



# **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

## **ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

### **ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

#### **Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών**

**Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών & Κατανεμημένων Συστημάτων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X**

**Αλεξία Πρέβεζα – Αθανάσιος Παπουτσής  
Α.Μ. 20001 Α.Μ. 20035**

**Εισηγητής: Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής**

(Κενό φύλλο)

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X**

**Αλεξία Πρέβεζα – Αθανάσιος Παπουτσής**  
**A.M. 20001                      A.M. 20035**

**Εισηγητής:**

**Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής**  
**Νικόλαος Μυριδάκης, Καθηγητής**

**Ημερομηνία εξέτασης 23/03/2022**

**(Κενό φύλλο)**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Πρέβεζα Αλεξία του Παύλου με αριθμό μητρώου 20001 και Παπουτσής Αθανάσιος του Γεωργίου με αριθμό μητρώου 20035 φοιτητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνουμε ότι:

«Είμαστε συγγραφείς αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμάς αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μας, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μας ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση των πτυχίων μας».

Η Δηλούσα

Αλεξία Πρέβεζα

Ο Δηλών

Αθανάσιος Παπουτσής



**(Κενό φύλλο)**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, στο γνωστικό αντικείμενο της σύγχρονης γενιάς τηλεπικοινωνιακών συστημάτων γνωστής ως 5G και πιο συγκεκριμένα την επίδραση αυτής στα αυτόνομα οχήματα και στις ευφυείς διασταυρώσεις. Είναι ένα θέμα που άπτεται της καθημερινότητας του συνόλου των πολιτών και αυτό από μόνο του αρκεί για να του προσδώσει τον χαρακτηρισμό του «άκρως ενδιαφέροντος».

Την προσπάθειά μας αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής κ. Ιωάννης Χοχλιούρος, τον οποίο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τόσο για τις σαφείς οδηγίες και καθοδήγηση που εξαρχής μας προσέφερε, όσο και για τη διάθεση υποστηρικτικού υλικού αλλά και την εν συνεχεία παροχή της αμέριστης βοήθειάς του τόσο στην εξεύρεση βιβλιογραφικών πηγών όσο και στον τρόπο ενσωμάτωσης και αξιοποίησης αυτών. Ιδιαίτερη αναφορά θα θέλαμε να κάνουμε στην ευγένεια και στην υπομονή που επέδειξε, καθώς η επικοινωνία μας έγινε κυρίως με ηλεκτρονική αλληλογραφία (email) και τηλεδιασκέψεις ενώ δεν έλειψαν μικρές παρανοήσεις και αστοχίες από μέρους μας, οι οποίες όμως επισημάνθηκαν και αποκαταστάθηκαν άμεσα.

Θερμές ευχαριστίες και συγχαρητήρια αξίζουν επίσης στον υπεύθυνο του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών ΕΤΠΥ κ. Αντώνιο Μπόγρη, αλλά και σε όλο το έμπυχο δυναμικό του ΠΜΣ, που μας έδωσε τη δυνατότητα να έρθουμε σε επαφή και να εμβαθύνουμε στις πολύ σύγχρονες πτυχές της τεχνολογικής εξέλιξης που συντελείται στον καιρό μας.

Ακόμα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας οι οποίες εκ των πραγμάτων στερήθηκαν από πολύτιμο χρόνο που θα δαπανούσαμε μαζί τους.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ο ένας τον άλλον, γιατί αν και επί της ουσίας άγνωστοι μεταξύ μας, καταφέραμε να αναπτύξουμε ένα πολύ καλό πνεύμα συνεργασίας και αμοιβαίας κατανόησης στο βαθμό που ήταν αναγκαία για να φέρουμε εις πέρας την εργασία.



**(Κενό φύλλο)**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη διερεύνηση διαφόρων θεμάτων που αφορούν στην ανάπτυξη των ευφυών οδικών διασταυρώσεων, μέσα από τη χρήση εφαρμογών επικοινωνίας Vehicle-to-Everything (V2X), υπό το πλαίσιο δράσεων του 5G.

Η εργασία σκοπεύει στην ανάδειξη του ρόλου που καλούνται να διαδραματίσουν οι ευφυείς διασταυρώσεις στο περιβάλλον των σύγχρονων «έξυπνων πόλεων» σε συνδυασμό με διαφαινόμενες καινοτόμες λύσεις για αυτόνομη οδήγηση.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται αναφορά στην τεχνολογική εξέλιξη που συντελείται με την 5<sup>η</sup> γενιά τηλεπικοινωνιακών συστημάτων γνωστή ως 5G, με σκοπό την εισαγωγή στο θέμα της εργασίας και την σφαιρική κάλυψη του θέματος. Επιχειρείται μια αποτίμηση της τρέχουσας ανάπτυξης του συστήματος 5G καθώς και μια σύντομη περιγραφή των υπηρεσιών που αυτό δύναται να προσφέρει, σε συνάρτηση με τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν με έμφαση στην ταχύτητα (speed) και στη λανθάνουσα καθυστέρηση (latency), στις τεχνολογικές λύσεις που αυτή τη στιγμή προτείνονται (MEC, NFV, SDN, NSM) όπως επίσης και στα κύρια σενάρια χρήσης του 5G για την τρέχουσα δεκαετία (eMBB, URLLC, mMTC). Παράλληλα, γίνεται αναφορά στο έργο 5G-DRIVE, το οποίο αποτελεί μια κοινή προσπάθεια Ε.Ε. και Κίνας για την προσέγγιση των δυνατοτήτων και την επίλυση προβλημάτων χρήσης του 5G σε σχέση με τα αυτόνομα οχήματα και τη διαλειτουργικότητα αυτών με την υποδομή των οδικών δικτύων.

Επειδή η εξέλιξη ουσιαστικά συνιστά μια αέναη και δυναμική διαδικασία, έχει διαφανεί και προδιαγράφεται ο «διάδοχος» του 5G που είναι το 6G και το οποίο ήδη αποτελεί αντικείμενο επενδύσεων τόσο από εταιρίες όσο και από κρατικές οντότητες. Ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά και συναφή σενάρια χρήσης του 6G περιγράφονται επίσης στην παρούσα εργασία.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται αναφορά στα συστήματα μεταφορών, με έμφαση σε αυτά των αστικών περιοχών και την κοινωνικο-οικονομική σημασία τους για τις σύγχρονες πόλεις. Ταυτόχρονα επιτελείται εισαγωγή στα συστήματα V2X και σε μερικές από τις πολλά υποσχόμενες χρήσεις τους για τη μελλοντική κάθετη αγορά των μεταφορών.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η εξέλιξη της τεχνολογίας των οχημάτων (ήτοι CV, AV και CAV) και το πώς αυτή οδηγεί στην πλήρως αυτόνομη και συνεργατική οδήγηση, με αναφορά και στα επίπεδα αυτοματοποιημένης κινητικότητας, όπως ορίζονται από την SAE.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται επισκόπηση των συστημάτων «έξυπνων δρόμων» που έχουν προταθεί/εφαρμοστεί πειραματικά αλλά και παραγωγικά, στο πλαίσιο των δράσεων υλοποίησης προγραμμάτων έξυπνων πόλεων.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα συστήματα που προσπάθησαν στο παρελθόν να βελτιστοποιήσουν τη δρομολόγηση των διασταυρώσεων (ήτοι SCATS, SCOOT, WSNs) και επιπλέον εξηγείται και αξιολογείται το πώς ορίζεται πλέον μια έξυπνη διασταύρωση με σενάρια χρήσης του 5G.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται εκτενής αναφορά στο σύστημα GLOSA, το οποίο έχει «ωριμάσει» και λειτουργεί πειραματικά σε πάρα πολλές περιπτώσεις χρήσης και το οποίο υποστηρίζεται σχεδόν από το σύνολο των νέων οχημάτων. Ακολουθεί αναφορά σχετικά με τη μελέτη του συστήματος στο πλαίσιο του έργου 5G-DRIVE και στους βασικούς δείκτες απόδοσής του.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σε βάθος προσέγγιση της περίπτωσης χρήσης της έξυπνης διασταύρωσης και περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία και ο αλγόριθμος επίλυσης των πιθανών διενέξεων μεταξύ όλων των χρηστών της διασταύρωσης (οχημάτων, ποδηλάτων, πεζών).

Το **Κεφάλαιο 8** επιχειρεί μια επισκόπηση της εργασίας με την παράθεση συμπερασμάτων αναφορικά με την ενδεχόμενη εφαρμοσιμότητα και με τις αναδυόμενες προκλήσεις.

Στο **Παράρτημα Α** γίνεται αναφορά στη φυσική αρχιτεκτονική για τη μελέτη του συστήματος GLOSA και της έξυπνης διασταύρωσης στο ερευνητικό πρόγραμμα 5G-DRIVE όπως επίσης και σε σχετικές δοκιμές που διεξήχθησαν παράλληλα στην Ε.Ε. και στην Κίνα, ώστε να διαπιστωθεί η λειτουργία και για να αποτυπωθούν προβλήματα των συστημάτων αυτών.

## ABSTRACT

The following thesis focuses on the different aspects of the currently evolving “smart” (or “intelligent”) intersections, specifically via “Vehicle-to-Everything” communicating applications (V2X), under the influence of 5G.

The main purpose of the present thesis is to highlight the role of the “smart intersections” as a means of decongesting “smart cities” while also recommending innovative solutions in regard to autonomous driving.

As an introduction to the main topic, Chapter 1 is structured around the technological evolution taking place in the age of the 5th generation of a telecommunication system, known as 5G. An estimation of the current development of this system is presented as well as a brief description of the accommodation it has to offer, in relevance to its main technical features.

In particular, the work focuses on certain fundamental challenges (such as speed and latency), on the technical solutions proposed to overcome potential hurdles (such as MEC, NFV, SDN, NSM) as well as on the primary use of the 5G system in the present decade towards promoting eMBB, URLLC, mMTC applications. In addition, there is an analysis of the 5G-DRIVE project, which is a common effort of the EU and China to approach the possibilities and uses of 5G relevant to autonomous vehicles and their interoperability with existing infrastructures.

However, it is well known that evolution is a perpetual and dynamic process, so the successor to 5G systems begins to rise. 6G is already being invested by both companies and governmental entities and its main features and related usage are also analyzed in the present thesis.

Chapter 2 refers to the transportation systems, emphasizing upon those existing in urban areas as well as on their financial importance in modern cities. Moreover, it makes an introduction to the V2X systems, suggesting some of their potential future functions.

In Chapter 3 the evolution of vehicle technology is presented (i.e.: CV, AV and CAV) along with the ways this can lead to fully autonomous driving, with reference to all different layers of automated mobility, as defined by SAE.

Chapter 4 presents an overview of the “smart roads” systems that have been suggested or have already been applied experimentally in the context of implementing various initiatives for “smart cities”.

Chapter 5 makes a throwback to the systems that were used in the past, to improve the congestion problems happening in road intersections (i.e.: SCATS, SCOOT, WSNs) while also presenting a definition of the term “smart intersections”, using the accommodation offered by the 5G systems.

In Chapter 6 there is an extended reference to the GLOSA system, which has been “matured” greatly in the last decades and is currently being under experimental usage. In addition, GLOSA can be supported by all new types of vehicles. The same chapter also presents an evaluation of the GLOSA system made in the context of the EU-funded 5G-DRIVE project, along with the main performance indicators used in this evaluation.

In Chapter 7 an extended approach is being made to the practical usage of “smart intersections” in a real-life scenario while also presenting an algorithm to solve any conflict between the users of the junction (vehicles, bicycles, pedestrians).

Chapter 8 serves as overview of the work, together with several conclusions regarding applicability and opportunities for growth.

In Annex A there is a reference to the physical architecture of the study conducted by the 5G-DRIVE project about the GLOSA system and the “smart intersections” as well as a reference to trials which were carried out in the EU and China to determine the functions and problems of such systems.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>23</b>
1.1. Πέμπτη Γενιά Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων - 5G	23
1.2. Οι Προκλήσεις του 5G	28
1.2.1. Multi-Access Edge Computing (MEC)	29
1.2.2. Network Function Virtualisation (NFV)	30
1.2.3. Software Defined Network (SDN)	30
1.2.4. Network and Service Management (NSM)	31
1.3. Γενικοί Στόχοι του 5G	32
1.3.1. Βελτιωμένη Ευρυζωνική Κινητή Πρόσβαση (eMBB)	33
1.3.2. Εξαιρετικά Αξιόπιστες και Χαμηλής Καθυστέρησης Επικοινωνίες (URLLC)	34
1.3.3. Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής (mMTC)	35
1.4. Το πρόγραμμα 5G-DRIVE στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Κίνα	36
1.5. Η Επόμενη Γενιά Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων - 6G	37
1.5.1. Περιπτώσεις Χρήσης	39
1.5.1.1. Τηλεπαρουσία και Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality)	41
1.5.1.2. Industry 4.0 και Ψηφιακό Δίδυμο	42
<b>2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2030</b>	<b>45</b>
2.1. Επικοινωνίες V2X, C-V2X και IoV	46
2.2. Περιπτώσεις χρήσης	48
2.3. Αστικά Συστήματα Μεταφορών	50
<b>3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>52</b>
3.1. Κατηγορίες Οχημάτων	52
3.1.1. Συνδεδεμένα Οχήματα (Connected Vehicles - CVs)	52
3.1.2. Αυτόνομα Οχήματα (Automated Vehicles - AVs)	52
3.1.3. Διασυνδεδεμένα Αυτόνομα Οχήματα (Connected Autonomous Vehicles - CAVs)	56
3.1.4. Παρακολούθηση Διασταυρώσεων και Χρήση V2I	56
3.1.5. Πρόσθετες Απαιτήσεις Ασφάλειας των CAVs	57
3.2. Επίπεδα Αυτοματοποιημένης Κινητικότητας στην Ε.Ε.	58
<b>4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ &amp; ΕΞΥΠΝΟΙ ΔΡΟΜΟΙ</b>	<b>61</b>
4.1. Εισαγωγή	61
4.2. Δρόμοι που Συσσωρεύουν Ενέργεια	62
4.3. Δρόμοι που Παράγουν Μουσική - Μουσικοί Δρόμοι	64
4.4. Δρόμοι που Ζυγίζουν Αυτόματα τα Αυτοκίνητα/Φορτηγά	68
4.5. Δρόμοι που Φορτίζουν τα Ηλεκτρικά Οχήματα	71
4.6. Δρόμοι με Έξυπνη Οδική Σήμανση	73
4.7. Δρόμοι με Έξυπνο Εντοπισμό Παραβάσεων Κυκλοφορίας	74
4.8. Δρόμοι με Έξυπνο Φωτισμό	75
4.9. Δρόμοι με άλλα έξυπνα χαρακτηριστικά	76
<b>5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΥΦΥΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ</b>	<b>78</b>
5.1. Ιστορική Αναδρομή	78
5.1.1. SCATS	78
5.1.2. SCOOT	79
5.1.3. Wireless Sensor Networks - WSNs	79

5.2.	<i>Η Έξυπνη Διασταύρωση στην Εποχή του 5G</i> .....	80
5.2.1.	Χρήση ΕοΤ και Blockchain .....	80
5.2.2.	Ομάδα Αυτοκινήτων .....	82
5.2.3.	Διασταύρωση Ομάδων-Διμοιριών οχημάτων .....	83
<b>6.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύστημα GLOSA</b> .....	<b>86</b>
6.1.	<i>Περιγραφή του Συστήματος</i> .....	86
6.2.	<i>Η Εφαρμογή GLOSA στο Ερευνητικό Πρόγραμμα 5G-DRIVE</i> .....	105
6.3.	<i>Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs)</i> .....	111
<b>7.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΥΠΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ</b> .....	<b>115</b>
7.1.	<i>Περιγραφή του Συστήματος</i> .....	115
7.1.1.	Φάση της Φωτεινής Σηματοδότησης.....	119
7.1.2.	Τυφλές Ζώνες .....	120
7.1.3.	Παράνομη Κίνηση .....	121
7.1.4.	Περιπτώσεις Διλήμματος.....	121
7.1.5.	Σύστημα Intersection Collision Warning (ICW) .....	122
7.2.	<i>Σχεδίαση Έξυπνης Διασταύρωσης με την Προσέγγιση των Τεσσάρων (4) Βημάτων</i> .....	125
7.2.1.	Παράδειγμα Σχεδίασης Έξυπνης Διασταύρωσης .....	126
7.2.1.1.	Κωδικοποίηση Φάσεων.....	126
7.2.1.2.	Βήμα 1: Κατασκευή Οδεύσεων .....	128
7.2.1.3.	Βήμα 2: Προσδιορισμός Ζωνών διένευξης.....	129
7.2.1.4.	Βήμα 3: Επίλυση Διενέξεων .....	130
7.2.1.4.1.	Βήμα 3.1: Χρήση Φωτεινού Σηματοδότη .....	130
7.2.1.4.2.	Βήμα 3.2: Χρήση της Εικόνας της Διασταύρωσης.....	131
7.2.1.4.3.	Βήμα 3.3: Χρήση Σήματος SPaT.....	132
7.2.1.5.	Βήμα 4: Εντοπισμός Εμποδίων στις Τυφλές Ζώνες .....	133
7.2.2.	Παράδειγμα Σχεδίασης Έξυπνης Διασταύρωσης .....	133
7.2.3.	Ανάλυση Πραγματικού Ατυχήματος.....	135
7.2.4.	Πρόληψη του Ατυχήματος.....	136
7.3.	<i>Προστατευμένη Διασταύρωση Ποδηλάτων</i> .....	138
7.4.	<i>Συνοπτικά Χαρακτηριστικά της Έξυπνης Διασταύρωσης</i> .....	140
<b>8.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ &amp; ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>142</b>
<b>9.</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Η ΕΥΦΥΗΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΣΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ 5G-DRIVE</b> .....	<b>145</b>
A.1.	<i>Βασικοί Δείκτες Απόδοσης - KPIs</i> .....	146
A.2.	<i>Κοινοί Βασικοί Δείκτες Απόδοσης</i> .....	148
A.3.	<i>Αρχιτεκτονική των Περιπτώσεων Χρήσης</i> .....	149
A.3.1.	Η Φυσική Αρχιτεκτονική για την Περίπτωση Χρήσης GLOSA .....	149
A.3.2.	Η Φυσική Αρχιτεκτονική για την Περίπτωση Χρήσης της Έξυπνης Διασταύρωσης .....	150
A.3.3.	Κοινή Αρχιτεκτονική για τις Περιπτώσεις Χρήσης GLOSA και Έξυπνης Διασταύρωσης .....	153
<b>10.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>157</b>

