατώφλι λαμβανόμενης ισχύος (τοπική μέση τιμή)

προκειμένου να καθοριστεί η περιοχή κάλυψης κάθε RSU σε σχέση με τις "οριακές συνθήκες" της περιοχής.

Δεδομένου ότι το επίπεδο ευαισθησίας του δέκτη για το πρωτόκολλο IEEE 802.11p είναι στα -89 dBm [48], επιτρέπεται ένα περιθώριο εξασθένισης 4 dB για φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών μικρής κλίμακας, επομένως επιλέγεται ένα κατώφλι -85 dBm ως οριακή συνθήκη για το άκρο της περιοχής κάλυψης κάθε RSU. Μια κεραία πανκατευθυντικής κατεύθυνσης θεωρείται τόσο για το RSU όσο και για το δέκτη VANET. Θεωρείται συνολική αποτελεσματική ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) 10 mW (10 dBm) [48] για το RSU εκπομπής.

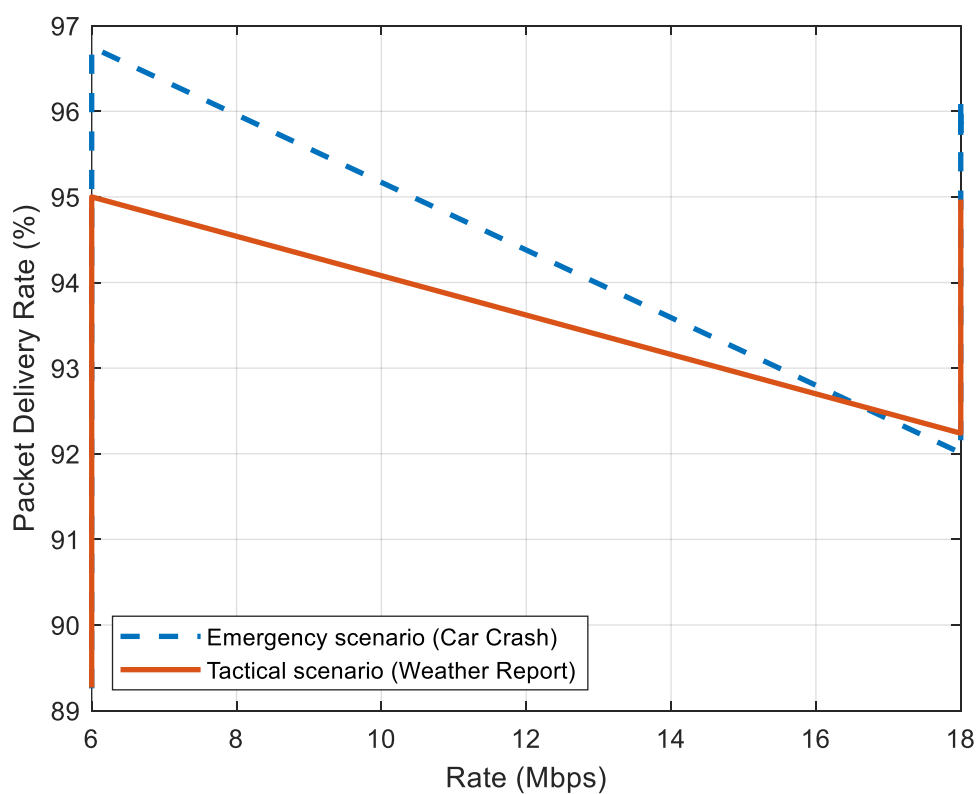
Για μέγιστη εμβέλεια ίση με 250 μέτρα, έχουμε τις εξής επιδόσεις του συστήματος:

Πίνακας 1. Packet Delivery Rate για σενάρια έκτακτης και τακτικής επικοινωνίας

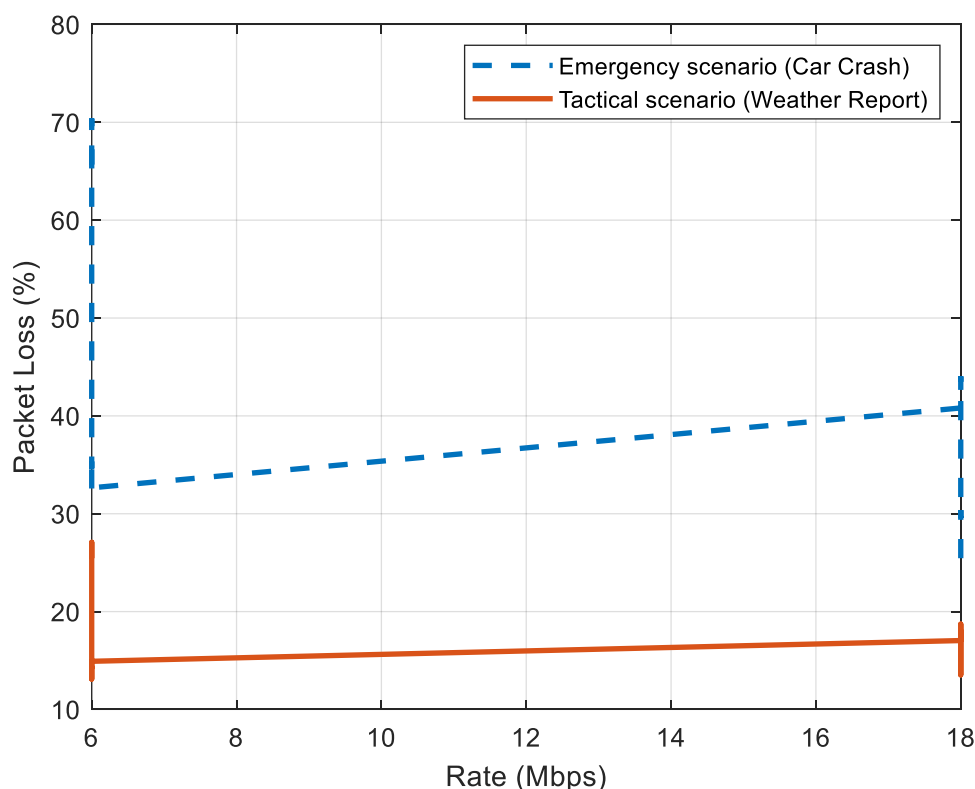
Rate (Mbps)	PDR (Emergency scenario)	PDR (Tactical scenario)
6	89.26	89.27
6	90.27	90.84
6	91.28	92.41
6	93.22	94.27
6	93.34	94.38
6	93.46	94.50
6	94.83	94.59
6	95.79	94.79
6	96.75	95.00
18	92.01	92.24
18	92.17	92.49
18	92.33	92.73
18	95.56	93.00
18	95.85	93.61
18	96.14	94.21
18	95.68	94.43
18	95.77	94.70
18	95.87	94.97

Πίνακας 2. Packet Loss για σενάρια έκτακτης και τακτικής επικοινωνίας

Rate (Mbps)	Packet Loss (Emergency scenario)	Packet Loss (Tactical scenario)
6	65.68	25.45
6	68.04	26.27
6	70.39	27.08
6	34.62	13.10
6	35.27	13.73
6	35.93	14.37
6	32.01	14.20
6	32.33	14.56
6	32.65	14.92
18	40.81	17.04
18	42.43	17.88
18	44.05	18.72
18	29.57	13.53
18	29.97	13.85
18	30.37	14.16
18	24.16	17.33
18	24.40	17.74
18	24.63	18.14