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:	Απαιτήσεις καθυστέρησης υπηρεσιών σε σχέση με το εύρος ζώνης στο 5G [14]	31
Εικόνα 2 :	Σενάρια χρήσης IMT 2020 και μετά [Πηγή: Σύσταση ITU-R M.2083-0]	32
Εικόνα 3:	Ομαδοποιημένες περιπτώσεις χρήσης 5G σύμφωνα με το 5G Americas	40
Εικόνα 4:	Βιομηχανικές επαναστάσεις κατά σειρά [7]	43
Εικόνα 5:	Πρωτόκολλα επικοινωνίας των Διασυνδεδεμένων Αυτόνομων Οχημάτων (CAVs) [21]	48
Εικόνα 6:	Γραφική Αναπαράσταση του πεδίου κάλυψης των αισθητήρων ενός AV	53
Εικόνα 7:	Τυπικοί αισθητήρες ενός AV	54
Εικόνα 8:	Ατομικοί και εκτεταμένοι (διασυνδεδεμένοι) αισθητήρες	55
Εικόνα 9:	Γραφική αναπαράσταση περίπτωσης συνεργατικής αντίληψης	55
Εικόνα 10:	Συνεργατική οδήγηση	56
Εικόνα 11:	Διαλειτουργικότητα συστημάτων V2X και αισθητήρων σε μια έξυπνη διασταύρωση	57
Εικόνα 12:	Επίπεδα αυτοματισμού (πηγή: Society of Automotive Engineers - SAE)	60
Εικόνα 13:	Φωτοβολταϊκά πάνελς για τοποθέτηση στην επιφάνεια των δρόμων	63
Εικόνα 14:	Λειτουργία πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου	64
Εικόνα 15:	Μουσικός Δρόμος	65
Εικόνα 16:	Μουσικός δρόμος με αυλακώσεις	66
Εικόνα 17:	Διάφορα ανυψωμένα σημάδια	66
Εικόνα 18:	Υπολογισμός διαστημάτων	67
Εικόνα 19:	Μουσικός δρόμος με υπερυψωμένες περιοδικές δομές	67
Εικόνα 20:	Μουσικές διαγραμμίσεις δρόμων και θέσεις τοποθέτησης [41]	68
Εικόνα 21:	Πιστοποιημένη πλατφόρμα ζύγισης [36]	69
Εικόνα 22:	Μέτρηση βάρους εν κινήσει [36]	70
Εικόνα 23:	Ενδεικτική οθόνη συστήματος V-WIM	71
Εικόνα 24:	Σύστημα φόρτισης εν κινήσει στην Στοκχόλμη [44]	72
Εικόνα 25:	Χρήση λωρίδας για επαγωγική φόρτιση [46]	73
Εικόνα 26:	Έξυπνη οδική σήμανση [36], [47]	74
Εικόνα 27:	Χρήση της έξυπνης σήμανσης για τον εντοπισμό παραβάσεων [36], [47]	74
Εικόνα 28:	Σύστημα έξυπνου φωτισμού δρόμου [52]	75
Εικόνα 29:	Σύστημα AIM βασιζόμενο σε Blockchain [29]	82
Εικόνα 30:	Αναπαράσταση επικοινωνίας V2V σε κίνηση κατά ομάδες CACC [71]	83
Εικόνα 31:	Μοντέλα διασταύρωσης ομάδων οχημάτων [72]	85
Εικόνα 32:	Επεξήγηση συμβόλων εφαρμογής GLOSA [73]	89
Εικόνα 33 :	Ενδεικτικές οθόνες εφαρμογής GLOSA [73]	89
Εικόνα 34:	Πραγματικά σενάρια και εξομοιώσεις GLOSA από την Valeo	94
Εικόνα 35:	Αποτελέσματα σε απλό σενάριο με κίνηση	94
Εικόνα 36:	Εννοιολογική προσέγγιση της περίπτωσης χρήσης GLOSA [2]	95
Εικόνα 37:	Εφαρμογή GLOSA της εταιρίας NeoGLS	97
Εικόνα 38:	Χάρτης κάλυψης GLOSA της περιοχής του Bordeaux	97
Εικόνα 39:	Υλοποίηση του GLOSA UI από την Audi	102
Εικόνα 40:	Προσέγγιση ενός τμήματος [82]	104
Εικόνα 41:	Προσέγγιση πολλαπλών τμημάτων [82]	104
Εικόνα 42:	Επίδειξη LTE-V2X GLOSA από China Mobile, Huawei και ASTRI	110
Εικόνα 43:	Τοποθεσία του RSU που παρέχει την υπηρεσία GLOSA στο test-bed της JRC στην Ispra	112
Εικόνα 44:	ITS-G5 RSU που αναπτύσσεται στο Test-bed της JRC στην Ispra [92]	112
Εικόνα 45:	Αρχιτεκτονική GLOSA στο πλαίσιο δοκιμών επιδόσεων του ερευνητικού προγράμματος 5G-DRIVE	114
Εικόνα 46:	Περιπτώσεις διλήμματος [96]	121
Εικόνα 47:	Intersection Collision Warning (ICW) System	123
Εικόνα 48:	Επίλυση προβλήματος αποφυγής σύγκρουσης	124
Εικόνα 49:	Διάγραμμα επίλυσης (Τμήμα χάρτη όπου εμφανίζεται η απαγορευτική περιοχή) [97]	125
Εικόνα 50:	Ανίχνευση παραβίασης ερυθρού σηματοδότη [100]	126
Εικόνα 51:	Κωδικοποίηση φάσεων μιας τυπικής διασταύρωσης [98]	127
Εικόνα 52:	Υπολογισμός οδεύσεων [98]	128
Εικόνα 53:	Υπολογισμός ζωνών διένεξης [98]	129



Εικόνα 54: Απεικόνιση χρηστών της διασταύρωσης και επικείμενων κινήσεων [98] .....	131
Εικόνα 55: Επίλυση διενέξεων με τη χρήση του σήματος SPaT [98] .....	132
Εικόνα 56: Υπολογισμός κεντρικών γραμμών οδεύσεων [98] .....	134
Εικόνα 57: Υπολογισμός οδεύσεων με διαπλάτυνση των κεντρικών γραμμών [98] .....	134
Εικόνα 58: Καταγραφή του ατυχήματος από την τροχαία. ....	135
Εικόνα 59: Πρόληψη του ατυχήματος από μία έξυπνη διασταύρωση [98] .....	136
Εικόνα 60: Αναπαράσταση προστατευμένης διασταύρωσης ποδηλάτων [103] .....	139
Εικόνα 61: Το όχημα εκτελεί δεξιά στροφή ενώ ένας πεζός διασχίζει την διάβαση [2] .....	145
Εικόνα 62: Προτεινόμενη φυσική αρχιτεκτονική για το σύστημα GLOSA, στο πλαίσιο του προγράμματος 5G-DRIVE [2] .....	150
Εικόνα 63: Λειτουργική Απεικόνιση για την Έξυπνη Διασταύρωση στο πρόγραμμα 5G-DRIVE [2] .....	151
Εικόνα 64: Κοινή Αρχιτεκτονική των περιπτώσεων χρήσης GLOSA και Έξυπνης Διασταύρωσης [2] .....	154

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

3D	Three Dimensional
3G	Third Generation of Mobile Communications
3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP	The Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation of Mobile Communications
5G	Fifth Generation of Mobile Communications
5GAA	5G Automotive Association
5G-DRIVE	Harmonised Research and Trials for Service Evolution Between EU and China
5G-PPP	5G Public Private Partnership
6G	Sixth Generation of Mobile Communications
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver - Assistance System
AHS	Automated Highway System
AI	Artificial Intelligence
AIM	Autonomous Intersection Management
ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ARIB	Association of Radio Industries & Business
ASTM	American Society for Testing and Material
ATIS	Automatic Transmitter Identification System
AV	Autonomous Vehicle
BCI	Brain Computer Interaction
BS	Base Station
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control

Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

CACS	Capital Area Community Services
CAM	Cooperative Awareness Message
CAPEX	Capital Expenditures
CAV	Connected and Automated Vehicle
CCSA	China Communications Standards Association
CDN	Content Delivery Network
CI	Cooperative Intersection
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
COST323	European Specification On Weigh-In-Motion Of Road Vehicles
CoT	Cloud-of-Things
CPE	Customer Premises Equipment
CPM	Collective Perception Message
CPS	Complete Professional Systems
CV	Connected Vehicle
C-V2X	Cellular Vehicular-to-Everything
DA	Driver Agent
DC	Data Center
DENM	Decentralized Environment Notification Message
DL	Deep Learning
DSRC	Dedicated Short-Range Communication
E2E	End-to-End
ECU	Electronic Control Unit
eMBB	enhanced Mobile Broadband
ENISA	European Union Agency for Cybersecurity
EoT	Edge-of-Things
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	European Union
EV	Electrical Vehicle

Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

FL	Fuzzy Logic
FSM	Finite State Machine
GIS	Geographic Information System
GLOSA	Green Light Optimised Speed Advisory
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSMA	Global System for Mobile Communications Association
GVW	Gross Vehicle Weight
HD	High Definition
HDV	Heavy-Duty Vehicle
HMI	Human-Machine Interface
HS-WIM	High Speed Weight In Motion
http, HTTP	Hyper Text Transfer Protocol
https, HTTPS	Hyper Text Transfer Protocol Secure
I2P	Infrastructure to Pedestrian
I2V	Infrastructure to Vehicle
ICA	International Compliance Association
ICW	Intersection Collision Warning
ID, id	identifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IET	Institution of Engineering and Technology
IMA	Intersection Manager Agent
IMT	International Mobile Telecommunications
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
IoV	Internet of Vehicles

Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

ITS	Intelligent Transport Systems
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunications Sector
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication
KPI	Key Performance Indicator
LIDAR	Light Detection and Ranging
LTE	Long Term Evolution
LTE-V2X	Long Term Evolution - Vehicle-to-Everything
LTOR	Left Turn On Red
M2M	Machine-to-Machine
MA-AIM	Multi-Agent Autonomous Intersection Management
MAP	Mobile Application Part
MBB	Mobile Broadband
MCS	Manoeuver Coordination Service
MEC	Mobile Edge Computing
MEC	Multi-Access Edge Computing
ML	Machine Learning
mMTC	massive Machine Type Communications
mmWave	millimeter wave
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MR	Mixed Reality
MSC	Massive Scale Communications
NFV	Network Function Virtualization
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NR	New Radio
NSM	Network and Service Management
OBD	On-Board Diagnostic

Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

OBU	On-Board Unit
OPEX	Operating Expenses
PER	Packet Error Rate
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RADAR	Radio Detection and Ranging
RF	Radio-Frequency
RFID	Radio-Frequency Identification
RSU	Road Side Unit
RT	Real Time
RTOG	Right Turn On Green
RTOR	Right Turn On Red
SAE	Society of Automotive Engineers International
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
SDN	Software Define Network
SPAT	Signal Phase and Timing
SUMO	Simulator of Urban Mobility
TC ITS	Technical Committee Intelligent Transport Systems
THz	TeraHertz
TraCI	Traffic Control Interface
TSDSI	Telecommunications Standards Development Society of India
TTA	Telecommunication Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee
TTG	Time-To-Green
UE	User Equipment
UHD	Ultra-High Definition
UHDTV	Ultra-High Definition Television

Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

UI	User Interface
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
V2D	Vehicle-to-Device
V2G	Vehicle-to-Grid
V2H	Vehicle-to-Home
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2N	Vehicle-to-Network
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VANET	Vehicular ad hoc networks
VLC	Visible Light Communication
VNF	Virtual Network Function
VoD	Video-on-Demand
VPN	Virtual Private Network
VR	Virtual Reality
VRU	Vulnerable Road User
VTT	Technical Research Centre of Finland Ltd
V-WIM	Virtual Weight In Motion
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WIM	Weight-In-Motion
WLAN	Wireless Local Area Network
WSMP	Watson Sparse Matrix Package
WSN	Wireless Sensor Network
WWW, www	World Wide Web
XR	Extended Reality

## 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Πέμπτη Γενιά Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων - 5G

Με τον όρο 5G αναφέρεται η πέμπτη γενιά των δικτύων των κινητών επικοινωνιών. Είναι ένα παγκόσμιο πρότυπο για την ασύρματη δικτύωση. Το 5G είναι ένα είδος δικτύου σχεδιασμένου ώστε να διασυνδέει πρακτικά οποιονδήποτε και οτιδήποτε, συμπεριλαμβανομένων μηχανών, αντικειμένων και συσκευών<sup>1</sup>.

Τις τελευταίες δεκαετίες η αλματώδης ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών οδηγεί τις κοινωνικές και οικονομικές εξελίξεις και φαίνεται ότι έχει συμβάλλει καταλυτικά στην ευρύτερη ανάπτυξη, σε παγκόσμια κλίμακα. Στο μέλλον η τάση αυτή φαίνεται να ενισχύεται και η σύνδεση των κινητών επικοινωνιών, των τεχνολογιών πληροφορικής και των αναπτυξιακών δράσεων να γίνεται ολοένα ευρύτερη και συνθετότερη.

Η ασύρματη τεχνολογία 5G<sup>2</sup> σε σχέση με τις προηγούμενες προορίζεται να προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων (πολύ περισσότερα Gbps)<sup>3</sup>, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, μεγαλύτερη αξιοπιστία, τεράστια χωρητικότητα δικτύου, αυξημένη διαθεσιμότητα και πιο ομοιόμορφη εμπειρία χρήστη. Η υψηλότερη δικτυακή απόδοση συνεπάγεται νέες και συναρπαστικές εμπειρίες των χρηστών και διασύνδεση πολλών νέων κλάδων και τομέων της αγοράς [1].

Οι απαιτήσεις των χρηστών και των εφαρμογών βαίνουν διαρκώς αυξανόμενες. Αυτή η έντονη αυξητική τάση σε συνδυασμό με τον τεράστιο όγκο των παραγόμενων πληροφοριών σε διάφορες μορφές (κείμενο, ήχος, εικόνα, βίντεο, κτλ.), με την πολυτυπία των διατιθέμενων συσκευών, την πληθώρα των προσφερόμενων υπηρεσιών και την παράλληλη μείωση του κόστους λόγω του ανταγωνισμού, θέτουν απαιτήσεις για ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, οι κινητές συσκευές οι οποίες ήδη παίζουν μεγάλο ρόλο στην καθημερινότητά μας θα υποστηρίζουν εφαρμογές οι οποίες απαιτούν πάρα πολύ υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, ακόμη μεγαλύτερο αριθμό (δια-)συνδεδεμένων συσκευών, πολύ χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και πολύ υψηλή αξιοπιστία. Οι συσκευές τελικού χρήστη<sup>4</sup> με βελτιωμένες δυνατότητες παρουσίασης πολυμέσων<sup>5</sup>, όπως οθόνη υπερ-υψηλής ευκρίνειας (Ultra-High Definition - UHD), 3D προβολή, πολυ-τηλεδιασκέψεις και

---

<sup>1</sup> Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2021): What Is 5G? In *5G NR*. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822320-8.00001-5>

<sup>2</sup> Qualcomm: What is 5G? Available at: <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>

<sup>3</sup> Hoffman, C. (2020, January): What Is 5G, and How Fast Will It Be? *How-To Geek*. Available at: <https://www.howtogeek.com/340002/what-is-5g-and-how-fast-will-it-be/>

<sup>4</sup> Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Vasilaki, E., et al. (2021): 5G-DRIVE Program, Deliverable 2.3: "Final Report of Architecture and Use Case Implementation". Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>5</sup> Nightingale, J., Salva-Garcia, P., Calero, J.M.A., & Wang, Q. (2018, June): 5G-QoE: QoE modelling for ultra-HD video streaming in 5G networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol.64, no.2, pp.621-634. <https://doi.org/10.1109/TBC.2018.2816786>



επαυξημένη πραγματικότητα (AR)<sup>6</sup> απαιτούν όλο και μεγαλύτερη ποσότητα μεταφοράς δεδομένων [2].

Ο φορέας που έχει επικρατήσει για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών προτύπων κινητών επικοινωνιών είναι το 3GPP<sup>7</sup>. Ο φορέας αυτός ιδρύθηκε το 1998 ενόψει της ανάπτυξης του 3G και είναι φορέας-«ομπρέλα» άλλων 7 οργανισμών προτύπων (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC) [3]. Το 3GPP τελικά καθιερώθηκε<sup>8</sup> και για τα επόμενα πρότυπα δηλαδή το LTE (και τα σχετικά 4G) και τώρα<sup>9</sup> του 5G και των σχετικών με αυτό [4].

Η διασυνδεδεμένη κοινωνία για τα επόμενα χρόνια συνεπάγεται την παροχή συγκρίσιμης εμπειρίας των τελικών χρηστών ανεξάρτητα από το εάν αυτοί κινούνται ή όχι. Η διατήρηση ενός καλού επιπέδου ποιότητας επικοινωνίας σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας θα επιτρέψει την ανάπτυξη εφαρμογών για χρήστες που βρίσκονται σε αυτοκίνητα ή τρένα και κινούνται με μεγάλη ταχύτητα.

Μέσα στα επόμενα χρόνια αναμένεται επίσης ότι η υποκείμενη (συνήθως ετερογενής) υποδομή δικτύου θα είναι σε θέση να «(δια-)συνδέει τα πάντα» σύμφωνα με μια εκτεταμένη πληθώρα απαιτήσεων για συγκεκριμένες εφαρμογές (συμπεριλαμβανομένων των χρηστών, των αντικειμένων, των υπολογιστικών κέντρων, του περιεχομένου, της γνώσης, των πληροφοριών και των διαδικασιών), με ευέλικτο τρόπο.

Ζώντας μέσα σε ένα περιβάλλον πλήρους σύγκλισης, ο αριθμός των έξυπνων τερματικών, των μηχανών, των «αντικειμένων-πραγμάτων»<sup>10</sup> (συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων (sensors) και των ενεργοποιητών (enablers)) που (δια-)συνδέονται με τα υφιστάμενα δίκτυα αυξάνεται εκθετικά και σύντομα θα είναι δυνατή η (δια-)σύνδεση και η λειτουργία μιας τεράστιας ποικιλίας νέων μορφών εξοπλισμού (π.χ. έξυπνα οικιακά gadgets, οχήματα, drones ακόμα και ρομπότ).

Η ανάπτυξη του 5G συμπαρασύρει και πολλούς άλλους τομείς ώστε να παρέχουν το απαραίτητο επίπεδο για τη διάθεση και την αξιοποίησή του. Τούτο οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές όχι μόνο σε τεχνολογικά ζητήματα αλλά και σε επιχειρηματικά, οικονομικά και κοινωνικά πεδία αναφοράς.

Το 5G δεν νοείται ως μια απλή εξέλιξη επόμενης γενιάς των ευρυζωνικών δικτύων και της κινητής τηλεφωνίας αλλά θα επιφέρει νέες και πλήρως επαναστατικές δυνατότητες

---

<sup>6</sup> Kim, J.-H., & Kim, J. (2020, December): A Study on 5G-based AR/VR Technology. *Journal of Digital Art Engineering and Multimedia*, vol.7, no.4, pp.383-394. <https://doi.org/10.29056/jdaem.2020.12.08>

<sup>7</sup> The Third Generation Partnership Project (3GPP). <https://www.3gpp.org/about-3gpp>

<sup>8</sup> Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M., & Chandramouli, D. (2019): 5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology beyond 3GPP Release 15. *IEEE Access*, vol.7, pp.127639-127651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938>

<sup>9</sup> Goss, M.: An overview of 3GPP 5G releases and what each one means (2021, February): Techtarget Network. Available at: <https://www.techtargget.com/searchnetworking/feature/An-overview-of-3GPP-5G-releases-and-what-each-one-means>

<sup>10</sup> Shafique, K., Khawaja, B.A., Sabir, F., Qazi, S., & Mustaqim, M. (2020): Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios. *IEEE Access* vol.8, pp.23022-23040. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970118>

δικτύου και υπηρεσιών, δημιουργώντας μια βιώσιμη και κλιμακούμενη τεχνολογία, αλλά και ένα κατάλληλο οικοσύστημα για τεχνική και επιχειρηματική καινοτομία.

Παράλληλα, το 5G αντιπροσωπεύει μια σημαντική αλλαγή για τη βιομηχανία όπου η κινητικότητα και η χρήση υπολογιστικών συστημάτων «συγκλίνουν» και ενίοτε καθίστανται δυσδιάκριτες. Τα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να μετασχηματιστούν και να αναδιαμορφωθούν για να καταστούν ισχυρότερα, περισσότερο ευέλικτα και ευφύστερα, ώστε να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και για να επιτρέψουν νέες και ακόμα περισσότερο βελτιωμένες εμπειρίες σε όλο το φάσμα δράσεων της καθημερινής ζωής<sup>11</sup>.

Έτσι, το 5G περιλαμβάνει πολλαπλές ανάγκες εφαρμογής με διαφορετικές απαιτήσεις από άκρο σε άκρο (End-to-End - E2E) (δηλαδή καθυστέρηση, απόδοση, ασφάλεια, κινητικότητα, κ.α.). Για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους δεν είναι πρακτικό το να υπάρχουν ξεχωριστά δίκτυα για την κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων QoS, επομένως τα δίκτυα 5G πρέπει να είναι ευέλικτα, κλιμακούμενα και αξιόπιστα.

Οι βασικές απαιτήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω προϋποθέτουν πρόοδο και εξέλιξη οι οποίες σαφώς υπερβαίνουν τις τρέχουσες δυνατότητες του δικτύου 4G/LTE ως προς τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Ταχύτητα:** Επί του παρόντος, οι ρυθμοί δεδομένων του 4G για κάθε χρήστη είναι περίπου 500 Mbps<sup>12</sup>, το οποίο υποστηρίζει κατά μέσο όρο μέγιστο ρυθμό δεδομένων 50 Mbps ανά χρήστη. Στο 5G αντίστοιχα ο ρυθμός θα φτάνει στο 1 Gbps και σε κάποιες περιπτώσεις τα 4 Gb/s [5].
- **Ευελιξία στην ικανοποίηση απαιτητικών εφαρμογών επαγγελματικού επιπέδου:** Στο βασικό δίκτυο 4G δεν εφαρμόζονται σε ευρεία κλίμακα αρχιτεκτονικές και δυνατότητες SDN/NFV. Αυτό δεν επιτρέπει την ευελιξία αναφορικά με την κατανομή των πόρων, που απαιτείται σε σενάρια στα οποία η πρόσβαση στο ασύρματο δίκτυο πρέπει να εξυπηρετεί εφαρμογές με πολύ διαφορετικές απαιτήσεις (π.χ. συνδεδεμένοι χρήστες οχημάτων με πολύ χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης ή χρήστες ροής βίντεο με πολύ υψηλές απαιτήσεις ταχύτητας κατερχόμενης ζεύξης (downlink)). Η έλλειψη ανοιχτών διεπαφών (interfaces) δύναται να αποτρέπει την εμφάνιση καινοτόμων υπηρεσιών σε νέους τομείς.
- **Χρόνος άμεσης απόκρισης:** Οι βασικές απαιτήσεις εφαρμογής του 5G, όπως χαμηλή καθυστέρηση 1 ms (10 έως 20 ms στο 4G), εξυπηρέτηση 1 εκατομμυρίου συσκευών/km<sup>2</sup> (περίπου 1000 συσκευές/km<sup>2</sup> στο 4G) ή γρήγορη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών της τάξης της 1 ώρας (αντί για ημέρες με την τρέχουσα τεχνολογία) ξεπερνούν κατά πολύ την σημερινή τεχνολογία 4G.

---

<sup>11</sup> Chettri, L., & Bera, R. (2020, January): A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. *IEEE Internet of Things Journal* vol.7, issue 1, pp.16-32. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2019.2948888>

<sup>12</sup> Wikipedia: 5G. <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>

Μερικές από τις απαιτήσεις του 5G, όπως τίθενται<sup>13</sup> από το 5G-PPP<sup>14</sup> είναι ως εξής [6]:

- Η παροχή 1000 φορές μεγαλύτερης χωρητικότητας στις ασύρματες ζεύξεις και μεγαλύτερη ποικιλία εξυπηρέτησης, σε σύγκριση με τα δεδομένα που έχουν αποτυπωθεί για το έτος 2010.
- Η εξοικονόμηση έως και 90% της ενέργειας ανά παρεχόμενη υπηρεσία. Αυτό κυρίως αφορά στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας όπου υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης.
- Η μείωση του μέσου χρόνου δημιουργίας μιας υπηρεσίας από τις 90 ώρες στα 90 λεπτά.
- Η δημιουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου διαδικτύου με μηδενικό χρόνο «εκτός λειτουργίας».
- Η δημιουργία πολύ πυκνών ασύρματων ζεύξεων ώστε να διασυνδέονται 7 τρισεκατομμύρια συσκευές που τελικά θα είναι σε θέση ώστε να εξυπηρετούν πάνω από 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους.
- Η πρόσβαση «παντού και για όλους» σε υπηρεσίες και εφαρμογές με μικρότερο κόστος.

Κάθε γενιά τηλεπικοινωνιακών συστημάτων προορίζεται για να καλύψει τις απαιτήσεις τουλάχιστον μιας δεκαετίας, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα, ιδίως στην αρχή της δεκαετίας, για αναλυτική πρόβλεψη όλων των μελλοντικών χρήσεων και των συναφών αναγκών. Επομένως, η αξιοπιστία, η ευελιξία και η επεκτασιμότητα είναι κρίσιμα σημεία για να διασφαλίζεται η κάλυψη μελλοντικών αναγκών, χωρίς να αυξάνεται η πολυπλοκότητα της δικτυακής διαχείρισης.

Το 5G είναι ήδη μια εμπορική πραγματικότητα με τουλάχιστον 184 δίκτυα ανεπτυγμένα παγκοσμίως [7]. Συνιστά μοχλό ανάπτυξης και κινητήρια δύναμη που ωθεί την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση. Οι τεχνολογίες 5G είναι ένας σημαντικός παράγοντας για μια ιλιγγιώδη σειρά πρωτοποριακών ψηφιακών υπηρεσιών και αλλαγών που θα σαρώνουν τον κόσμο κατά την τρέχουσα δεκαετία. Η μετάβαση στο 5G μεταμορφώνει τη ζωή μας, την οικονομία μας, τις δουλειές μας και τις βιομηχανίες μας, όπως αποδεικνύεται καθημερινά<sup>15</sup>.

Για παράδειγμα, wearables<sup>16</sup> όπως κυψελοειδή έξυπνα ρολόγια ή συνδεδεμένα γυαλιά, εξελίσσονται σε αυτόνομες φορητές υπολογιστικές συσκευές. Τα αυτόνομα οχήματα, μια από τις πιο πολυαναμενόμενες εφαρμογές του 5G, αναμένεται να βοηθήσει για την ουσιαστική μείωση του χρόνου των μετακινήσεών μας σε αστικά ή άλλα περιβάλλοντα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Η συνδεσιμότητα Cellular

---

<sup>13</sup> 5G Public Private Partnership (5G-PPP) (2021, October): 5G-PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture. Version 4. Available at: <https://5g-ppp.eu/white-papers/>.

<sup>14</sup> 5G-PPP 5G-MOBIX ("Driving forward Connected & Automated Mobility") Project, Grant Agreement No.8245496. Available at: <https://5g-ppp.eu/>

<sup>15</sup> 5G Americas (2021, November): Mobile Communications Towards 2030. Available at: <https://www.5gamericas.org/mobile-communications-towards-2030/>

<sup>16</sup> Aun, N.F.M., Soh, P.J., Al-Hadi, A.A., Jamlos, M.F., Vandenbosch, G.A.E., & Schreurs, D.S. (2017, May): Revolutionizing Wearables for 5G: 5G Technologies: Recent Developments and Future Perspectives for Wearable Devices and Antennas. *IEEE Microwave Magazine*, vol.18, no.3, pp.108-124. <https://doi.org/10.1109/MMM.2017.2664019>

Vehicular-to-Everything (C-V2X) αναμένεται να συμβάλει στην ενίσχυση της οδικής ασφάλειας όπως επίσης και να αυξήσει την αποδοτικότητα των οδικών μεταφορών.

Ταυτόχρονα η υγειονομική περίθαλψη αλλάζει, καθώς υπηρεσίες όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση και η τηλεϊατρική παρέχουν νέες ευκαιρίες για φροντίδα.

Μια επίσκεψη σε ένα αρχαιολογικό μουσείο θα μπορεί να γίνει από την άνεση του σαλονιού μας με χρήση του smartphone και κατάλληλου εξοπλισμού VR, αποφεύγοντας περιττές μετακινήσεις, ενώ αμέσως μετά μπορεί να βρεθούμε εικονικά σε ένα πάρκο δεινοσαύρων ή στον βυθό ενός ωκεανού [8].

Τα drones<sup>17</sup> θα χρησιμοποιηθούν για μεταφορές, επιτήρηση και επιχειρήσεις διάσωσης. Τα ρομπότ και η τεχνητή νοημοσύνη (AI)<sup>18</sup> θα δημιουργήσουν νέα δυναμική, τόσο για τους ανθρώπους όσο και για τις μηχανές.

Ο χρόνος ανταπόκρισης των υπηρεσιών πρώτων βοηθειών θα μειωθεί κατά πολύ αυξάνοντας έτσι την ποιότητα των υπηρεσιών δημόσιας υγείας. Προβλέπεται ακόμη η διασύνδεση συσκευών κινούμενων έως και με 500km/h<sup>19</sup>, πράγμα που σημαίνει ότι οι επιβάτες γρήγορων τρένων ή αυτοκινήτων θα μπορούν να παραμένουν διασυνδεδεμένοι ενώ κινούνται [9].

Οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής από άκρο σε άκρο (E2E) που παρέχονται από τη συνδεσιμότητα 5G θα αλλάξουν τη διαδικασία της αλυσίδας εφοδιασμού με τρόπους που δεν έχουμε δει έως τώρα. Ο αντίκτυπος του 5G αναμένεται να είναι συγκλονιστικός [2].

Μια ματιά στις προβλέψεις αναλυτών<sup>20</sup> παρέχει την εξής εικόνα ([2], [10]):

- Η κάλυψη 5G εκτιμάται ότι θα φθάσει στο 37% του παγκόσμιου πληθυσμού έως το 2025.
- Το 5G θα αντιπροσωπεύει το 29% όλων των συνδέσεων έως το 2025.
- 10,3 δισεκατομμύρια συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας προβλέπονται έως το 2025.
- 25 δισεκατομμύρια συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) θα υπάρχουν σε χρήση παγκοσμίως το 2025 (11,4 δισεκατομμύρια IoT καταναλωτών και 13,7 δισεκατομμύρια βιομηχανικά IoT).
- Το 5G θα προσθέσει 2,2 τρισεκατομμύρια δολάρια στην παγκόσμια οικονομία τα επόμενα 14 χρόνια.

---

<sup>17</sup> Muzaffar, R., Raffelsberger, C., Fakhreddine, A., Luque, J. L., Emini, D., & Bettstetter, C. (2020, June): First experiments with a 5G-Connected drone. In: *Proceedings of the 6th ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications, DroNet 2020*, pp.1-5. <https://doi.org/10.1145/3396864.3400304>

<sup>18</sup> Civerchia, F., Giannone, F., Kondepu, K., Castoldi, P., Valcarenghi, L., Bragagnini, A., Gatti, F., Napolitano, A., & Borromeo, J.C. (2020): Remote control of a robot rover combining 5G, AI, and GPU image processing at the edge. *Optics InfoBase Conference Papers, Part F174-OFC 2020*. <https://doi.org/10.1364/ofc.2020.m3z.10>

<sup>19</sup> Verizon (2021, May): 5G Applications for Network and the Future. Available at: [news/applications-use-cases](https://www.verizon.com/news/applications-use-cases)

<sup>20</sup> 5G Americas (2021, January): 3GPP Releases 16, 17 & beyond. Available at: <https://www.5gamericas.org/3gpp-releases-16-17-beyond/>

Τα μεγάλα δίκτυα δισεκατομμυρίων συνδεδεμένων πραγμάτων-αντικειμένων και ανθρώπων του μέλλοντος θα απαιτήσουν μια σημαντική αλλαγή στη λειτουργία και τη διαχείριση του δικτύου. Αυτές οι αλλαγές ενεργοποιούνται μέσω των προδιαγραφών Long-Term Evolution (LTE) και 5G, οι οποίες δημιουργήθηκαν από το Εταιρισμικό Έργο Τρίτης Γενιάς Κινητών Επικοινωνιών - Third Generation Partnership Project (3GPP). Το δίκτυο επικοινωνιών 5G καθώς και οι νέες υπηρεσίες που θα παρέχονται από αυτό θα είναι πολυπλοκότερες αλλά και πολύ πιο βελτιωμένες από τις σημερινές. Οι εμπειρίες των εμπλεκόμενων χρηστών θα είναι συναρπαστικότερες, υποστηρίζοντας όλες τις πτυχές της κοινωνικής αλληλεπίδρασης, της εργασιακής επικοινωνίας, της παρακολούθησης της υγείας, της διαχείρισης συσκευών και περιβάλλοντος, συμβάλλοντας στην ευρύτερη οικονομική ευημερία και ανάπτυξη. Βασική πρόκληση είναι το να υπάρξει μια κατάλληλη υποδομή 5G, ευρέως διαδεδομένη, η οποία θα έχει την εγγενή ικανότητα, αξιοπιστία, διαθεσιμότητα και ασφάλεια<sup>21</sup> για να παρέχει απρόσκοπτα την υποστήριξη αυτών των διαδικασιών με άμεσο, πρακτικό και αποτελεσματικό τρόπο. Αυτή η νέα δικτυακή υποδομή θα πρέπει να είναι ικανή ώστε να συνδέει άτομα, διαδικασίες, κέντρα υπολογιστών, περιεχόμενο, γνώσεις, πληροφορίες, αγαθά και άλλα πράγματα-αντικείμενα με μεγάλη ταχύτητα, σύμφωνα με τις πολλαπλές ειδικές απαιτήσεις των εκάστοτε εφαρμογών. Και ενώ ο όγκος της επικοινωνίας που εξυπηρετεί κάθε άτομο αναμένεται να αυξηθεί δραματικά, ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών που επικοινωνούν αναμένεται να είναι 10 φορές υψηλότερος από τον αριθμό των συνδεδεμένων ανθρώπινων χρηστών. Το 5G δεν θα είναι απλώς μια εξέλιξη σε επόμενη γενιά κινητών επικοινωνιών. Αντιθέτως θα πρέπει να εκληφθεί ως μια πλήρως καινοτόμος δραστηριότητα που οδηγεί σε μια μορφή επανάστασης<sup>22</sup> και κατά συνέπεια πρέπει να σχεδιαστεί καταλλήλως ώστε για να χειριστεί αυτή την προοπτική.

## 1.2. Οι Προκλήσεις του 5G

Το πρώτο ζητούμενο σχεδόν πάντα είναι η ταχύτητα. Το μείζον όραμα είναι το να ξεπεραστεί η ταχύτητα των 10 Gbps, κυρίως με χρήση του φάσματος άνω των 6 GHz. Σήμερα δεν έχει εκχωρηθεί πλήρως αυτό το φάσμα σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Οι συναφείς ζώνες συχνοτήτων είναι σε θέση ώστε να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό ταυτόχρονα συνδεδεμένων χρηστών/συσκευών και ουσιαστικά «ανοίγουν» τις προοπτικές για τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που απαιτούνται από το 5G. Βιομηχανικές δοκιμές που έχουν ήδη λάβει χώρα, έχουν επιτύχει ταχύτητες της τάξης των 70 Gbps.

---

<sup>21</sup> Ji, X., Huang, K., Jin, L., Tang, H., Liu, C., Zhong, Z., You, W., Xu, X., Zhao, H., Wu, J., & Yi, M. (2018): Overview of 5G security technology. *Science China Information Sciences*, vol.61, issue 8. <https://doi.org/10.1007/s11432-017-9426-4>

<sup>22</sup> Jabagi, N., Park, A., & Kietzmann, J. (2020): The 5G Revolution: Expectations Versus Reality. *IT Professional*, vol.22, no.6, pp.8-15. <https://doi.org/10.1109/MITP.2020.2972139>

Δύο από τις σημαντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν έντονα οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας<sup>23</sup> είναι η μείωση της χρονικής καθυστέρηση (latency) στην πρόσβαση του δικτύου καθώς επίσης και η ευελιξία στην ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στα άκρα του δικτύου ώστε να προσφέρουν καλύτερη ποιότητα εμπειρίας (QoE) [11].

Οι λύσεις που προτείνονται για τα θέματα αυτά<sup>24</sup> είναι η Υπολογιστική Πολλαπλής Πρόσβασης στα Άκρα του Δικτύου (Multi-Access Edge Computing) και η Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (Network Function Virtualization)<sup>25</sup> [12].

### 1.2.1. Multi-Access Edge Computing (MEC)

Η τεχνολογία Multi-Access Edge Computing (παλαιότερα γνωστή ως Mobile Edge Computing<sup>26</sup>) αξιοποιείται εκτενώς στο 5G. Τα συστήματα MEC «φέρνουν» την υπηρεσία κοντά στο άκρο του δικτύου, επομένως κοντά στο σημείο σύνδεσης της συσκευής. Το MEC περιέχει τις εφαρμογές και την εικονικοποιημένη υποδομή που παρέχει τις υπολογιστικές δυνατότητες, τα αποθηκευτικά μέσα και τους πόρους δικτύου, καθώς και τις λειτουργίες που χρειάζονται οι σχετικές εφαρμογές [13].

Η βασική ιδέα του MEC είναι να μεταφέρει τις υπολογιστικές δράσεις πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, όπου μικροί διακομιστές ή μικρά κέντρα δεδομένων που μπορούν να φιλοξενήσουν εφαρμογές cloud διανέμονται στο δίκτυο και συνδέονται απευθείας με «οντότητες» (όπως π.χ. με σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας) στην άκρη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το MEC αναμένεται επίσης να είναι πιο στιβαρό από τα παραδοσιακά κεντρικά συστήματα υπολογιστικού νέφους, επειδή είναι κατανεμημένο και επομένως επηρεάζεται λιγότερο από ενδεχόμενες αστοχίες σε ένα κεντρικό σημείο.

Το MEC βοηθάει στην κάλυψη των απαιτήσεων του 5G όσον αφορά στην αναμενόμενη απόδοση, στην καθυστέρηση, στην επεκτασιμότητα και στην αυτοματοποίηση<sup>27</sup>. Προσφέροντας υπολογιστικές δυνατότητες και υπηρεσίες αποθήκευσης στο άκρο του δικτύου, το MEC επιτρέπει την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (latency) και την εξοικονόμηση δικτυακών πόρων [12].

---

<sup>23</sup> Shahzadi, S., Iqbal, M., Dagiuklas, T., & Qayyum, Z. U. (2017): Multi-access edge computing: open issues, challenges and future perspectives. *Journal of Cloud Computing*, vol.6, no.1. <https://doi.org/10.1186/s13677-017-0097-9>

<sup>24</sup> Beck, M.T., & Maier, M. (2014): Mobile Edge Computing: Challenges for Future Virtual Network Embedding Algorithms. In: *Proceedings of The Eighth International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Science (ADVCOMP-2014)*, pp.65-70.

<sup>25</sup> Blanco, B., Fajardo, J.O., Giannoulakis, I., Kafetzakis, E., Peng, S., Pérez-Romero, J., Trajkovska, I., Khodashenas, P. S., Goratti, L., Paolino, M., Sfakianakis, E., Liberal, F., & Xilouris, G. (2017, November): Technology pillars in the architecture of future 5G mobile networks: NFV, MEC and SDN. *Computer Standards and Interfaces*, vol.54, no.4, pp.216-228. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.007>

<sup>26</sup> Taleb, T., Dutta, S., Ksentini, A., Iqbal, M., & Flinck, H. (2017, March): Mobile edge computing potential in making cities smarter. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.3, pp.38-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600249CM>

<sup>27</sup> Nowak, T.W., Sepczuk, M., Kotulski, Z., Niewolski, W., Artych, R., Bocianiak, K., Osko, T., & Wary, J.P. (2021): Verticals in 5G MEC-Use Cases and Security Challenges. *IEEE Access*, vol.9, pp.87251-87298 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088374>

### 1.2.2. Network Function Virtualisation (NFV)

Η εικονικοποίηση των λειτουργιών των δικτύων μέσω «ανοικτών πλατφορμών» προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα συγκριτικά με τις λύσεις υλισμικού που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι ανοικτές πλατφόρμες αποτελούνται από υλισμικό που είναι εύκολα προσβάσιμο και πάνω σε αυτές εγκαθίσταται ειδικό λογισμικό που με τη σειρά του υλοποιεί λειτουργίες εικονικού δικτύου (Virtual Network Function - VNF)<sup>28</sup>. Οι λειτουργίες δικτύου μπορούν να εκτελεστούν σε οποιοδήποτε φυσικό υλισμικό και η φυσική θέση μπορεί να αλλάξει δυναμικά, με βάση την τρέχουσα ζήτηση και επίσης την απαίτηση αποδεκτής καθυστέρησης (latency). Αυτό επιτρέπει επίσης στην υπολογιστική νέφους (cloud computing) να έχει ακόμα πιο ενεργό ρόλο στην οποία περίπτωση οι κόμβοι του δικτύου μερίζονται υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και πόρους δικτύου, με δυναμικό τρόπο και ανεξάρτητα από τη φυσική τους θέση. Η διαδικασία NFV παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης και εφαρμογής συγκεκριμένων λειτουργιών δικτύου (όπως για παράδειγμα δίκτυο παράδοσης περιεχομένου (CDN)<sup>29</sup>, διαχείριση εξοπλισμού πελατών (CPE)<sup>30</sup>, κλπ.) σε λογισμικό που λειτουργεί σε γενικού τύπου υλισμικό, χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένα πανάκριβα μηχανήματα.