Σχήμα 4. Packet Delivery Rate για σενάρια έκτακτης και τακτικής επικοινωνίας



Σχήμα 5. Packet Loss για σενάρια έκτακτης και τακτικής επικοινωνίας

(Ενότητα 4.2.1) Εφαρμογή MATLAB Link Budget Analyzer για το κανάλι των 5,9 GHz

Υλοποιούμε σε περιβάλλον MATLAB και ειδικότερα στο εργαλείο Link Budget Analyzer την ζεύξη ανάμεσα σε δύο σημεία ενδιαφέροντος που αφορούν σε οδικό δίκτυο (οδός Αράξος – Πάτρα ως μέρος της Εθνικής Οδού Πατρών – Πύργου). Θεωρούμε ότι μία κεραία πρωτοκόλλου 802.11p είναι τοποθετημένη στο ύψωμα κεραιοσυστημάτων του Αράξου (38.171, 21.4603) και εκπέμπει σε όχημα με ύψος κεραίας 1,5 μέτρο που κινείται απομακρυνόμενο προς Πάτρα. Επιλέγουμε την θέση μέσω google earth: ΕΟ64, Λακκόπετρα 252 00, που αντιστοιχεί στις γεωγραφικές συντεταγμένες (38.1827, 21.4099). Θεωρούμε uplink μετάδοση, εξετάζοντας το «δυσχερέστερο» σενάριο ζεύξης. Η απόσταση των δύο σημείων σύμφωνα με το Google Earth είναι 4,6 χιλιόμετρα, απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την λαμβανόμενη στην άνωθι προσομοίωση. Συνεπώς, θεωρούμε αυξημένη ισχύ εκπομπής ίση με 30 dBm (1 Watt).

Ο ζητούμενος ρυθμός μετάδοσης είναι 18 Mbps, η μέγιστη τιμή που πετύχαμε στο προηγούμενο σενάριο μελέτης. Στα Σχήματα 6-8 απεικονίζονται οι προδιαγραφές καναλιού-ρυθμού μετάδοσης, πομπού και δέκτη.

▼ Link:	
Frequency (Hz):	5.9e+09
Bandwidth (Hz):	1e+07
Polarization mismatch (deg):	45
Bit rate (Mbps):	18
Implementation loss (dB):	2
Required Eb/No (dB):	10.6

Σχήμα 6. Προδιαγραφές καναλιού (5,9 GHz) και ρυθμού μετάδοσης

▼ Transmitter:	
Latitude (deg):	38.171
Longitude (deg):	21.4603
Altitude (m):	34.05
Amplifier power (dBW):	0
Amplifier backoff loss (dB):	2
Antenna diameter (m):	0.05
Antenna efficiency (%):	55
Feeder loss (dB):	1
Radome loss (dB):	1
Other losses (dB):	2

Σχήμα 7. Προδιαγραφές πομπού (κεραία οχήματος)

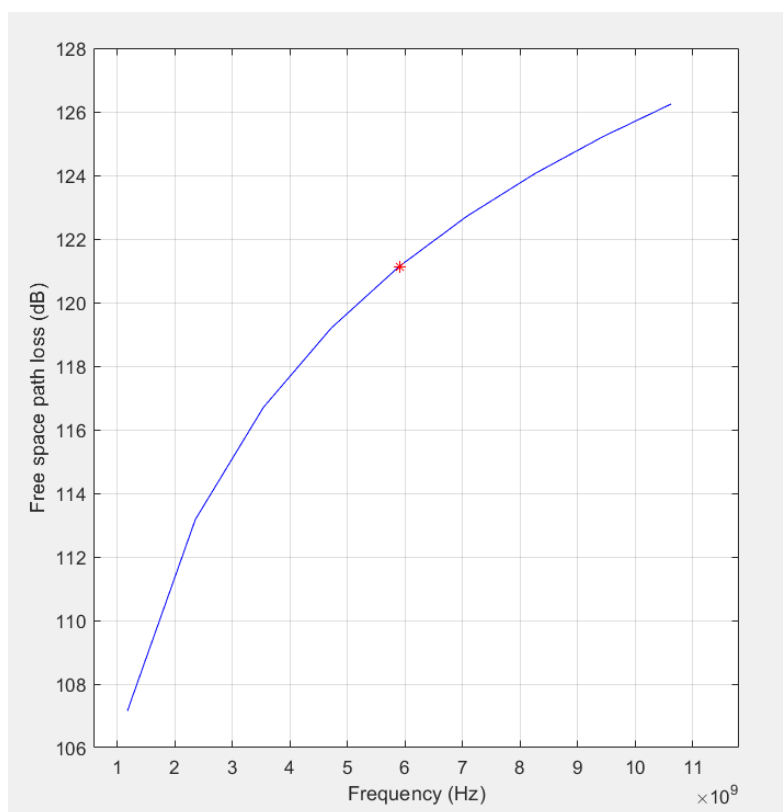
▼ Receiver:	
Latitude (deg):	38.1827
Longitude (deg):	21.4099
Altitude (m):	178.39
Antenna diameter (m):	0.05
Antenna efficiency (%):	55
Radome loss (dB):	2
Feeder loss (dB):	1
System temperature (K):	4200
Other losses (dB):	1