Το NFV δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους των δικτύων να μερίζονται τη φυσική υποδομή (σταθμοί βάσης, δρομολογητές, εξυπηρετητές MEC) πράγμα που οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση αλλά και σε σημαντική οικονομία όχι μόνο στα αρχικό κόστος της επένδυσης αλλά και στα βασικά λειτουργικά έξοδα [12].

Το MEC και το NFV είναι δύο διαφορετικές έννοιες και μπορούν να εφαρμοστούν ανεξάρτητα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να «μοιράζονται» την ίδια υποδομή εικονικοποίησης ή μπορεί να έχουν ανεξάρτητες υποδομές ανάλογα με την επιλογή ανάπτυξης (αυτόνομη MEC ή MEC σε περιβάλλον NFV). Σε κάθε περίπτωση, από άποψη τυποποίησης, η τεχνολογία MEC επαναχρησιμοποιεί την υποδομή εικονικοποίησης NFV και τη διαχείριση υποδομής NFV στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό<sup>31</sup>.

### 1.2.3. Software Defined Network (SDN)

Το δίκτυο που καθορίζεται από το λογισμικό είναι αυτό το οποίο παρέχει τον διαχωρισμό του επιπέδου δικτύου από το επίπεδο του χρήστη. Το SDN είναι συμπληρωματικό του NFV και επιτρέπει τον έλεγχο μέρους των φυσικών ή εικονικών

---

<sup>28</sup> Sridharan, S. (2020): A Literature Review of Network Function Virtualization (NFV) in 5G Networks. *International Journal of Computer Trends & Technology*, vol.68, no.10, pp.49-55. <https://doi.org/10.14445/22312803/ijctt-v68i10p109>

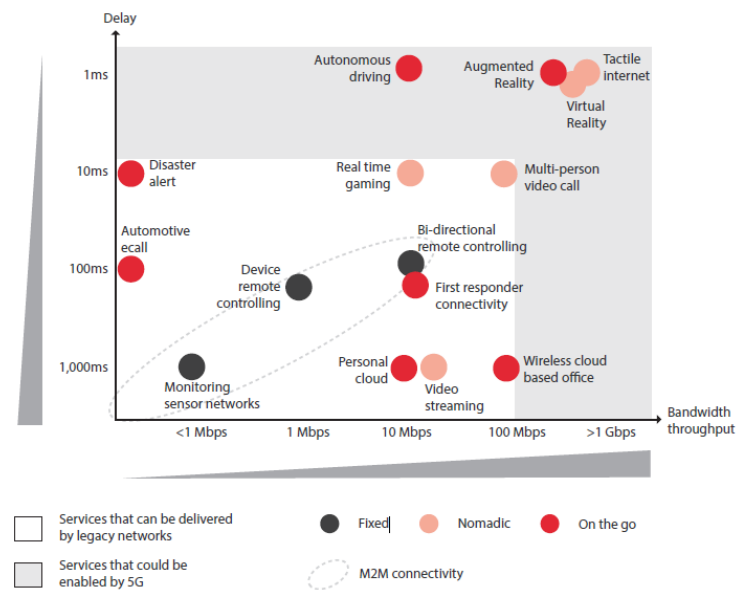
<sup>29</sup> Laliberte, B. (2018, January): The Journey to Intent-based Networking: Ten Key Principles for Accelerating Adoption. White Paper. Cisco. Available at: <https://secureagility.com/wp-content/uploads/2019/12/Cisco-ESG-Intent-based-Networking-Whitepaper.pdf>.

<sup>30</sup> Tsirakis, C., Matzoros, P., & Agapiou, G. (2017): Service oriented cloud CPE as a means of a future terminal. In: *Proceedings of the 2017 56<sup>th</sup> FITCE Congress (FITCE 2017)*, pp.40-44, doi: 10.1109/FITCE.2017.8093005.

<sup>31</sup> Wu, B., Zeng, J., Ge, L., Shao, S., Tang, Y., & Su, X. (2019, May): Resource Allocation Optimization in the NFV-Enabled MEC Network Based on Game Theory. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC-2019)*, pp.1-7, doi: 10.1109/ICC.2019.8761912.

πόρων του δικτύου από τρίτους, ανάλογα με τις ανάγκες τους. Το SDN σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως σε κέντρα δεδομένων (Data Centers - DCs) όπου διαμορφώνει και χειρίζεται κεντρικά τις φυσικές και εικονικές συσκευές, όπως δρομολογητές (routers), μεταγωγείς (switches) και πύλες (gateways) ενώ αναμένεται να χρησιμοποιηθεί ευρέως και στο 5G<sup>32</sup>. Ο συνδυασμός NFV και SDN επιτρέπει πολύ χαμηλότερα αρχικά κόστη επένδυσης (CAPEX) και εν συνεχεία λειτουργικά κόστη (OPEX)<sup>33</sup>.

Η Εικόνα 1 απεικονίζει τις απαιτήσεις καθυστέρησης υπηρεσιών-εφαρμογών σε σχέση με το εύρος ζώνης/ρυθμό δεδομένων των διαφόρων περιπτώσεων χρήσης (όπως προτείνεται από την GSMA Intelligence) που έχουν συζητηθεί στο πλαίσιο του 5G μέχρι σήμερα.



Εικόνα 1: Απαιτήσεις καθυστέρησης υπηρεσιών σε σχέση με το εύρος ζώνης στο 5G [14]

#### 1.2.4. Network and Service Management (NSM)

Το SDN και το NFV έχουν τεράστιο αντίκτυπο στις λειτουργίες του δικτύου σήμερα, στο IoT με τεράστιο αριθμό συσκευών, στη δυναμική φύση των υποκείμενων δικτύων και στις απαιτήσεις QoS, και τέλος στους τελικούς πελάτες που συνεχίζουν να αναμένουν διαρκώς βελτιωμένο επίπεδο επικοινωνίας. Για να αξιοποιήσει τα οφέλη της εικονικοποίησης και των τεχνολογιών που καθορίζονται από το λογισμικό, αυξάνοντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών του δικτύου, η βιομηχανία πρέπει

<sup>32</sup> Hicham, M., Abghour, N., & Ouzzif, M. (2018): 5G mobile networks based on SDN concepts. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, vol.7, no.4, pp.2231-2235. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.12194>

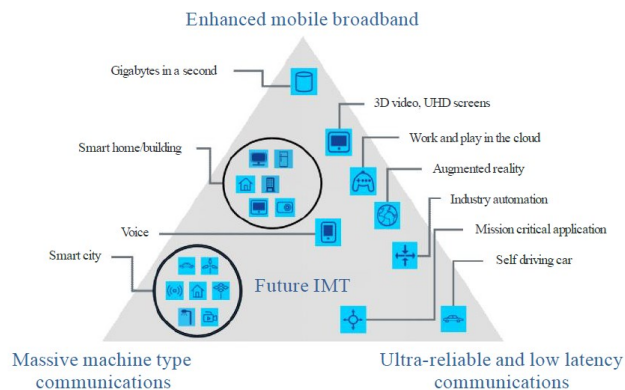
<sup>33</sup> Peng, S., Fajardo, J.O., Khodashenas, P.S., Blanco, B., Liberal, F., Ruiz, C., Turyagyenda, C., Wilson, M., & Vadgama, S. (2017): QoE-oriented mobile edge service management leveraging SDN and NFV. *Mobile Information Systems*, vol.2017, Article ID 3961689, pp.1-14. <https://doi.org/10.1155/2017/3961689>



να ενισχύσει την αυτοματοποίηση της Διαχείρισης Δικτύων και Υπηρεσιών<sup>34</sup>. Οι εξελίξεις στην υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (edge computing), τα δίκτυα χαμηλής καθυστέρησης, η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI)<sup>35</sup> και η Μηχανική Μάθηση (ML)<sup>36</sup> προσφέρουν πρόσθετα οφέλη που μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο με τον αυτοματισμό δικτύων και υπηρεσιών (Network and Service Management - NSM). Η εισαγωγή του 5G αυξάνει περαιτέρω το διακύβευμα για μια αρχιτεκτονική NSM επόμενης γενιάς<sup>37</sup>. Η εξέλιξη της τεχνολογίας δικτύου και ελέγχου θα επιτρέψει περισσότερη ευελιξία στη δημιουργία υπηρεσιών, στη χωρητικότητα και στη διαχείριση αλλαγών, καθώς και πιο αποτελεσματικές λειτουργίες δικτύου.

### 1.3. Γενικοί Στόχοι του 5G

Η σύσταση ITU-R M.2083-0 [15] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU), που εγκρίθηκε τον Σεπτέμβριο του 2015, καθορίζει τους γενικούς στόχους της μελλοντικής ανάπτυξης για τις IMT (International Mobile Telecommunications - Διεθνείς Κινητές Επικοινωνίες) για το 2020 και μετά. Βάσει αυτής, τίθενται βελτιώσεις του συστήματος 5G που καλύπτουν τρεις γενικές κατηγορίες υπηρεσιών, σύμφωνα με αναμενόμενες εξελίξεις της αγοράς. Αυτά περιγράφονται στο ευρέως γνωστό ως «τρίγωνο ITU», όπως απεικονίζεται παρακάτω:



Εικόνα 2 : Σενάρια χρήσης IMT 2020 και μετά [Πηγή: Σύσταση ITU-R M.2083-0]

<sup>34</sup> Pavlou, G., & Schonwalder, J. (2016, January): Network and Service Management [Series Editorial]. In: *IEEE Communications Magazine*, vol.54, issue 1, pp.90-90. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7378431>

<sup>35</sup> Benzaid, C., & Taleb, T. (2020, March/April): AI-Driven Zero Touch Network and Service Management in 5G and Beyond: Challenges and Research Directions. *IEEE Network*, vol.34, no.2, pp.186-194. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900252>

<sup>36</sup> Le, D. C., & Zincir-Heywood, N. (2020): A Frontier: Dependable, Reliable and Secure Machine Learning for Network/System Management. *Journal of Network and Systems Management*, vol.28, no.4, pp.827-849. <https://doi.org/10.1007/s10922-020-09512-5>

<sup>37</sup> Wang, T.H., Chen, Y.C., Huang, S.J., Hsu, K.S., & Hu, C.H. (2021). Design of a Network Management System for 5G Open RAN. In: *Proceedings of the 2021 22<sup>nd</sup> Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS 2021)*. pp.138-141. <https://doi.org/10.23919/APNOMS52696.2021.9562627>

Τα σενάρια χρήσης IMT για το 2020<sup>38</sup> και μετά περιλαμβάνουν<sup>39</sup>:

### 1.3.1. Βελτιωμένη Ευρυζωνική Κινητή Πρόσβαση (eMBB)

Η κινητή ευρυζωνική πρόσβαση (Mobile Broadband - MBB)<sup>40</sup> αντιμετωπίζει την ανθρωποκεντρική χρήση πρόσβασης σε πολυμέσα, υπηρεσίες και δεδομένα. Το MBB έχει να κάνει με την πρόσβαση σε πολυμέσα με ανάλυση 4K σε κινητή συσκευή ή για μετάδοση ζωντανού περιεχομένου. Είναι επίσης σχετικό με την υποστήριξη αναλύσεων 4K/8K<sup>41</sup> τηλεόρασης, συσκευές παρακολούθησης υγείας και υπηρεσίες αισθητήρων.

Στο άμεσο μέλλον αναμένεται σημαντική αύξηση της κίνησης βίντεο προς τα κινητά. Η ζήτηση για υπηρεσίες Βίντεο κατ'Απαίτηση (Video-on-Demand - VoD) εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατακόρυφα και μάλιστα για τις περιπτώσεις βίντεο υψηλής και πολύ υψηλής ανάλυσης (HD/UHD). Οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (VR)<sup>42</sup> αναμένεται να απαιτούν δυνατότητα επικοινωνίας ρυθμού της τάξης των Gbps ενώ η γενίκευση της χρήσης τηλεοράσεων 8K (UHDTV)<sup>43</sup> απαιτεί άνω των 100 Mbps ανά χρήστη. Στην ορολογία του 5G, οι αντίστοιχες υπηρεσίες ονομάζονται «βελτιωμένη κινητή ευρυζωνική πρόσβαση» (“enhanced Mobile Broadband”) και αναφέρονται με τη συντομογραφία eMBB. Οι αντίστοιχες εφαρμογές του eMBB απαιτούν συγκεντρωτικές ταχύτητες υψηλότερες από 10 Gbps.

Είναι η πρώτη περίπτωση χρήσης για την εφαρμογή του 5G. Το eMBB αντιμετωπίζει τις απαιτήσεις για αύξηση του όγκου της κίνησης και για την υψηλότερη εμπειρία χρήσης των καταναλωτών. Απαιτεί σημαντική αύξηση της χωρητικότητας στην περιοχή κάλυψης. Ταυτόχρονα, απαιτείται η ανάπτυξη θέσεων/σταθμοτόπων (sites) κατά μήκος και παράπλευρα των αυτοκινητοδρόμων και σε κοντινή απόσταση, για την υποστήριξη των συνδεδεμένων οχημάτων, καθώς το έξυπνο αυτοκίνητο γίνεται ακόμα πιο αποδοτικό σε σχέση με τα πλήρως αυτόνομα οχήματα. Η ζήτηση για κινητές

---

<sup>38</sup> Henry, S., Alshaily, A., & Sousa, E.S. (2020): 5G is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System with the ITU IMT-2020 Requirements. *IEEE Access*, vol.8, pp.42828-42840 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977406>

<sup>39</sup> Indoonundon, M., & Fowdur, P.T. (2021): Overview of the challenges and solutions for 5G channel coding schemes. *Journal of Information and Telecommunication*, vol.5, issue 4, pp.460-483. <https://doi.org/10.1080/24751839.2021.1954752>

<sup>40</sup> International Telecommunication Union - Radiocommunications Sector (ITU-R) (2015, September): ITU-R Recommendation M.2083-0: IMT Vision - “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!%PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!%PDF-E.pdf)

<sup>41</sup> Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, π.χ.: [https://en.wikipedia.org/wiki/8K\\_resolution](https://en.wikipedia.org/wiki/8K_resolution)

<sup>42</sup> Milovanovic, D., Bojkovic, Z., Indoonundon, M., & Fowdur, T.P. (2021): 5G Low-latency Communication in Virtual Reality services: Performance Requirements and Promising Solutions. *WSEAS Transactions on Communications*, vol.20, pp.77-81. <https://doi.org/10.37394/23204.2021.20.10>

<sup>43</sup> Mitani, K. (2018, June): *The Ongoing Evolution of Broadcast Technology*. In: *Proceedings of the ICM 2018 International Conference on Multimedia Retrieval*. <https://doi.org/10.1145/3206025.3210489>

ευρυζωνικές συνδέσεις θα συνεχίσει να αυξάνεται και θα οδηγήσει στο eMBB<sup>44</sup>. Αυτό το σενάριο χρήσης καλύπτει μια σειρά περιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένης της κάλυψης ευρείας περιοχής και του hotspot («θερμή κηλίδα»), οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Για την περίπτωση hotspot<sup>45</sup> (δηλαδή για μια περιοχή με υψηλή πυκνότητα χρηστών) απαιτείται πολύ μεγάλη χωρητικότητα μεταφοράς δεδομένων, ενώ η απαίτηση για κινητικότητα είναι ενδεχομένως χαμηλή. Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ανά χρήστη είναι υψηλότερος από αυτόν της κάλυψης ευρείας περιοχής. Για την περίπτωση της κάλυψης ευρείας περιοχής<sup>46</sup>, το ζητούμενο είναι η απρόσκοπτη κάλυψη και η μεσαία έως υψηλή κινητικότητα και με πολύ βελτιωμένο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων ανά χρήστη σε σύγκριση με τους υπάρχοντες ρυθμούς δεδομένων (πάντως η απαίτηση του ρυθμού των δεδομένων είναι σαφώς μικρότερη της περίπτωσης hotspot).

### 1.3.2. Εξαιρετικά Αξιόπιστες και Χαμηλής Καθυστέρησης Επικοινωνίες (URLLC)

Αυτή η περίπτωση χρήσης<sup>47</sup> θέτει αυστηρές απαιτήσεις σε ορισμένα χαρακτηριστικά όπως η απόδοση, η καθυστέρηση και η διαθεσιμότητα. Κάποια παραδείγματα περιλαμβάνουν ασύρματο έλεγχο βιομηχανικών διαδικασιών κατασκευής και/ή παραγωγής, ιατρική χειρουργική εξ αποστάσεως, αυτοματοποίηση σε έξυπνο δίκτυο διανομής ισχύος, ασφάλεια μεταφορών, κλπ. Όπως είναι προφανές από την «ευαίσθητη» φύση των συναφών εφαρμογών, οι σχετικές περιπτώσεις χρήσης θέτουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις αναφορικά με την καθυστέρηση και την αξιοπιστία. Κατά κανόνα, η URLLC υποστηρίζει μεταδόσεις με μικρό ωφέλιμο φορτίο αλλά με πολύ υψηλή αξιοπιστία από ένα περιορισμένο σύνολο τερματικών συσκευών, οι οποίες ενεργοποιούνται συνήθως από εξωτερικά συμβάντα<sup>48</sup>, όπως οι συναγερμοί.

Νέες εφαρμογές που απαιτούν άμεση αντίδραση (δηλαδή πολύ χαμηλή καθυστέρηση της τάξης του 1 ms), δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν από τη σημερινή υπάρχουσα τεχνολογία με την απαιτούμενη εγγύηση απόδοσης (μια τυπική καθυστέρηση στο LTE είναι περίπου 10 ms). Στις περισσότερες από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, αυτές οι κρίσιμες – ως προς τον χρόνο – εφαρμογές πρέπει να συνδυάσουν τη συνδεσιμότητα 5G

---

<sup>44</sup> Usami, M. (2020): *New World Explored by 5G*. In: *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE-2020)*, pp.1-1. <https://doi.org/10.1109/icce46568.2020.9043147>

<sup>45</sup> Jiang, D., & Liu, G. (2016): An overview of 5G requirements. In Xiang W., Zheng K., Shen X. (eds) *5G Mobile Communications*, pp.3-26, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_1)

<sup>46</sup> Lun, J., Frenger, P., Furskar, A., & Trojer, E. (2019, September): 5G new radio for rural broadband: How to achieve long-range coverage on the 3.5 GHz band. In: *Proceedings of the 2019 IEEE 90<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2019.8891556>

<sup>47</sup> International Telecommunication Union – Radiocommunications Sector (ITU-R) (2015, September): ITU-R Recommendation M.2083-0: IMT Vision - “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!-PDF-E.pdf)

<sup>48</sup> Ali, R., Zikria, Y.B., Bashir, A.K., Garg, S., & Kim, H.S. (2021): URLLC for 5G and Beyond: Requirements, Enabling Incumbent Technologies and Network Intelligence. *IEEE Access*, vol.9, pp.67064-67095. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073806>

με την κατανομημένη (κινητή) τεχνολογία του cloud<sup>49</sup>, έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τους απαιτούμενους χρονικούς περιορισμούς απόκρισης από άκρο σε άκρο (E2E). Στην ορολογία του 5G αυτές οι υπηρεσίες ονομάζονται «πολύ υψηλής αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες» (“Ultra Reliable Low Latency Communications”) και αναφέρονται με τη συντομογραφία URLLC.

### 1.3.3. Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής (mMTC)

Η επέκταση της επικοινωνίας Machine-to-Machine (M2M)<sup>50</sup> σε μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών (IoT) που χρησιμοποιείται σε επαγγελματικές και βιομηχανικές εφαρμογές ή/και σε έξυπνες πόλεις με την ανάπτυξη μεγάλου πλήθους αισθητήρων, απαιτεί εξαιρετικά αποδοτικά ραδιοδίκτυα και παράλληλα πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Στην ορολογία του 5G, οι αντίστοιχες υπηρεσίες ονομάζονται ως «μαζική επικοινωνία μηχανής με μηχανή» (“massive Machine-to-Machine Communication”) και αναφέρονται με τη συντομογραφία mMTC<sup>51</sup>. Οι αντίστοιχες εφαρμογές του mMTC αφορούν σε εκατομμύρια συσκευές ανά km<sup>2</sup>. Για τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα, ο σχεδιασμός των νέων εφαρμογών προβλέπεται με βάση την επικοινωνία M2M και με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου (real-time)<sup>52</sup>. Αυτόνομα οχήματα, βελτιωμένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας cloud, βελτιστοποίηση ελέγχου κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και καταστροφών<sup>53</sup>, έξυπνο δίκτυο κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας, υποστήριξη συστημάτων υγείας και αποτελεσματικές βιομηχανικές επικοινωνίες είναι ορισμένα ενδεικτικά παραδείγματα όπου η χαμηλή καθυστέρηση και η υψηλή αξιοπιστία μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ποιότητα ζωής των πολιτών. Οι σχετικές περιπτώσεις χρήσης χαρακτηρίζονται από απαιτήσεις με σχετικά πολύ χαμηλό κόστος συσκευής και πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής. Επίσης, συχνά

---

<sup>49</sup> Mountaser, G., Condoluci, M., Mahmoodi, T., Dohler, M., & Mings, I. (2017): Cloud-RAN in support of URLLC. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2017)*, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269135>

<sup>50</sup> International Telecommunication Union – Radiocommunications Sector (ITU-R) (2015, September): ITU-R Recommendation M.2083-0: IMT Vision - “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!-PDF-E.pdf)

<sup>51</sup> Bockelmann, C., Pratas, N.K., Wunder, G., Saur, S., Navarro, M., Gregoratti, D., Vivier, G., de Carvalho, E., Ji, Y., Stefanovic, C., Popovski, P., Wang, Q., Schellmann, M., Kosmatos, E., Demestichas, P., Raceala-Motoc, M., Jung, P., Stanczak, S., & Dekorsy, A. (2018): Towards Massive Connectivity Support for Scalable mMTC Communications in 5G Networks. *IEEE Access*, vol.6, 28969-28992. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2837382>

<sup>52</sup> Wen, X.M., Pan, Q., Lu, Z. M., Jing, W.P., & Li, L.P. (2018): Analysis of eMTC for 5G mMTC Scenarios. *Beijing Youdian Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, vol. 41, issue 5). <https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2018-164>

<sup>53</sup> Apostolakis, K.C., Margetis, G., Stephanidis, C., Duquerois, J.M., Drouglazet, L., Lallet, A., Delmas, S., Cordeiro, L., Gomes, A., Amor, M., Zayas, A.D., Verikoukis, C., Ramantas, K., & Markopoulos, I. (2021): Cloud-native 5G infrastructure and network applications (NetApps) for public protection and disaster relief: The 5G-EPICENTRE Project. In: *Proceedings of the 2021 Joint European Conference on Networks and Communications and 6G Summit (EuCNC/6G Summit 2021)*, pp.235-240. <https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482425>

συνδέονται με την απαίτηση για κάλυψη πολύ ευρείας περιοχής ενώ συσχετίζονται με πολύ μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών (που συνήθως μεταδίδουν σχετικά χαμηλό όγκο δεδομένων, σχετικά αδιάφορων ως προς ενδεχόμενη καθυστέρηση<sup>54</sup>). Ο ορισμός των επικοινωνιών τύπου μηχανής είναι αρκετά «ευρύς», καθώς θα πρέπει να περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία νεοεμφανιζόμενων εννοιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT<sup>55</sup>), το Διαδίκτυο των πάντων (Internet of Everything - IoE<sup>56</sup>), οι βιομηχανικές εφαρμογές Industry 4.0<sup>57</sup>, οι εφαρμογές τύπου Smart "X"<sup>58</sup> κ.α. Το καθένα από τα παραπάνω προσθέτει νέα σενάρια με διαφορετικές παραδοχές και απαιτήσεις, οι οποίες κυμαίνονται από τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική παρατήρηση που περιλαμβάνει περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας, έως τις έξυπνες πόλεις με εκατομμύρια αισθητήρες, και έως τα πλήρως ασύρματα εργοστάσια (με πολύ αυστηρές απαιτήσεις καθυστερήσεων και αξιοπιστίας των ασύρματων συνδέσεων) Ο σχεδιασμός του 5G πρέπει να λάβει όλα αυτά υπόψη για να εκπληρώσει πραγματικά και ουσιαστικά τον ρόλο της «βασικής πλατφόρμας εξυπηρέτησης για τις αναδυόμενες και μελλοντικές βιομηχανίες». Οι σχετικές περιπτώσεις χρήσης θέτουν, γενικά, απαιτήσεις για την υποστήριξη ενός πολύ μεγάλου αριθμού συσκευών σε μια μικρή περιοχή, και εκ τούτου, αφορούν σε πολύ μεγάλη πυκνότητα συσκευών<sup>59</sup>. Η κύρια πρόκληση στο mMTC είναι η κλιμακούμενη και αποτελεσματική συνδεσιμότητα για έναν τεράστιο αριθμό συσκευών που στέλνουν πολύ σύντομα πακέτα, κάτι που δεν υποστηρίζεται επαρκώς στα κυψελοειδή συστήματα τα οποία είναι σχεδιασμένα για επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων. Επιπλέον, οι λύσεις mMTC πρέπει να επιτρέπουν την κάλυψη ευρείας περιοχής και τη βαθιά διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους, ενώ παράλληλα να έχουν χαμηλό κόστος και να είναι ενεργειακά αποδοτικές<sup>60</sup>.

#### 1.4. Το πρόγραμμα 5G-DRIVE στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Κίνα

Στο πλαίσιο του προγράμματος Horizon 2020<sup>61</sup> η Ευρωπαϊκή Επιτροπή χρηματοδοτεί το ερευνητικό έργο 5G-DRIVE [7], στόχος του οποίου είναι η επικύρωση της

---

<sup>54</sup> Huang, C.W., Tseng, S.C., Lin, P., & Kawamoto, Y. (2019, May/June): Radio resource scheduling for narrowband internet of things systems: A performance study. *IEEE Network*, vol.33, no3, pp., pp.108-115. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700386>

<sup>55</sup> Βλέπε, μεταξύ άλλων: [https://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_of\\_things](https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things)

<sup>56</sup> Βλέπε, π.χ.: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/internet-of-everything-2/>

<sup>57</sup> Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B9%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AF%CE%B1\\_4.0](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B9%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AF%CE%B1_4.0)

<sup>58</sup> Όπου το "X", μπορεί να αφορά σε "Energy", "Health", "Transportation", "Agrifood", "Tourism" και πολλές ακόμα περιπτώσεις που καλύπτουν καθετοποιημένους τομείς της αγοράς.

<sup>59</sup> El Hassan, A.A., El Mehdi, A., & Saber, M. (2021): NB-IoT and LTE-M towards massive MTC: Complete performance evaluation for 5G mMTC. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol.23, no.1, pp.308-320. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i1.pp308-320>

<sup>60</sup> Belhadj, S., Lakhdar, A.M., & Bendjillali, R.I. (2021): Performance comparison of channel coding schemes for 5G massive machine type communications. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol.22, no.2, pp.902-908. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v22.i2.pp902-908>

<sup>61</sup> Soldani, D., & Manzalini, A. (2015, March): Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.10, no.1, pp.32-42. <https://doi.org/10.1109/MVT.2014.2380581>

διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων 5ης γενιάς της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) και της Κίνας, τα οποία λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 3.5 GHz για βελτιωμένες κινητές ευρυζωνικές επικοινωνίες (eMBB - enhanced Mobile Broadband) και στις ζώνες 3.5 GHz και 5.9 GHz για την περίπτωση σεναρίων επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων (V2X).

Πιο συγκεκριμένα, το έργο 5G-DRIVE:

- (i) Προβλέπει κοινές δοκιμές και ερευνητικές δραστηριότητες που αποσκοπούν στη διευκόλυνση της τεχνολογικής σύγκλισης, της εναρμόνισης του φάσματος και της επιχειρηματικής καινοτομίας, πριν από την πραγματοποίηση δράσεων εμπορικής ανάπτυξης δικτύων 5G μεγάλης κλίμακας.
- (ii) Στοχεύει στην ανάπτυξη τεχνολογιών 5G και πειραματικών υποδομών για υπηρεσίες eMBB και V2X, σε συνεργασία με το αντίστοιχο κινεζικό ερευνητικό πρόγραμμα “5G Product R&D large-scale Trial”, το οποίο εκπονείται υπό το συντονισμό της China Mobile.
- (iii) Προωθεί δοκιμές για την επικύρωση βασικών λειτουργιών, υπηρεσιών και σχεδιασμού δικτύου 5G, που διεξάγονται σε οκτώ πόλεις της Κίνας και σε τρεις χώρες της Ευρώπης (Φινλανδία, Ιταλία και Ηνωμένο Βασίλειο).

Το έργο 5G-DRIVE έχει τύχει χρηματοδότησης από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του προγράμματος Horizon 2020, εντασσόμενο στο ευρύτερο πλαίσιο δράσεων 5G-PPP - Φάση 3<sup>62</sup>, με συνολική διάρκεια 34 μήνες (Σεπτέμβριος 2018 – Ιούνιος 2021), με τη συμμετοχή 17 εταιρών-φορέων από 9 χώρες (ήτοι Ελλάδα, Γερμανία, Φινλανδία, Βέλγιο, Ελβετία, Πολωνία, Πορτογαλία, Λουξεμβούργο, Ηνωμένο Βασίλειο).

(Η ειδική αναφορά στο πρόγραμμα 5G-DRIVE γίνεται ως μια ξεχωριστή τρέχουσα περίπτωση έρευνας σε διεθνή κλίμακα, προσανατολισμένης σε πεδία συναφή με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Περισσότερα πληροφοριακά στοιχεία δίνονται στο Παράρτημα Α).

## 1.5. Η Επόμενη Γενιά Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων - 6G

Το 5G έχει βελτιώσει σημαντικά την καθυστέρηση μεταφοράς (latency), έχει εκμεταλλευτεί τη διαθεσιμότητα του τηλεπικοινωνιακού φάσματος συχνοτήτων και έχει επαναπροσδιορίσει τη δομή και το ρόλο των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Το 5G βρίσκεται ακόμη στην αρχή της ζωής του. Αναπτύσσεται παγκοσμίως ενώ ταυτόχρονα εξελίσσεται και βελτιώνεται με τις ανανεωμένες εκδόσεις του φορέα 3GPP<sup>63</sup>. Τον Σεπτέμβριο του 2021 υπήρχαν σε λειτουργία 184 δίκτυα 5G, τα οποία συμμορφώνονται με τα πρότυπα 3GPP που τυγχάνουν πλέον διεθνούς αποδοχής [7] .

---

<sup>62</sup> Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://5g-ppp.eu/5g-ppp-phase-3-projects/>

<sup>63</sup> Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.3gpp.org/specifications>

Ωστόσο, σε ένα μέλλον που χαρακτηρίζεται από αυτονομία<sup>64</sup>, ευφυΐα<sup>65</sup> και πλήρη ψηφιοποίηση της πληροφορίας, απαιτείται η περαιτέρω εξέλιξη των δικτύων για να ικανοποιηθούν οι αυξημένες απαιτήσεις των διαρκώς αναδυόμενων εφαρμογών που αγγίζουν πολλαπλούς τομείς, ιδίως δε εκείνους των καθετοποιημένων τομέων της αγοράς (vertical markets).

Το πρόσφατο παρελθόν έχει δείξει ότι σε μία δεκαετία η εξέλιξη της τεχνολογίας θα έχει φέρει στο προσκήνιο τη νέα γενιά τηλεπικοινωνιών που θα ονομαστεί 6G<sup>66</sup> [7]. Στην πραγματικότητα πάρα πολλά έργα βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη και αφορούν αυτό που καλείται ως “Next G” ή “6G”. Οι δράσεις λαμβάνουν χώρα σε παγκόσμια κλίμακα καθώς όλα τα κράτη και οι εμπλεκόμενοι φορείς της αγοράς έχουν πλήρως κατανοήσει τον καταλυτικό ρόλο που επιτελούν οι τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές στην ανάπτυξη και τα τεράστια συναφή κέρδη/οφέλη.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η αγορά του 6G αναμένεται να ανέλθει στα \$1.773 δις έως το 2035<sup>67</sup>. Για το σκοπό αυτό, όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς επιδιώκουν να αναπτύξουν κατάλληλες δράσεις για την ενίσχυση της παρουσίας και των ρόλων τους στην αγορά, προσπαθώντας να εξασφαλίσουν μερίδιο από τα κέρδη αυτά [16].

Π.χ. οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία έχουν συμφωνήσει για να συνεργαστούν επενδύοντας \$4,5 δις για την ανάπτυξη του 6G<sup>68</sup>. Οι ΗΠΑ θα συμμετέχουν με \$2,5 δις ενώ η Ιαπωνία με \$2,0 δις [17].

Στην Κίνα ήδη από το Νοέμβριο του 2019 έχει ξεκινήσει επισήμως η έρευνα και οι δράσεις για την ανάπτυξη του 6G. Η Κίνα έχει επενδύσει πάνω από \$30 δις κατά τη διάρκεια των 5 τελευταίων ετών και αναμένεται να κάνει το ίδιο για την προοπτική του 6G<sup>69</sup>. Χαρακτηριστικό είναι το ότι μόνη της η Shenzhen θα επενδύσει \$108 δις τα επόμενα 5 έτη [18].

---

<sup>64</sup> Guo, H., Zhou, X., Liu, J., & Zhang, Y. (2022, January): Vehicular intelligence in 6G: Networking, communications, and computing. *Vehicular Communications*, vol.33. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100399>

<sup>65</sup> Yang, H., Alphones, A., Xiong, Z., Niyato, D., Zhao, J., & Wu, K. (2020): Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks. *IEEE Network*, vol.34, no.6, pp.272-280. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000195>

<sup>66</sup> Viswanathan, H., & Mogensen, P.E. (2020): Communications in the 6G Era. *IEEE Access*, vol.8, pp.57063-57074. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981745>

<sup>67</sup> Research and Markets (2021, April): Global 6G Market Report 2021: Market to Reach \$1,773.09 Billion by 2035. Globenewswire Inc. Available at: <https://www.globenewswire.com/fr/news-release/2021/04/19/2212107/28124/en/Global-6G-Market-Report-2021-Market-to-Reach-1-773-09-Billion-by-2035.html>.

<sup>68</sup> NIKKEI Asia (2021, April): US and Japan to invest \$4.5 bn in next-gen 6G race with China. Nikkei Inc. Available at: <https://asia.nikkei.com/Business/Telecommunication/US-and-Japan-to-invest-4.5bn-in-next-gen-6G-race-with-China>

<sup>69</sup> Rui, G. (2021, May): China's Shenzhen to invest US\$108 billion in R&D over 5 years. South China Morning Post Publishers Ltd. Available at: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3132651/chinas-tech-hub-shenzhen-invest-us108-billion-rd-over-5-years>

Στην Ε.Ε. υπάρχουν ήδη σχετικά έργα σε εξέλιξη σε κοινό ευρωπαϊκό επίπεδο<sup>70</sup> (Horizon2020 - 5G Public Private Partnership) αλλά και σε εθνικό επίπεδο.

Στην Κορέα έχει αποφασιστεί η συμμετοχή στην ανάπτυξη του 6G με χρηματοδότηση τόσο από τον κρατικό προϋπολογισμό (\$169 εκ. έως το 2026)<sup>71</sup> αλλά και από εταιρίες όπως η Samsung και η LG Electronics οι οποίες έχουν επενδύσει \$800 εκ. σε εγκαταστάσεις έρευνας.

Στην Ταϊβάν ξεκίνησαν ακαδημαϊκά έργα από τον Απρίλιο του 2019<sup>72</sup>, ενώ η Ινδία ανακοίνωσε την συμμετοχή της στο 6G στην ITU τον Ιούνιο του 2021 [7].

### 1.5.1. Περιπτώσεις Χρήσης

Στο μέλλον είναι σίγουρο ότι θα προκύψουν διάφορες περιπτώσεις χρήσης λόγω των διαρκών τεχνολογικών εξελίξεων αλλά και των συναφών τάσεων της αγοράς, οι οποίες προς το παρόν δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν. Έτσι οι IMT θα χρειαστούν ευελιξία για προσαρμογή σε νέες περιπτώσεις χρήσης που θα συνοδεύονται από ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων.

Τα μελλοντικά συστήματα IMT θα περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό διαφορετικών δυνατοτήτων και πρέπει να σχεδιάζονται με έναν εξαιρετικά αρθρωτό (modular) τρόπο, για να εφαρμόζονται οι εκάστοτε απαιτούμενες δυνατότητες ανάλογα με τις συνθήκες και τις διαφορετικές ανάγκες κάθε χώρας.

Με μια τόσο μεγάλη διακύμανση στα χαρακτηριστικά απόδοσης, μπορεί να είναι καλύτερα να ληφθούν υπόψη οι πολύ διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης ως προς τους ενδεχόμενους τύπους αλληλεπίδρασης, δηλαδή μεταξύ ανθρώπων, μεταξύ μηχανών ή μεταξύ ανθρώπων και μηχανών.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν την ταξινόμηση και την ομαδοποίηση των περιπτώσεων χρήσης βάσει των κύριων κατηγοριών που θα επηρεάσουν στην ανάπτυξη του 5G (δηλαδή enhanced mobile broadband-eMBB, massive scale communication-MSC και ultra-reliable low latency service-URLLC), οδηγούμαστε σε μια «εναλλακτική απεικόνιση», όπου φαίνεται ότι ορισμένες περιπτώσεις χρήσης θα εκτείνονται σε πολλαπλούς τύπους αλληλεπίδρασης και σε διαφορετικές απαιτήσεις απόδοσης.