Σχήμα 8. Προδιαγραφές δέκτη (κεραία RSU)

▼ Uplink:

Distance (km)	4.61
Elevation (deg)	1.77
Tx Antenna gain (dBi)	7.21
Tx EIRP (dB)	1.21
Free space path loss (dB)	121.14
Rain attenuation (dB)	0.01
Fog/Cloud attenuation (dB)	0.00
Atmospheric gas attenuation (dB)	0.04
Polarization loss (dB)	3.01
Total propagation losses (dB)	126.19
Received isotropic power (dBW)	-126.99
Rx Antenna gain (dBi)	7.21
Received signal power (dBi)	-121.78
Rx G/T (dB/K)	-29.03
C/N (dB)	0.59
C/No (dB-Hz)	70.59
Received Eb/No (dB)	-1.96
Margin (dB)	-14.56

Σχήμα 9 Προδιαγραφές και απόδοση ζεύξης



Σχήμα 10 Απώλειες οδεύσεως για τα 5,9 GHz και απόσταση πομπού-δέκτη ίση με 4,6 χιλιόμετρα για συνθήκες LOS

Στο Σχήμα 9 παρατηρούμε τις προδιαγραφές του Link Budget, δηλαδή την μελέτη των παραμέτρων της ζεύξης. Στο Σχήμα 10 παρατηρούμε την ολική απώλεια οδεύσεως περί τα 121 dB, θεωρώντας πως έχουμε Line-of-Sight (οπτική επαφή των δύο κεραιών), όπως και στο αρχικό σενάριο προσομοίωσης. Με αυξημένη ισχύ εκπομπής, έχουμε οριακή συνδεσιμότητα για τα 4,6 χιλιόμετρα, που ελήφθησαν όμως ως ακραίο σενάριο εργασίας, για να επιβεβαιώσουν-δοκιμάσουν σε «οριακές συνθήκες» τα ευρήματα της αρχικής προσομοίωσης που έλαβε χώρα σε ευμενέστερες συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τόσο από την θεωρητική μελέτη που πραγματοποιήσαμε στα τρία πρώτα κεφάλαια όσο και από την πρακτική υλοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης MATLAB/Link Budget Analyzer στα πλαίσια του σεναρίου εργασίας που πραγματοποιήσαμε στο τέταρτο κεφάλαιο, καταλήγουμε σε κάποια κομβικά συμπεράσματα, σύμφωνα με τα οποία η μοντελοποίηση καναλιών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στο σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων επικοινωνίας στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS).

Πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση καναλιών επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος επικοινωνίας σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα οχημάτων. Με την ακριβή αποτύπωση των χαρακτηριστικών διάδοσης, της εξασθένησης του σήματος, των επιδράσεων πολλαπλών διαδρομών και των παρεμβολών, τα μοντέλα καναλιών επιτρέπουν στους ερευνητές και τους μηχανικούς να αξιολογούν την αξιοπιστία, την κάλυψη, τους ρυθμούς δεδομένων και την καθυστέρηση των συνδέσεων επικοινωνίας στα ITS. Η αξιολόγηση αυτή βοηθά στην κατανόηση των περιορισμών του συστήματος και στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού.

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα καναλιών βοηθούν στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων επικοινωνίας ITS. Με την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων και συνθηκών διάδοσης, η μοντελοποίηση καναλιών παρέχει πληροφορίες για την επιλογή παραμέτρων μετάδοσης, διαμορφώσεων κεραιών, σχημάτων διαμόρφωσης και τεχνικών κωδικοποίησης. Βοηθά στον προσδιορισμό των βέλτιστων διαμορφώσεων του συστήματος που μεγιστοποιούν την κάλυψη, ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές και πληρούν τις επιθυμητές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών.

Τα μοντέλα καναλιών βοηθούν επίσης στην τοποθέτηση και βελτιστοποίηση των κεραιών για συστήματα επικοινωνίας οχημάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά διάδοσης, όπως η ισχύς του σήματος, η εξασθένιση και οι επιδράσεις πολλαπλών διαδρομών, η μοντελοποίηση καναλιού καθοδηγεί την τοποθέτηση των κεραιών στα οχήματα και τις υποδομές για την επίτευξη καλύτερης λήψης σήματος. Βοηθά επίσης στη βελτιστοποίηση τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης, όπου οι κατευθυντικές κεραιές μπορούν να προσαρμοστούν για να βελτιώσουν την ισχύ του σήματος και να μειώσουν τις παρεμβολές.

Η μοντελοποίηση καναλιών συμβάλλει μεταξύ άλλων στην κατανόηση και τη διαχείριση των παρεμβολών στα ITS. Τα περιβάλλοντα οχημάτων χαρακτηρίζονται από εγκαταστάσεις υψηλής πυκνότητας και από το ενδεχόμενο παρεμβολών από γειτονικά οχήματα, υποδομές ή συνυπάρχοντα ασύρματα συστήματα. Τα μοντέλα καναλιών επιτρέπουν την αξιολόγηση των επιπέδων παρεμβολής, τον εντοπισμό των πηγών παρεμβολής και την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού των παρεμβολών για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας και της απόδοσης του συστήματος.

Τα μοντέλα καναλιών υποστηρίζουν επίσης το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συστήματος παρέχοντας πληροφορίες για τις περιοχές κάλυψης, την ισχύ του σήματος και τη χωρητικότητα του συστήματος. Με την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων ανάπτυξης, η μοντελοποίηση καναλιών βοηθά στον καθορισμό του αριθμού και της τοποθέτησης των οδικών μονάδων, των σταθμών βάσης ή των σημείων πρόσβασης για βέλτιστη κάλυψη και χωρητικότητα. Βοηθά στη βελτιστοποίηση της υποδομής δικτύου και της κατανομής των πόρων για τη διασφάλιση αποτελεσματικής επικοινωνίας στα ITS.

Εκτός αυτού, η μοντελοποίηση καναλιών διευκολύνει το σχεδιασμό και την αξιολόγηση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων επικοινωνίας για τα ITS. Με την ενσωμάτωση ρεαλιστικών μοντέλων καναλιών, οι ερευνητές μπορούν να αξιολογήσουν την απόδοση πρωτοκόλλων, όπως πρωτόκολλα MAC, αλγόριθμοι δρομολόγησης και μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης, σε δυναμικά και απαιτητικά περιβάλλοντα οχημάτων. Αυτό βοηθά στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με την απόδοση, την καθυστέρηση, τη δικαιοσύνη και την επεκτασιμότητα του συστήματος.