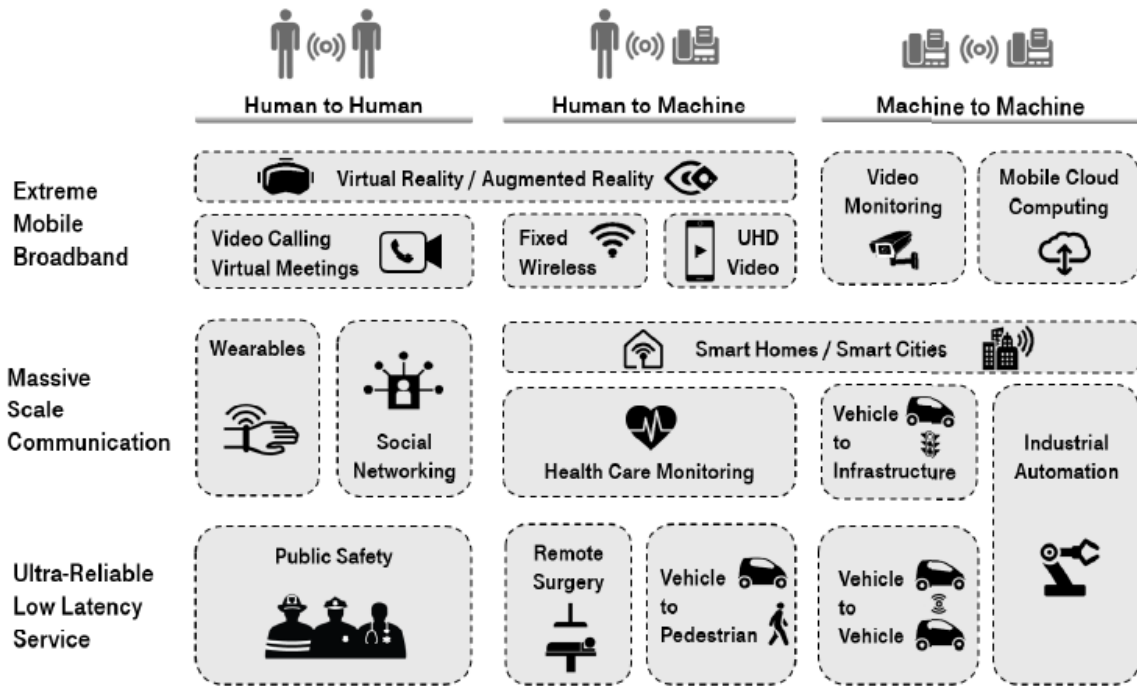
---

<sup>70</sup> Βλέπε, π.χ.: H2020-ICT-52-2020: "5G-PPP Smart Connectivity beyond 5G". Available at: <https://5g-ppp.eu/5g-ppp-phase-3-6-projects/>

<sup>71</sup> Bannerman, N. (2020, September): South Korea to launch 6G trial in 2026. Capacity Media. Available at: <https://www.capacitymedia.com/articles/3826249/south-korea-to-launch-6g-trial-in-2026>

<sup>72</sup> Chuan, B., & Ke, W. (2019, April): Taiwan moving to develop B5G, 6G tech. DigiTimes Inc. Available at: <https://www.digitimes.com/news/a20190429PD209.html>





Εικόνα 3: Ομαδοποιημένες περιπτώσεις χρήσης 5G σύμφωνα με το 5G Americas<sup>73</sup>

Στο μέλλον αναμένεται η τεχνολογία να οδηγήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things)<sup>74</sup> όπου όλο και περισσότερες έξυπνες συσκευές και όλο και περισσότεροι αισθητήρες θα χρησιμοποιούν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Έτσι το μέλλον προβλέπεται να οδηγήσει στην αυτονομία αλλά και στην αύξηση των αναγκών από τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αφού τα δεδομένα (data) θα βρίσκονται στο προσκήνιο<sup>75</sup>.

Τα δίκτυα θα υποστηρίζουν παράλληλα όλες τις συχνότητες (sub 6 GHz, mmWave, Terahertz ή VLC)<sup>76</sup> με αυτόματες αλλαγές από συχνότητα σε συχνότητα. Άρα, η συνδεσιμότητα θα είναι απρόσκοπτη. Ωστόσο, θα πρέπει να υπάρχει αποδοτικός χρονοπρογραμματισμός (scheduling) και νέος σχεδιασμός των δικτύων.

<sup>73</sup> 5G Americas (2017): 5G Services and Use Cases - A White Paper. Available at: [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G\\_Service\\_and\\_Use\\_Cases\\_FINAL.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G_Service_and_Use_Cases_FINAL.pdf)

<sup>74</sup> Guo, F., Yu, F.R., Zhang, H., Li, X., Ji, H., & Leung, V.C.M. (2021): Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, vol.8, issue 15, pp.11891-11915. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3063686>

<sup>75</sup> Akhtar, M.W., Hassan, S.A., Ghaffar, R., Jung, H., Garg, S., & Hossain, M.S. (2020): The shift to 6G communications: vision and requirements. *Human-Centric Computing and Information Sciences*, vol.10, no.1, pp.1-27. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00258-2>

<sup>76</sup> Al-Saman, A., Mohamed, M., Cheffena, M., & Moldsvor, A. (2021). Wideband channel characterization for 6g networks in industrial environments. *Sensors, MDPI*, vol.21, no.6. <https://doi.org/10.3390/s21062015>

Τα δίκτυα 6G θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών<sup>77</sup>. Για να γίνει αυτό όμως απαιτούνται τεχνολογίες, αρχιτεκτονικές και προσεγγίσεις οι οποίες δεν είναι ακόμα ώριμες για άμεση χρήση. Αυτό όμως, αποτελεί μια ευκαιρία για την επιστημονική και την επιχειρηματική κοινότητα για να επενδύσουν σε καινοτομίες έτσι ώστε τα δίκτυα 6G να ευδοκιμήσουν από το 2030 και έπειτα.

Πάρα πολλοί τομείς αναμένεται να ωφεληθούν από το 5G και το 6G όπως η γεωργία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, τα έξυπνα εργοστάσια, οι έξυπνες πόλεις, η εκπαίδευση, τα μέσα ενημέρωσης, η ψυχαγωγία και φυσικά τα συστήματα μεταφοράς.

#### **1.5.1.1. Τηλεπαρουσία και Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality)**

Ήδη έχουν αρχίσει να εμφανίζονται υπηρεσίες Extended Reality (XR)<sup>78</sup> στα τρέχοντα συστήματα 5G<sup>79</sup>.

Οι υπηρεσίες XR αποτελούν τη φυσική συνέχεια της εικονικής πραγματικότητας (VR)<sup>80</sup>, της επαυξημένης πραγματικότητας (AR)<sup>81</sup> και της μεικτής πραγματικότητας (MR)<sup>82</sup>.

Ο στόχος της XR είναι να δώσει στους χρήστες την αίσθηση της απόλυτης παρουσίας και ενσωμάτωσης σε ένα τεχνητά παραγόμενο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες και διεγέρτες καλύπτοντας έτσι και τις 5 ανθρώπινες αισθήσεις.

Οι απαιτήσεις αυτών των συστημάτων όταν χρησιμοποιούν ασύρματα δίκτυα είναι εξαιρετικά υψηλές τόσο σε ποιότητα αλλά και σε αξιοπιστία (όχι διακοπές)<sup>83</sup> και απαιτούν πολύ υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων με πολύ μικρή καθυστέρηση [19].

Σε ένα σύστημα AR η πραγματικότητα επικαλύπτεται με εικονικά αντικείμενα. Η AR έχει περίπου της ίδιας απαιτήσεις ταχύτητας-καθυστέρησης-αξιοπιστίας με την VR αλλά είναι

---

<sup>77</sup> Nayak, S., & Patgiri, R. (2021): 6G Communication: Envisioning the Key Issues and Challenges. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol.6, no.24, pp.1-10. <https://doi.org/10.4108/eai.11-11-2020.166959>

<sup>78</sup> Marr, B. (2019): *What Is Extended Reality Technology? A Simple Explanation For Anyone*. Forbes. Available at: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/08/12/what-is-extended-reality-technology-a-simple-explanation-for-anyone/?sh=1697394f7249>

<sup>79</sup> Curcio, I.D.D., Gunkel, S.N.B., & Stockhammer, T. (2019): State-of-the-Art of Extended Reality in 5G Networks. Available at: <https://www.ibt.org/state-of-the-art-of-extended-reality-in-5g-networks/5089.article>.

<sup>80</sup> Bardi, J. (2019, March): What is Virtual Reality? [Definition and Examples]. Available at: <https://www.marxentlabs.com/what-is-virtual-reality/>.

<sup>81</sup> Kovach, N. (2018, August): What is Augmented Reality (AR) and How does it work. Blippar Group Ltd. Available at: <https://www.blippar.com/blog/2018/08/21/what-is-augmented-reality-and-how-does-augmented-reality-work>

<sup>82</sup> Speicher, M., Hall, B.D., & Nebeling, M. (2019, May): What is mixed reality? In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paper No.537*, pp.1-15. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>

<sup>83</sup> Ebrahimzadeh, A., & Maier, M. (2020): XR in the 6G Post-Smartphone Era. In *Toward 6G: A New Era of Convergence, Chapter 7*. Wiley Online Library, doi: 10.1002/9781119658054.

λιγότερο «αυστηρή» καθώς δεν υλοποιεί την εικονική αφή αφού ο χρήστης δεν χρειάζεται να «βυθιστεί» σε τεχνητό περιβάλλον.

Οι υπηρεσίες XR απαιτούν συνεχόμενο υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων<sup>84</sup> (σε αντίθεση με εφαρμογές που απαιτούν τον ρυθμό αυτό μόνο στην αιχμή) ώστε να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως η εξ αποστάσεως ιατρική, η τηλεχειρουργική, βιομηχανικές τεχνικές μηχανουργείου και online παιχνίδια.

Ενώ η τρέχουσα τεχνολογία 5G μπορεί να προσφέρει ταχύτητες βίντεο 12K, δεν μπορεί να φτάσει τα 24K που απαιτεί η απόλυτη εμπειρία XR. Επίσης, ενσωματώνοντας τις πέντε αισθήσεις οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση, τρέμουλο (jitter) και συγχρονισμό ξεπερνούν αυτές του Ultimate XR [7].

Η συνύπαρξη δυνατοτήτων AR και VR στην ίδια συσκευή οδηγεί στην ιδέα της MR (Μικτής Πραγματικότητας). Με την εξέλιξη της τρισδιάστατης απεικόνισης, η MR μπορεί να ικανοποιήσει την ιδιαίτερα περιζήτητη δυνατότητα της ολογραφικής τηλεμεταφοράς<sup>85</sup>. Τέτοιες υπηρεσίες έχουν ακόμη πιο αυστηρές απαιτήσεις συγκριτικά με το ασύρματο δίκτυο αφού οι ολογραφικές ροές απαιτούν πολύ ακριβή συγχρονισμό με τις πέντε αισθήσεις. Επιπλέον, ενώ η εικόνα είναι υψίστης σημασίας, σε ορισμένες εφαρμογές απαιτείται εστίαση στην αφή (αίσθηση αφής, ψηλάφηση, κτλ.)<sup>86</sup>.

#### **1.5.1.2. Industry 4.0 και Ψηφιακό Δίδυμο**

Τα κυβερνοφυσικά συστήματα<sup>87</sup> είναι ενσωματωμένα φυσικά συστήματα που περιλαμβάνουν αισθητήρες, ενεργοποιητές και άλλες συσκευές και εκτελούν αδιάλειπτα υπολογισμούς και επικοινωνία. Αυτά τα συστήματα σκοπό έχουν να «μμηθούν» την ανθρώπινη συμπεριφορά ή να λαμβάνουν αποφάσεις σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται η ανθρώπινη αλληλεπίδραση<sup>88</sup>.

Με τους όρους των κυβερνο-φυσικών συστημάτων βρισκόμαστε ήδη στην 4η Βιομηχανική Επανάσταση<sup>89</sup>. Αυτή έχει να κάνει με τον αυτοματισμό της βιομηχανίας με

---

<sup>84</sup> Bojkovic, Z., Milovanovic, D., Fowdur, T.P., & Indoonundon, M. (2021): 6G Ultra-Low Latency Communication in Future Mobile XR Applications. In: Thampi, S.M., Krishnan, S., Hedge, R.M., Ciunozzo, D., Hanne, T. Kannan, R.J. (eds) Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. SIRS 2020. Communications in Computer and Information Science, vol.1365. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0425-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0425-6_22)

<sup>85</sup> Adhikari, R. (2020, August): The Long Journey Into Holographic Transportation. ECTNews Network, Inc. Available at: <https://www.technewsworld.com/story/the-long-journey-into-holographic-transportation-86041.html>

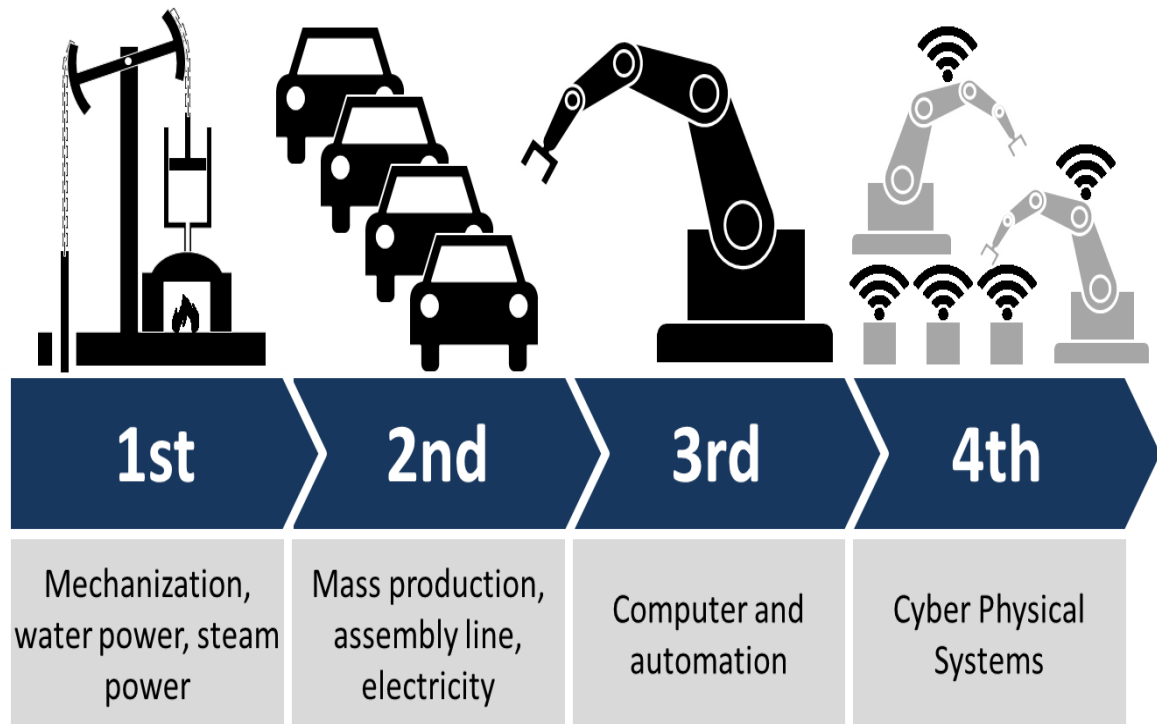
<sup>86</sup> Παράδειγμα τέτοιων υπηρεσιών είναι η αλληλεπίδραση εγκεφάλου με υπολογιστή (BCI - Brain Computer Interaction) για τον έλεγχο π.χ. πρόσθετων μελών ή κοντινών επεξεργαστικών μονάδων μέσα από εγκεφαλικά εμφυτεύματα.

<sup>87</sup> Letichevsky, A.A., Letychevskiy, O.O., Skobelev, V.G., & Volkov, V.A. (2017): Cyber-Physical Systems. *Cybernetics and Systems Analysis*, vol.53, no.6, pp.821-853. <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9984-9>

<sup>88</sup> Βασικά παραδείγματα συνιστούν τα αυτόνομα οχήματα, τα βιομηχανικά ρομπότ, κτλ.

<sup>89</sup> Xu, L.D., & Duan, L. (2019): Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey. *Enterprise Information Systems*, vol13, no.2, pp.148-169. <https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1442934>

συστήματα που συλλέγουν πληροφορία, λαμβάνουν αποφάσεις και παράγουν δράσεις αποκεντρωμένα και σε μεγάλο βαθμό αυτόνομα.



Εικόνα 4: Βιομηχανικές επαναστάσεις κατά σειρά [7]

Για να επιτευχθεί η πλήρης αυτονομία και η από άκρο σε άκρο ψηφιοποίηση συστημάτων και διαδικασιών, έχει εμφανισθεί πρόσφατα η έννοια του «ψηφιακού διδύμου» (“digital twin”)<sup>90</sup>.

Στην πραγματικότητα, το ψηφιακό δίδυμο είναι ένα εικονικό μοντέλο μιας φυσικής διαδικασίας, προϊόντος ή υπηρεσίας, όπου σε πραγματικό χρόνο αναπαριστά αυτή/ό στον ψηφιακό κόσμο.

Βασική είναι η δυνατότητα συγχρονισμού σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του φυσικού χώρου και του κυβερνοχώρου.

Ενδεικτική εφαρμογή μπορεί να είναι τα ίδια τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών με την απεικόνιση των αναγκών, της κάλυψης, της κίνησης, κτλ. [20].

Είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι με τον τεράστιο αριθμό αισθητήρων και ενεργοποιητών που διαθέτει ένα τέτοιο σύστημα, η απαίτηση της ταχύτητας μετάδοσης των πληροφοριών και η απαίτηση σχεδόν μηδενικού χρόνου αντίδρασης ξεπερνούν τα

<sup>90</sup> Stanford-Clark, B.A., Frank-Schultz, E., & Harris, M. (2019): *What are digital twins ?* IBM. Available at: <https://developer.ibm.com/articles/what-are-digital-twins/>

όρια του 5G [7]. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να έχουν εφαρμογή στην βιομηχανία<sup>91</sup>, στην ιατρική<sup>92</sup> ή ακόμα και στη διαχείριση ολόκληρων πόλεων<sup>93</sup>.

---

<sup>91</sup> Grieves, M. (2014, March): Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. *White Paper*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication)

<sup>92</sup> Βιομετρικοί αισθητήρες (καρδιακών παλμών, πίεσης, θερμοκρασίας, γλυκόζης κτλ.) αποστέλλουν τα δεδομένα σε ψηφιακά δίδυμα που αναπαριστούν ιατρικά διαγνωστικά εργαλεία.

<sup>93</sup> Στην «έξυπνη πόλη» το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιώντας τα δεδομένα χιλιάδων αισθητήρων μπορεί να αναπαριστά και να διαχειρίζεται τις θέσεις στάθμευσης, τους κάδους σκουπιδιών, την ποιότητα του αέρα, τους μετρητές κατανάλωσης ενέργειας κτλ.

## 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2030

Οι μεταφορές αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της σύγχρονης κοινωνίας και για πολλές χώρες αντιπροσωπεύουν μεγάλο ποσοστό του ΑΕΠ<sup>94</sup>. Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α. ο κλάδος των μεταφορών συνεισέφερε 1,2 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2018 και αντιπροσώπευε περίπου το 6% του ΑΕΠ [7]. Και στην Ε.Ε. οι μεταφορές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην οικονομία και κοινωνία και έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην ανάπτυξη και την απασχόληση αφού απασχολούν άμεσα περίπου 10 εκατομμύρια ανθρώπους και αντιπροσωπεύουν περίπου το 5% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ)<sup>95</sup>. Τα logistics, όπως η μεταφορά και η αποθήκευση, αντιπροσωπεύουν το 10–15% του κόστους ενός τελικού προϊόντος για τις ευρωπαϊκές εταιρείες.

Η ποιότητα των υπηρεσιών μεταφοράς έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Στην Ε.Ε. κατά μέσο όρο, το 13,2% του προϋπολογισμού κάθε νοικοκυριού δαπανάται για μεταφορικά αγαθά και υπηρεσίες<sup>95</sup>. Οι μεταφορές εξαρτώνται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τους πόρους πετρελαίου και αντιπροσωπεύουν σημαντική πηγή εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Η εκπληκτική άνοδος που έχει συντελεστεί τα τελευταία 50 χρόνια στον συνδυασμένο κλάδο των μεταφορών-επικοινωνιών μπορεί να δικαιολογήσει τον όρο «επανάσταση»<sup>96</sup>. Ένα μεγάλο ποσοστό, το οποίο μάλιστα βαίνει αυξανόμενο, του ΑΕΠ, της πλειονότητας των χωρών προέρχεται από τον κλάδο αυτό<sup>97</sup>.

Το μελλοντικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα θα χαρακτηρίζεται από αύξηση της απόδοσης, μείωση του κόστους, ώστε να βοηθηθεί η ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας, ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και φιλικότητα προς το περιβάλλον<sup>95</sup>. Στο πλαίσιο αυτό θα ενισχύσει σημαντικά την αυτόνομη οδήγηση ενώ η έξυπνη υποδομή θα βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα, την παραγωγικότητα και την ασφάλεια ολόκληρου του συστήματος μεταφορών<sup>98</sup>.