Τέλος, η ακριβής μοντελοποίηση καναλιών είναι ζωτικής σημασίας για κρίσιμες για την ασφάλεια εφαρμογές στα ITS, όπως τα συστήματα προειδοποίησης σύγκρουσης και τα συνεργατικά μηνύματα ευαισθητοποίησης. Εξασφαλίζει ότι οι σύνδεσμοι επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων και υποδομής παρέχουν αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης μετάδοση πληροφοριών που σχετίζονται με την ασφάλεια. Με τη συνεκτίμηση των φαινομένων εξασθένισης, πολλαπλών διαδρομών και παρεμβολών, τα μοντέλα καναλιών βοηθούν στο σχεδιασμό αξιόπιστων συστημάτων επικοινωνίας που ενισχύουν την οδική ασφάλεια και την αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης.

Εν κατακλείδι, η μοντελοποίηση καναλιών έχει σημαντική σημασία για τα ευφυή συστήματα μεταφορών. Βοηθά στην αξιολόγηση, το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την ανάπτυξη των συστημάτων επικοινωνίας, επιτρέποντας καλύτερες επιδόσεις, αξιοπιστία και ασφάλεια σε περιβάλλοντα οχημάτων. Καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, η μοντελοποίηση καναλιού επιτρέπει την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων και την αποτελεσματική χρήση των πόρων στα συστήματα επικοινωνίας ITS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. az, G., Macia, H., Valero, V., Boubeta-Puig2, J., & Cuartero, F. (2018). An Intelligent Transportation System to control air pollution and road traffic in cities integrating CEP and Colored Petri Nets. *Neural Computing and Applications* , 32 , 405-426 . doi : 10.1007/s00521-018-3850-1.
2. Shaheen, S.A., & Finson, R. (2004). Intelligent Transportation Systems. University of California: Berkeley and Davis.
3. Auer , A., Feese, S., & Lockwood , S. (2021). History of Intelligent Transportation Systems.1200 New Jersey Ave SE Washington, DC : U.S. Department of Transportation or Booz Allen Hamilton.
4. Beckman, T., & Cook, D. (2004). Educational Epidemiology. JAMA: The Journal of the American Medical Association, 24.
5. McCarthy, J. (1987)., ‘Generality In Artificial Intelligence. Communications of the ACM, 30’ , σσ. 1030-1035.
6. Jucevicius, R., Liugailaite-Radzvickiene, L. 2013. Smart Development: A Conceptual Framework, in The Proceedings of The 10th International Conference on Intellectual Capital, Knowledge Management & Organisational Learning, ICICKM-2013: 212-219.
7. Figueiredo, L., Jesus, I., Machado, J.A.T., Ferreira, J.R. & Martins de Carvalho, J.L. (2001). Towards the Development of Intelligent Transportation Systems. IEEE Xplore digital library, Paper ID Number 81. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/ITSC.2001.948835.
8. Abdulhai, B. & Kattan, L. (2003). Reinforcement learning: Introduction to theory and potential for transportation applications. Canadian Journal of Civil Engineering, 30(6), pp. 981 – 991. <https://doi.org/10.1139/I03-014>.
9. Vahid Homayoun και Sayed Tarek (2003) Using the Canadian ITS architecture for evaluating the safety benefis of intelligent transportation applications, Canadian journal of civil engineering, Vol,30:981-991.
10. Kumar, S., & Chandra, S. (2019). Intelligent Transportation Systems: A Comprehensive Review. Journal of Advanced Transportation, 2019, 1-24.
11. Dongbin, Z., Yujie, D., Zhen, Z. (2011) Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control: A Survey.
12. Whaiduzzaman M, Sookhak M, Gani A, Buyya R (2014) A survey on vehicular cloud computing. J Netw Comput Appl 40:325–344.
13. Bose, A., and Ioannou, P. (2001). “Analysis of Traffic Flow with Mixed Manual and Intelligent Cruise Control Vehicles: Theory and Experiments” (California PATH Research Report UCBITS-PRR-2001-13). California PATH, Richmond, CA.
14. Kusakabe, T., Sharyo, T. & Asakura, Y. (2012). Effects of traffic incident information on drivers’ route choice behaviour in urban expressway network. Elsevier Science Direct: Social and Behavioral Sciences, 54, pp. 179 – 188. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.737.
15. Hussain R, Oh H (2014) Cooperation-aware VANET clouds: providing secure cloud services to vehicular ad hoc networks. J Info Process Sys 10(1):103–118.
16. Anaya, J.J.; Talavera, E.; Jimenez, F.; Zato, J.G.; Gomez, N.; Naranjo, J.E. GeoNetworking based V2V Mesh Communications over WSN. In Proceedings of

- the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), The Hague, The Netherlands, 6–9 October 2013; pp. 2421–2426.
17. Zhang, E.D.L. Vehicle Stability Control System of Emergency Brake on Split-Mu Road. In Proceedings of the 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), Hangzhou, China, 26–27 August 2017; Volume 1, pp. 252–255.
 18. Boban, M.; d'Orey, P.M. Exploring the Practical Limits of Cooperative Awareness in Vehicular Communications. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016, 65, 3904–3916. [CrossRef].
 19. Ali, G.G.M.N.; Noor-A-Rahim, M.; Chong, P.H.J.; Guan, Y.L. Analysis and Improvement of Reliability Through Coding for Safety Message Broadcasting in Urban Vehicular Networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018, 67, 6774–6787. [CrossRef].
 20. Liu, G.; Wang, L.; Zou, S. A radar-based blind spot detection and warning system for driver assistance. In Proceedings of the 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 25–26 March 2017; pp. 2204–2208, G.;
 21. Cao, W.; Wu, Y.; Zhou, E.; Li, J.; Liu, J. Reliable Integrated ASC and DYC Control of All-Wheel-Independent Drive Electric Vehicles over CAN Using A Codesign Methodology. *IEEE Access* 2018, 7, 6047–6059. [CrossRef].
 22. Wang, C.; Song, C.; Li, J. Research on Key State Parameters Estimation of Electric Vehicle ESP Based on Multi-sensor. In Proceedings of the 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Qinhuangdao, China, 18–20 September 2015; pp. 29–32.
 23. Lu, Y.; Yuan, Y.; Wang, Q. Forward Vehicle Collision Warning Based on Quick Camera Calibration. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Calgary, AB, Canada, 15–20 April 2018; pp. 2586–2590.
 24. Chao, C.; Qin, X. Research of vehicle automatic emergency braking system evaluation methods. In Proceedings of the IET International Conference on Intelligent and Connected Vehicles (ICV 2016), Chongqing, China, 22–23 September 2016; pp. 1–9.
 25. Kusano, K.D.; Gabler, H.C. Safety Benefits of Forward Collision Warning, Brake Assist, and Autonomous Braking Systems in Rear-End Collisions. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2012, 13, 1546–1555. [CrossRef].
 26. Vinuchandran, A.V.; Shanmugasundaram, R. A real-time lane departure warning and vehicle detection system using monoscopic camera. In Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent.
 27. Arena, F.; Pau, G. An Overview of Vehicular Communications, Faculty of Engineering and Architecture, Kore University of Enna, Cittadella Universitaria, 94100 Enna, Italy; 24 January 2019.
 28. Sepulcre, M.; Gozalvez, J.; Altintas, O.; Kremo, H. Context-aware heterogeneous V2I communications. In Proceedings of the 2015 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM), Munich, Germany, 5–7 October 2015; pp. 295–300.