Σε μια περίοδο όπου η μεταφορική ζήτηση και οι απαιτήσεις σε υποδομές και υπηρεσίες αυξάνουν, είναι σημαντικό η συντήρηση και η βελτιστοποίηση των υπάρχοντων μεταφορικών συστημάτων να είναι εφικτή χωρίς μεγάλη αύξηση κεφαλαίων και

---

<sup>94</sup> Trading Economics: GDP from Transport, <https://tradingeconomics.com/country-list/gdp-from-transport>

<sup>95</sup> EU Science Hub: Transport sector economic analysis, Available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/transport-sector-economic-analysis>

<sup>96</sup> Cato Institute: The Transportation-Communication Revolution: 50 Years of Dramatic Change in Economic Development. Available at: <https://www.cato.org/cato-journal/winter-2020/transportation-communication-revolution-50-years-dramatic-change-economic>

<sup>97</sup> NationMaster: Contribution to GDP of Transport, Storage and Communication, Available at: <https://www.nationmaster.com/nmx/ranking/contribution-to-gdp-of-transport-storage-and-communication>

<sup>98</sup> Lu, M. (2016). Evaluation of intelligent road transport systems: Methods and results. In Evaluation of Intelligent Road Transport Systems: Methods and Results. <https://doi.org/10.1049/PBTR007E>

επενδύσεων. Οι λύσεις αυτές στηρίζονται στη χρήση έξυπνων τεχνολογικών εφαρμογών και αντιμετωπίζονται με τα ευφυή συστήματα μεταφορών (ITS)<sup>99</sup>.

## 2.1. Επικοινωνίες V2X, C-V2X και IoV

Το Vehicle-to-Everything (V2X), η «επικοινωνία συνδεδεμένου οχήματος με όλα», είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στα οχήματα να επικοινωνούν με κινούμενα μέρη του κυκλοφοριακού συστήματος που βρίσκονται πέριξ τους. Τα συστήματα επικοινωνιών V2X χρησιμοποιούνται κυρίως με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας και την πρόληψη συγκρούσεων. Σε ένα συμβατικό όχημα, τα συστήματα V2X μπορούν να μεταφέρουν σημαντικές πληροφορίες στον οδηγό σχετικά με τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες, τα κοντινά ατυχήματα, τις οδικές συνθήκες και τις επικίνδυνες δραστηριότητες των κοντινών οχημάτων. Εκτός από τα οφέλη για την ασφάλεια, η τεχνολογία V2X μπορεί να εξυπηρετήσει και άλλους σκοπούς όπως την ενσωμάτωση αυτόματων πληρωμών για διόδους, στάθμευση και παρόμοιες χρεώσεις. Επίσης, η τεχνολογία V2X αναμένεται να αποφέρει σημαντικά οφέλη στην κυκλοφορία.

Ο όρος V2X (Vehicle to Everything) είναι γενικός και περιλαμβάνει τόσο την έννοια του V2V (Vehicle to Vehicle) όσο και αυτή του V2I (Vehicle to Infrastructure) και επίσης άλλες πολλές αντίστοιχες τεχνολογίες που ενδέχεται να αναπτυχθούν όπως οι V2P (Vehicle to Pedestrian), V2D (Vehicle to Device) και V2G (Vehicle to Grid).

Η επικοινωνία Vehicle-to-Vehicle (V2V)<sup>100</sup> είναι μια τεχνολογία κυρίως ανταλλαγής μηνυμάτων με περιεχόμενο τη θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση κίνησης των οχημάτων, ώστε να αυξάνεται η επίγνωση του περιβάλλοντος σε γωνία 360° γύρω από το όχημα.

Με τον τρόπο αυτό οι οδηγοί προειδοποιούνται για επικίνδυνες καταστάσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σύγκρουση. Για παράδειγμα, η επικοινωνία V2V δύναται να βοηθήσει προειδοποιώντας έναν οδηγό ότι ένα όχημα μπροστά φρενάρει και συνεπώς ο οδηγός πρέπει να επιβραδύνει ή να ενημερώσει τον οδηγό ότι δεν είναι ασφαλές να προχωρήσει μέσω μιας διασταύρωσης, επειδή πλησιάζει γρήγορα ένα άλλο αυτοκίνητο. Η πληροφορία που ανταλλάσσεται εκτός από την ασφάλεια συνεισφέρει στην αποφυγή μπουτλιαρισμάτων αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος<sup>101</sup>.

Η επικοινωνία Vehicle-to-Infrastructure (V2I) αναφέρεται στην ασύρματη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οχημάτων και οδικών υποδομών. Το V2I είναι η επόμενη γενιά ευφυών συστημάτων μεταφοράς (ITS). Οι τεχνολογίες V2I καταγράφουν δεδομένα κίνησης που δημιουργούνται από οχήματα, παρέχοντας ασύρματα πληροφορίες από

---

<sup>99</sup> Mathew, T.V. (2014): Intelligent Transportation Systems. Available at: [https://www.academia.edu/12251983/Intelligent\\_Transportation\\_Systems](https://www.academia.edu/12251983/Intelligent_Transportation_Systems)

<sup>100</sup> 5G-DRIVE Project (2021): Deliverable D2.3: Final Report Architecture and Use Case Implementation. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/#1629277436545-e533683f-f43c>

<sup>101</sup> NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration): Vehicle-to-Vehicle Communication, US Department of Transportation. Available at: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication>

την υποδομή στο όχημα, οι οποίες ενημερώνουν τον οδηγό για την ασφάλεια, την κινητικότητα ή τις συνθήκες που σχετίζονται με το περιβάλλον.

Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και πεζών (V2P) είναι το σύστημα ταυτοποίησης και επικοινωνίας με ένα τμήμα που είναι γνωστό ως ευάλωτοι χρήστες του δρόμου (Vulnerable Road Users - VRUs). Σε αντίθεση με την επικοινωνία οχήματος-προς-όχημα, όπου δύο παρόμοιες μονάδες μπορούν να αναγνωρισθούν και να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, το V2P απαιτεί έναν διαφορετικό τύπο αλληλεπίδρασης για τον ακριβή προσδιορισμό των πεζών, ώστε τα οχήματα να ανταποκριθούν σωστά κατά την προσέγγισή τους<sup>5</sup>. Λόγω της μικρής εμβέλειας απευθείας επικοινωνίας των οχημάτων με τους πεζούς, η ανταλλαγή των μηνυμάτων V2P μπορεί να υποστηρίζεται και από την υποδομή (Road Side Unit - RSU)<sup>102</sup>.

Σήμερα τα δίκτυα V2X σχεδιάζονται σε πολλές περιπτώσεις με τη χρήση τεχνολογίας επικοινωνίας τύπου WLAN (για την ακρίβεια DSRC - IEEE 802.11p<sup>103</sup>). Ωστόσο με την ταυτόχρονη ραγδαία ανάπτυξη του IoT και τη σχεδίαση και εφαρμογή των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας τύπου LTE και πλέον 5G, προωθούνται και άλλες δυνατότητες υλοποίησης των δικτύων V2X καθώς και νέες δυνατότητες εξέλιξής τους.

Με τη χρήση του κυψελωτού δικτύου επικοινωνιών είναι εφικτή η διασύνδεση των οχημάτων με όλο τον προαναφερόμενο εξοπλισμό μέσω του δικτύου, οπότε πλέον μιλάμε για επικοινωνίες V2N (Vehicle-to-Network<sup>104</sup>).

Συλλογικά αναφερόμενοι, οι τρόποι μετάδοσης άμεσων επικοινωνιών μικρότερης εμβέλειας (V2V, V2I, V2P) και επικοινωνιών που βασίζονται σε δίκτυο μεγαλύτερης εμβέλειας (V2N) αποτελούν αυτό που ονομάζουμε Cellular-V2X<sup>102</sup>.

---

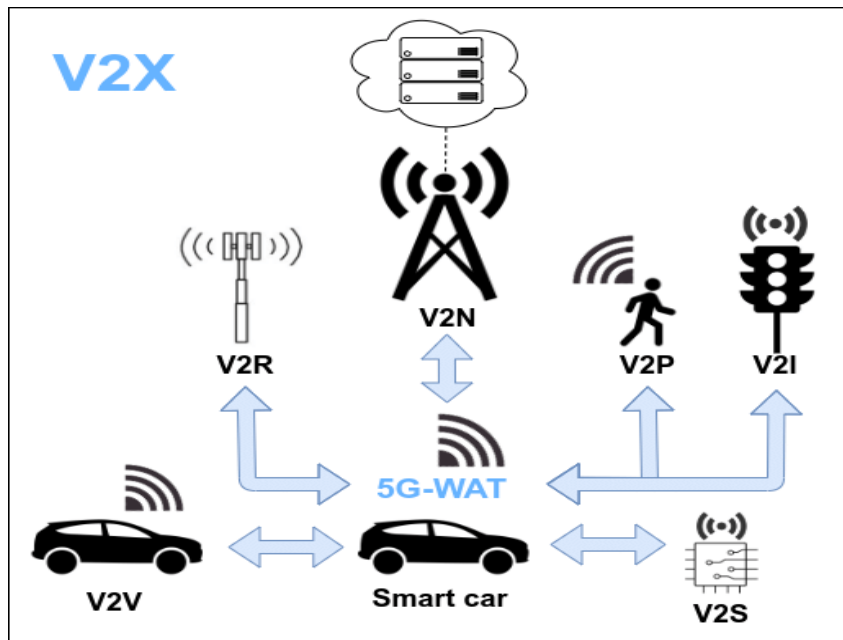
<sup>102</sup> The Third Generation Partnership Project (3GPP): 3GPP TR 22.885 V1.0.0 (2015-09): Study on LTE Support for V2X Services (Release 14), Available at:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2898>

<sup>103</sup> USA-DOT: ITS Standards, <http://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>

<sup>104</sup> 5GAA: Exploring the technology C-V2X, <https://5gaa.org/5g-technology/c-v2x/>





Εικόνα 5: Πρωτόκολλα επικοινωνίας των Διασυνδεδεμένων Αυτόνομων Οχημάτων (CAVs) [21]

Το τρέχον δίκτυο οχημάτων Ad Hoc (VANET), χρησιμοποιώντας κάθε όχημα που είναι συνδεδεμένο στο Διαδίκτυο ως κόμβο στο πλαίσιο του IoT, δημιουργεί την έννοια του IoV (Internet Of Vehicles) [22]. Το IoV επιτρέπει τη συνδυαστική χρήση των δεδομένων, συμβάλλοντας στη διατήρηση της ροής της κυκλοφορίας, στη διαχείριση στόλου, στην αποφυγή ατυχημάτων και στην ψυχαγωγία ή στον εντοπισμό των χρηστών παντού και πάντοτε. Με αισθητήρες απόστασης, μείωσης ταχύτητας και επιτάχυνσης, το IoV ενισχύει τα βοηθήματα οδήγησης, όπως για παράδειγμα το προσαρμοστικό cruise control που μέσω της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) του οχήματος μπορεί να κατανοήσει τους ελιγμούς άλλων οχημάτων [23].

## 2.2. Περιπτώσεις χρήσης

Τα συστήματα 5G υποστηρίζουν ήδη πολλές περιπτώσεις χρήσης στον τομέα των μεταφορών με το V2X [24] ενώ την επόμενη δεκαετία προβλέπεται αύξηση των εφαρμογών που σχετίζονται με δράσεις αυτόνομης οδήγησης καθώς και εμφάνιση επιπλέον περιπτώσεων χρήσης που εκτός από οχήματα θα φτάνουν σε πεζούς και ποδηλάτες.

Μερικές πολλά υποσχόμενες χρήσεις για τις καθετοποιημένες αγορές μεταφορών ενδεικτικά παρατίθενται όπως παρακάτω (πολλές από αυτές ήδη προσφέρονται αλλά δεν παύει να αποτελούν αντικείμενο συνεχούς βελτίωσης):

- Βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων μεταφορών.
  - Διμοιρία αυτοκινήτων (κίνηση αυτοκινήτων σε ομάδες).
  - Εναρμόνιση ταχύτητας.

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

- Έξυπνες διασταυρώσεις.
- Προηγμένα συστήματα υποστήριξης οδηγού.
  - Οπτική διαμέσου εμποδίων (“see through”).
  - Κοινή χρήση αισθητήρα υψηλής ευκρίνειας.
  - Χάρτες υψηλής ευκρίνειας σε πραγματικό χρόνο.
- Βελτίωση της οδικής ασφάλειας.
  - Υποβοήθηση στροφής (προς τα αριστερά ή τα δεξιά).
  - Ανακάλυψη ευάλωτων χρηστών του δρόμου.
- Αυτόνομη Οδήγηση.
  - Βοηθός τηλεχειρισμού για αυτόνομα οχήματα.
  - Συνεργατικός ελιγμός αυτόνομων οχημάτων.
  - Συνεργατική αντίληψη.
  - Συνεργατική ασφάλεια.
- Ευφυή Συστήματα Μεταφορών.
  - Ταχύτερη απόκριση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
  - Έξυπνοι αυτοκινητόδρομοι με αυτόνομες λωρίδες οδήγησης.
  - Δυναμική διαχείριση ροής κυκλοφορίας.

Τα συστήματα 5G έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (E2E), χαμηλή καθυστέρηση φυσικού επιπέδου και εξαιρετικά υψηλή (έως και 99,999%) αξιοπιστία [24].

Καθώς οι νέες περιπτώσεις χρήσης όπως η αυτόνομη οδήγηση και οι έξυπνες μεταφορές αυξάνονται, την επόμενη δεκαετία η ταχύτητα των οχημάτων μπορεί να αυξηθεί πολύ πέρα από το σημερινό όριο που έχει σχεδιαστεί για ανθρώπους οδηγούς, όπως για παράδειγμα να υπερβαίνει τα 100 μίλια την ώρα.

Ο γενικός εμπειρικός κανόνας, της διατήρησης απόστασης ασφαλείας 2 δευτερολέπτων μεταξύ διαδοχικών οχημάτων<sup>105</sup>, θα μπορούσε να επανακαθορισθεί σε σημαντικά μικρότερο χρόνο, βελτιώνοντας έτσι περαιτέρω την απόδοση της κυκλοφορίας.

Συνεργατικές επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων και των υπολογιστικών κόμβων των υποκείμενων υποδομών μπορούν να υποστηρίξουν νέες υπηρεσίες που βασίζονται στον ακριβή εντοπισμό θέσης και μπορούν να προσθέσουν ευφυΐα στα συστήματα μεταφορών.

---

<sup>105</sup> Ένας εμπειρικός κανόνας για τη μείωση της πιθανότητας σύγκρουσης είναι να τηρείται μια απόσταση 2 δευτερολέπτων μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στην ίδια λωρίδα κυκλοφορίας.

Πηγή: [https://web.archive.org/web/20120309213451/http://www.rotr.ie/rules-for-driving/speed-limits/speed-limits\\_2-second-rule.html](https://web.archive.org/web/20120309213451/http://www.rotr.ie/rules-for-driving/speed-limits/speed-limits_2-second-rule.html)

Σύμφωνα με αυτά τα νέα σενάρια, ο συντονισμός μεταξύ αυτόνομων οχημάτων, οχημάτων που οδηγούν άνθρωποι, πεζών και υποδομών μεταφορών (όπως π.χ. τα φανάρια, οι τηλεπικοινωνιακές (RSU) και υπολογιστικές μονάδες της υποδομής) θα απαιτήσουν ακόμη χαμηλότερα επίπεδα καθυστέρησης. Για παράδειγμα, μπορεί να δούμε απαιτήσεις όπως έως και 1 ms λανθάνοντος χρόνου από άκρο σε άκρο (E2E) ή 1/10 ms για το φυσικό επίπεδο, με 99,99999% αξιοπιστία σε περιβάλλοντα εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας, δεκάδων χιλιάδων κινητών ή σταθερών κόμβων συμπιεσμένων εντός περιοχής μερικών τετραγωνικών μιλίων με ή χωρίς υποστήριξη υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας [7].

Οι παραπάνω προκλήσεις επιβάλλουν την ανάπτυξη μια νέας δικτυακής υποδομής, ικανής ώστε να ανταποκρίνεται επαρκώς στα νέα σενάρια χρήσης και εφαρμογών, όπως η περίπτωση 5G V2X.

### 2.3. Αστικά Συστήματα Μεταφορών

Η συνεχιζόμενη τάση αστυφιλίας δημιουργεί μεγάλες προκλήσεις γύρω από τα συστήματα μεταφορών. Οι σημερινές πόλεις αν και καλύπτουν το 2% της επιφάνειας του πλανήτη, συμβάλλουν σε ποσοστό 71% έως 76% στις εκπομπές CO<sub>2</sub> [25]. Πάνω από το 50% του πληθυσμού ζει σε πόλη και αυτό αναμένεται να γίνει 68% έως το 2050. Στις πόλεις καταναλώνεται το 67% έως 76% της ενέργειας που παράγεται παγκόσμια [26].

Όσον αφορά στην οδική ασφάλεια 1,3 εκατομμύρια θάνατοι καταγράφονται ετησίως ενώ 20 με 50 εκατομμύρια τραυματίζονται [27]. Εκτός του ανθρώπινου πόνου και του κοινωνικού τιμήματος αυτό έχει και έναν οικονομικό αντίκτυπο \$305 δις [26] και η κύρια αιτία για αυτό είναι η κυκλοφοριακή συμφόρηση αφού το 40% των ατυχημάτων συμβαίνουν σε διασταυρώσεις και μάλιστα εντός αστικών περιοχών ([28], [29]).

Για όλους τους παραπάνω λόγους, ειδικά στις πόλεις υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης έξυπνων οδικών αρτηριών (Smart Roadways) και έξυπνου συστήματος μεταφορών (Intelligent Transportation System).

Η πολυπλοκότητα των εμπλεκόμενων συσκευών και ιδίως ο τεράστιος όγκος και η ποικιλία των ανταλλασσόμενων δεδομένων θέτουν νέες προκλήσεις. Για το σκοπό αυτό, η υπολογιστική στην άκρη του δικτύου (edge computing) η οποία μειώνει κατά πολύ τον όγκο των μεταφερόμενων δεδομένων στο cloud, μαζί με τις υφιστάμενες έξυπνες υποδομές μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο συντονισμό και την διαχείριση ενός έξυπνου συστήματος μεταφορών (ITS) [30].

Για την ενίσχυση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας, της απόδοσης, της εμπειρίας του χρήστη και της ποιότητας των υποδομών μεταφορών μίας πόλης, οι τεχνολογίες ITS «μεταφέρουν» το βάρος του υπολογισμού και των επικοινωνιών στις παρόδιες μονάδες (RSUs) καθιστώντας τες εξαιρετικά σημαντικές για την επίτευξη του συνολικού σκοπού.

Με αυτό τον τρόπο η διασύνδεση 5G V2I και I2P συνδυαζόμενη με υπολογισμούς στα δεδομένα πολλαπλών αισθητήρων και με ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης, μεταφέρεται στην εξοπλισμό που αφορά στη μεριά της υποδομής και ο οποίος θα πρέπει να υποστηρίζει σχετικές απαιτήσεις του αντίστοιχου συστήματος μεταφορών.

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

Επειδή οι περιπτώσεις χρήσεις ειδικά για τις οδικές διασταυρώσεις καλύπτουν πολλαπλούς - ενίοτε σύνθετους - τομείς και οι απαιτήσεις ποιότητας είναι εξαιρετικά υψηλές, καταβάλλεται προσπάθεια από όλους τους εμπλεκόμενους «παίκτες» της αγοράς (π.χ. κατασκευαστές προτύπων, αυτοκινητοβιομηχανίες, πάροχοι κινητής τηλεφωνίας κ.α.) για να υποστηρίζεται ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών ικανών ώστε να παράσχουν επαρκείς λύσεις (π.χ. C-V2X, 5G NR V2X, DSRC (Dedicated Short-Range Communications), NextGen Wi-Fi, ενίοτε και δίκτυα πέραν του 5G [26]).