29. Department of Transportation of the United States of America. Vehicle-To-Infrastructure (V2I) Resources. Available online: <https://www.its.dot.gov/v2i/index.htm> (accessed on 29 December 2018).
30. Pau, G.; Campisi, T.; Canale, A.; Severino, A.; Collotta, M.; Tesoriere, G. Smart Pedestrian Crossing Management at Traffic Light Junctions through a Fuzzy-Based Approach. *Future Internet* 2018, 10, 15.
31. Lee, J.H.; Park, M.; Shah, S.C. Wi-Fi direct based mobile ad hoc network. In *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Krakow, Poland, 11–14 July 2017; pp. 116–120.
32. Nguyen, H.; Noor-A-Rahim, M.; Liu, Z.; Jamaludin, D.; Guan, Y.L. A Semi-Empirical Performance Study of Two-Hop DSRC Message Relaying at Road Intersections. *Information* 2018, 9, 147. [CrossRef].
33. Asuzu, P.; Thompson, C. Road condition identification from millimeter-wave radar backscatter measurements. In *Proceedings of the 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, Oklahoma City, OK, USA, 23–27 April 2018; pp. 0012–0016.
34. Collotta, M.; Pau, G.; Talty, T.; Tonguz, O.K. Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 125–131. [CrossRef].
35. Zhang, J., Tang, P., Yu, L., et al.: ‘Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook’, *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, 2020, 21, (1), pp. 39–61.
36. Bu sari, S.A., Huq, K., Mumtaz, S., et al.: ‘Millimeter-wave massive MIMO communication for future wireless systems: a survey’, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2018, 20, (2), pp. 836–869
37. Viriyasitavat, W., Boban, M., Tsai, H., et al.: ‘Vehicular communications: survey and challenges of channel and propagation models’, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2015, 10, (2), pp. 55–66.
38. Huang, J., Liu, Y., Wang, C.X., et al.: ‘5G millimeter wave channel sounders, measurements, and models: recent developments and future challenges’, *IEEE Commun. Mag.*, 2019, 57, (1), pp. 138–145.
39. Chen, J., Yin, X., Cai, X., et al.: ‘Measurement-based massive MIMO channel modeling for outdoor LoS and NLoS environments’, *IEEE Access*, 2017, 5, pp. 2126–2140.
40. Huang, Z., Zhang, X., Cheng, X.: ‘Non-geometrical stochastic model for non-stationary wideband vehicular communication channels’, *IET Commun.*, 2020, 14, (1), pp. 54–62.
41. Zhang, J., Tang, P., Tian, L., et al.: ‘6–100 GHz research progress and challenges for fifth generation (5G) and future wireless communication from channel perspective’, *Sci. China Inf. Sci.*, 2017, 60, (8), pp. 1–16.
42. Matloak, D.W.: ‘Channel modeling for vehicle-to-vehicle communications’, *IEEE Commun. Mag.*, 2008, 46, (5), pp. 76–83.
43. Molisch, A.F., Tufvesson, F., Karedal, J., et al.: ‘A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels’, *IEEE Wirel. Commun.*, 2009, 16, (6), pp. 12–22.
44. Ghazal, A., Yuan, Y., Wang, C.X., et al.: ‘A non-stationary IMT-A MIMO channel model for high-mobility wireless communication systems’, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 2017, 16, (4), pp. 2057–2068.

45. Zeng, F., Zhang, R., Cheng, X., et al.: 'Channel prediction based scheduling for data dissemination in VANETs', *IEEE Commun. Lett.*, 2017, 21, (6), pp. 1409–1412.
46. Chen, S., Hu, J., Shi, Y., et al.: 'A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with Chinese development', *IEEE Internet Things J.*, 2020, 7, (5), pp. 3872–3881.
47. Cheng, X., Huang, Z., Chen, S. (2020). "Vehicular communication channel measurement, modelling, and application for beyond 5G and 6G", *IET Journal of The Institution of Engineering and Technology*. doi: 10.1049/iet-com.2020.0531.
48. Charalampopoulos, Georgios, Tasos Dagiuklas, and Theofilos Chrysikos. "V2I applications in highways: How RSU dimensioning can improve service delivery." 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT). IEEE, 2016.