### 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

#### 3.1. Κατηγορίες Οχημάτων

##### 3.1.1. Συνδεδεμένα Οχήματα (Connected Vehicles - CVs)

Τα συνδεδεμένα οχήματα (CVs) είναι συμβατικά οχήματα (οδηγούμενα από άνθρωπο), ενισχυμένα όμως με διάφορες τηλεματικές-ηλεκτρονικές συσκευές και συναφείς αναβαθμίσεις. Δύναται να υπάρχει διεπικοινωνία τόσο μεταξύ των οχημάτων, όσο και μεταξύ των οχημάτων και των υποδομών μέσω V2X συστημάτων. Επιπροσθέτως, οι εμπλεκόμενοι οδηγοί λαμβάνουν περισσότερες και συνθετότερες πληροφορίες.

Τα εν λόγω οχήματα έχοντας ενσωματωμένα κάποια επίπεδα αυτοματισμού δεν χρειάζεται απαραίτητα να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους ή με το δίκτυο, εάν μπορούν να διακρίνουν το περιβάλλον και να εκτελούν ορισμένες λειτουργίες. Από την άλλη πλευρά, εντούτοις, ενδέχεται τα συνδεδεμένα οχήματα να μην διαθέτουν αυτοματοποιημένες δυνατότητες. Οι δύο υφιστάμενες τεχνολογίες CVs & AVs (για τα αυτόνομα οχήματα βλέπε παρακάτω, στην ενότητα 2.1.2), ωστόσο, μπορεί να είναι συμπληρωματικές, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η πλήρης ή μερικώς αυτόνομη οδήγηση μπορεί να ενισχυθεί με συνδεσιμότητα για τη λήψη προειδοποιήσεων για αντικείμενα που είναι εκτός ορατότητας (π.χ. σε τυφλές διασταυρώσεις) και για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με το ευρύτερο κυκλοφοριακό περιβάλλον (π.χ. διακοπή της κυκλοφορίας σε κάποια χιλιόμετρα μπροστά).

Η ταχύτερη εξέλιξη της τεχνολογίας, έχει ως αποτέλεσμα τη σύγκλιση των συνδεδεμένων οχημάτων και των αυτόνομων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ευφύων οχημάτων [31] τα αποκαλούμενα και ως CAVs, τα οποία βελτιστοποιούν τα χαρακτηριστικά της αυτόνομης οδήγησης με επιπλέον πληροφορίες που αντλούν λόγω της δικτύωσής τους.

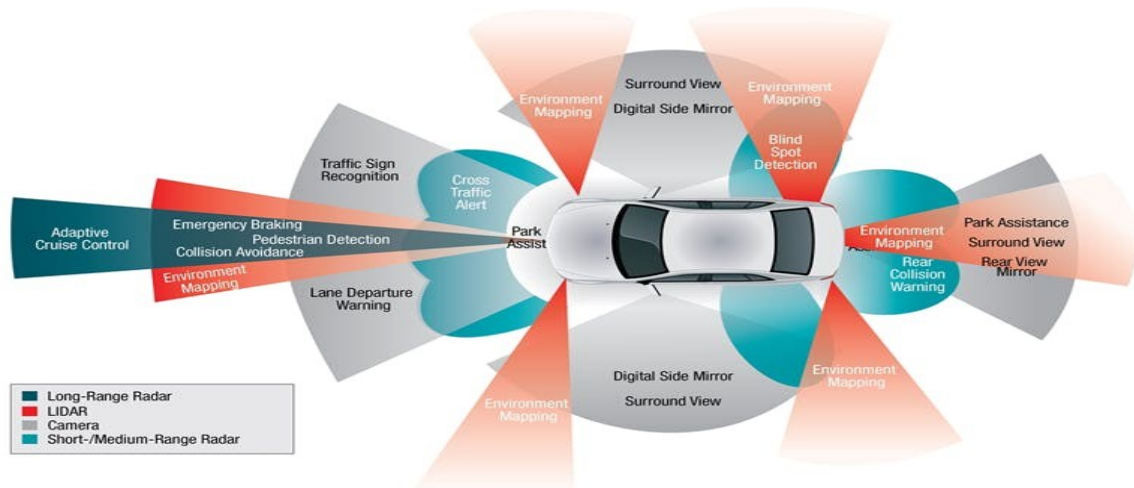
##### 3.1.2. Αυτόνομα Οχήματα (Automated Vehicles - AVs)

Τα αυτόνομα οχήματα χρησιμοποιούν συνδυασμό τεχνολογιών για τον εντοπισμό του περιβάλλοντός τους, συμπεριλαμβανομένων τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας, ανιχνευτών λέιζερ και ραντάρ, GPS, οδομέτρων, οπτικής αναγνώρισης και προηγμένων συστημάτων ελέγχου. Όλα τα συναφή δεδομένα συλλέγονται, αναλύονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και με υπολογιστικά συστήματα εκ βαθέων μάθησης (Deep Learning - DL) ώστε να επιτυγχάνεται η διάκριση μεταξύ διαφορετικών οχημάτων και ο εντοπισμός των κατάλληλων διαδρομών πλοήγησης λόγω τυχόν εμποδίων, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τους κανόνες οδήγησης.

Η ύπαρξη δεδομένων από πολλές διαφορετικές πηγές ενισχύει την επίγνωση της κατάστασης οχημάτων και των πλησίον αυτών πεζών και μπορεί να οδηγήσει σε βελτιώσεις της οδικής ασφάλειας. Επιπλέον, διευκολύνεται η συνεταιριστική οδήγηση και η γνώση της ακριβούς θέσης του οχήματος, στοιχεία απαραίτητα για την αυτόνομη οδήγηση.

Μερικοί τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα οχήματα και οι οποίοι εμφανίζονται στην Εικόνα 6 και στην Εικόνα 7, είναι<sup>106</sup>:

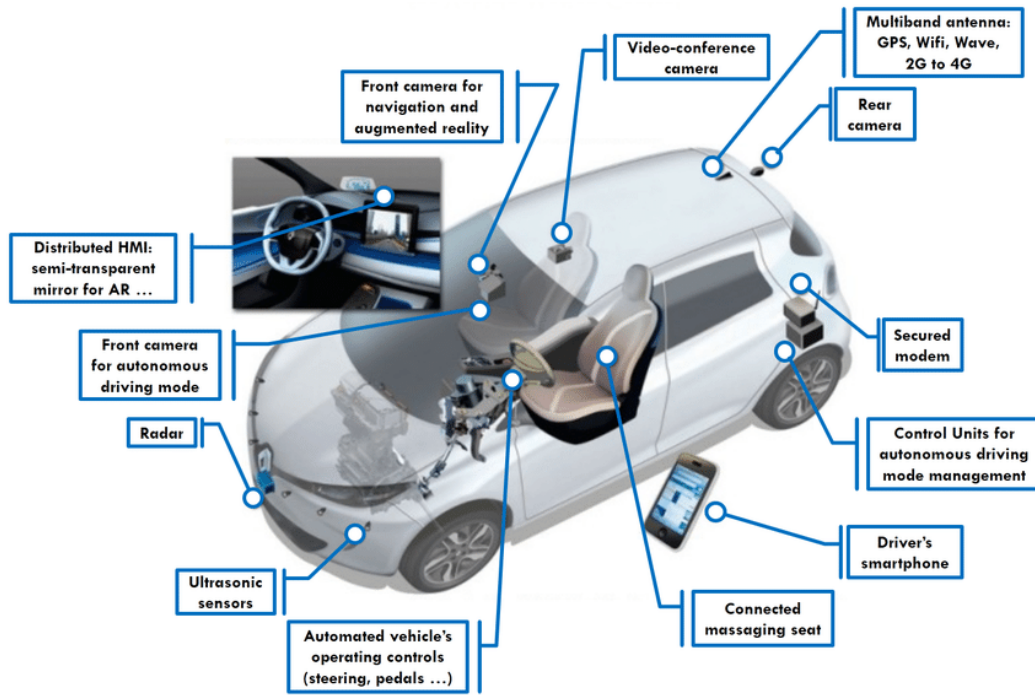
- **LIDAR** (Light Detection and Ranging): Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται φως από παλμικό laser για μέτρηση αποστάσεων. Σαρώνοντας μια περιοχή δημιουργείται ένα σύνολο σημείων που αναπαριστούν το φυσικό περιβάλλον στην ακτίνα της σάρωσης.
- **RADAR** (Radio Detection and Ranging): Εδώ χρησιμοποιούνται ραδιοκύματα για να προσδιοριστεί η απόσταση, η γωνία και η ταχύτητα αντικειμένων. Η εμβέλεια του είναι μικρότερη από του LIDAR αλλά και το κόστος του είναι πολύ μικρότερο.
- **GPS** (Global Positioning System): Δορυφορικό σύστημα γεωεντοπισμού με μεγάλη ακρίβεια και μεγάλη κάλυψη.
- **CAMERA**: Ένας από τους πιο σημαντικούς αισθητήρες των αυτόνομων οχημάτων. Χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας οπτικής αναγνώρισης και μηχανικής μάθησης τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιούν τις κάμερες για την ανίχνευση και την αναγνώριση αντικειμένων.



Εικόνα 6: Γραφική Αναπαράσταση του πεδίου κάλυψης των αισθητήρων ενός AV<sup>106</sup>

Τα αυτόνομα οχήματα απαιτούν ύψιστη αξιοπιστία και ελάχιστη καθυστέρηση μεταφοράς (σημαντικά κάτω από 1 ms). Επίσης, η εγκατάσταση όλο και περισσότερων αισθητήρων στα αυτόνομα οχήματα οδηγεί σε σημαντική αύξηση του όγκου των δεδομένων που απαιτούν λήψη και μετάδοση στο Διαδίκτυο και τα οποία φτάνουν σε τάξεις μεγέθους Terabytes ανά ώρα οδήγησης.

<sup>106</sup> Silverio, M. (2019, December): How to make a vehicle autonomous – Key aspects of autonomous vehicles. Available at: <https://towardsdatascience.com/how-to-make-a-vehicle-autonomous-16edf164c30f>



Εικόνα 7: Τυπικοί αισθητήρες ενός AV<sup>107</sup>

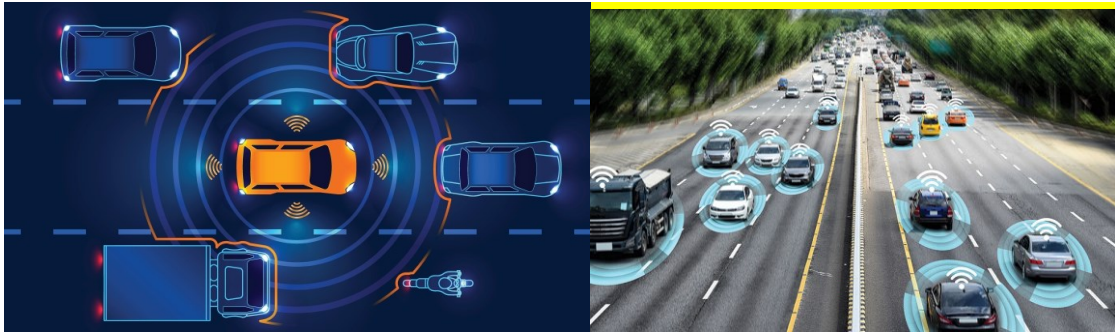
Ένα χαρακτηριστικό που μπορεί να αυξήσει κατακόρυφα την ασφάλεια των οχημάτων είναι η χρήση εκτεταμένων αισθητήρων (extended sensors<sup>108</sup>). Ως τέτοιοι ορίζονται αυτοί που προσφέρουν την ικανότητα σε ένα όχημα ώστε να αντλαμβάνεται τα αντικείμενα που το περιτριγυρίζουν, πέρα από τη χρήση των ιδίων αισθητήρων του.

Τα παρακείμενα οχήματα που αντλαμβάνονται αυτά τα αντικείμενα μεταδίδουν την πληροφορία ώστε να υπάρχει μια πληρέστερη εικόνα του συνολικού κυκλοφοριακού περιβάλλοντος (βλ. Εικόνα 8).

Τα δεδομένα τα οποία ένα όχημα μπορεί να μεταδώσει μπορεί να είναι π.χ. τα δεδομένα των αισθητήρων του, μια ή περισσότερες φωτογραφίες έως και ένα ζωντανό βίντεο.

<sup>107</sup> Kissai, M. (2019: Optimal Coordination of Chassis Systems for Vehicle Motion Control. Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Saclay, préparée à l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées et au Groupe Renault, 2019. NNT: 2019SACL004.

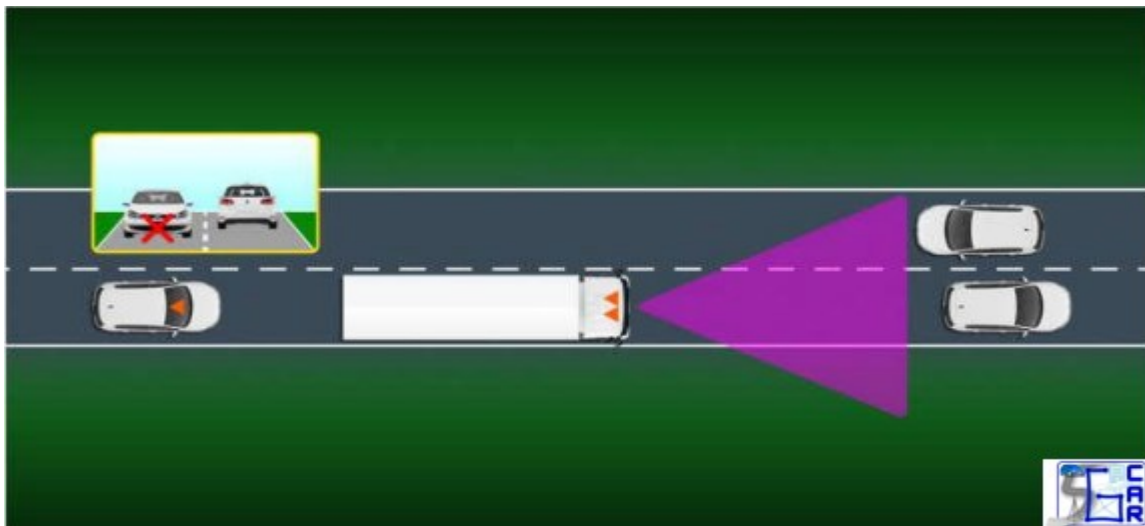
<sup>108</sup> The Third Generation partnership Project (3GPP): Technical Specification TS 22.186: Service Requirements for Enhance V2X Scenarios. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3180>



Εικόνα 8: Ατομικοί και εκτεταμένοι (διασυνδεδεμένοι) αισθητήρες<sup>109, 110</sup>

Οι εκτεταμένοι αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν εξαιρετικά σημαντικό έργο σε διασταυρώσεις/ράμπες ή όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες (για παράδειγμα βροχή, ομίχλη, χιόνι) επηρεάζουν την εμβέλεια των ιδίων αισθητήρων<sup>111</sup>.

Στην Εικόνα 9 φαίνεται το πώς η χρήση εκτεταμένων αισθητήρων μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη ατυχήματος κατά την προσπέραση αφού το πίσω όχημα (ή ο οδηγός του) αντιλαμβάνεται το όχημα που κινείται στο αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας αν και δεν έχει οπτική επαφή το ίδιο.



Εικόνα 9: Γραφική αναπαράσταση περίπτωσης συνεργατικής αντίληψης<sup>112</sup>

<sup>109</sup> Coldeywe, D. (2021): Startups look beyond lidar for autonomous vehicle perception. Available at: <https://techcrunch.com/2021/01/16/startups-look-beyond-lidar-for-autonomous-vehicle-perception/>

<sup>110</sup> Shacklett, M.E. (2019, May): LiDAR: Promise and Challenge in Autonomous Vehicles. Transworld Data. Available at: <https://www.pobonline.com/blogs/23-geodatapoint-blog/post/101923-lidar-promise-and-challenge-in-autonomous-vehicles>

<sup>111</sup> 5G Americas (2019): White Paper: Cellular V2X Communications Towards 5G. Available at: [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/2018\\_5G\\_Americas\\_White\\_Paper\\_Cellular\\_V2X\\_Communications\\_Towards\\_5G\\_Final\\_for\\_Distribution.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/2018_5G_Americas_White_Paper_Cellular_V2X_Communications_Towards_5G_Final_for_Distribution.pdf)

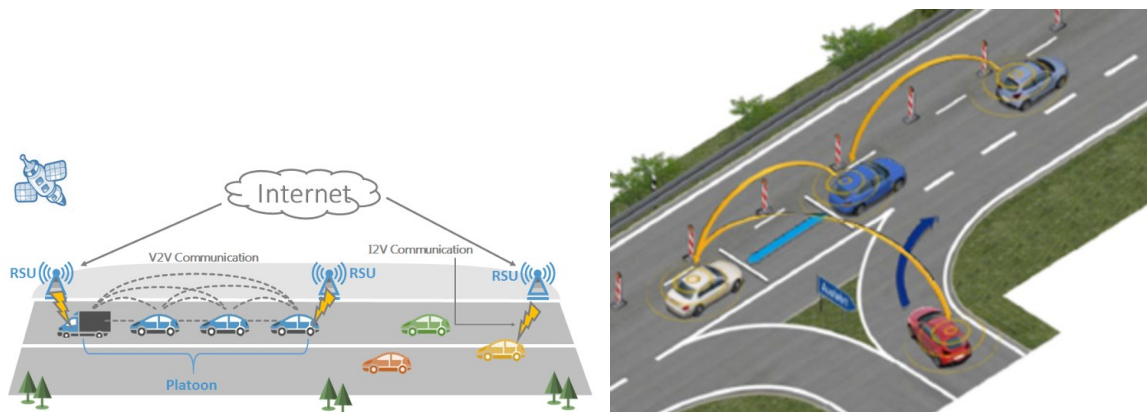
<sup>112</sup> Nokia (2019): Use Cases for 3GPP Based V2X and Combined Solutions. Available at: [https://docbox.etsi.org/Workshop/2019/201903\\_ITSWS/SESSION03/NOKIA\\_Gundlach.pdf](https://docbox.etsi.org/Workshop/2019/201903_ITSWS/SESSION03/NOKIA_Gundlach.pdf)



### 3.1.3. Διασυνδεδεμένα Αυτόνομα Οχήματα (Connected Autonomous Vehicles - CAVs)

Τα διασυνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα (CAVs) είναι οχήματα που συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά τόσο των αυτόνομων όσο και των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Επομένως, περιλαμβάνουν συστήματα αυτοματοποιημένης οδήγησης η οποία συνδυάζεται με τη διεπικοινωνία μεταξύ των οχημάτων (V2V), μεταξύ των οχημάτων και των υποδομών μέσω V2I συστημάτων, μεταξύ των οχημάτων και του “Cloud”, μεταξύ των οχημάτων και πεζών (V2P) και μεταξύ οχημάτων και άλλων συστημάτων (V2X).

Οι τεχνολογίες 5G ενισχύουν τα σενάρια της συνεργατικής και της αυτόνομης οδήγησης στα οποία οι πληροφορίες αισθητήρων θα ανταλλάσσονται σε πραγματικό χρόνο μεταξύ χιλιάδων αυτοκινήτων που βρίσκονται στην ίδια περιοχή (βλ. Εικόνα 10). Έτσι, τα δίκτυα 5G αναμένεται να παρέχουν επικοινωνίες με αυξημένη κάλυψη, αξιοπιστία και απόδοση σε σύγκριση με τις σημερινές τεχνολογίες.



Εικόνα 10: Συνεργατική οδήγηση<sup>113, 114</sup>

### 3.1.4. Παρακολούθηση Διασταυρώσεων και Χρήση V2I

Η ενεργητική παρακολούθηση των διασταυρώσεων παρέχει στον οδηγό ή/και στο ευφυές σύστημα ενός αυτόνομου οχήματος ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ώστε να αντιδράσει έγκαιρα, πριν ακόμα μια ανεπιθύμητη ή προβληματική κατάσταση γίνει αντιληπτή.

Αυτό σημαίνει ότι η τεχνολογία επιτρέπει στους οδηγούς να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα και να αποφεύγουν «κρίσιμες» καταστάσεις.

Αισθητήρες LiDAR, ραντάρ και κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό πεζών και οχημάτων περιμετρικά της διασταύρωσης και οι πληροφορίες που

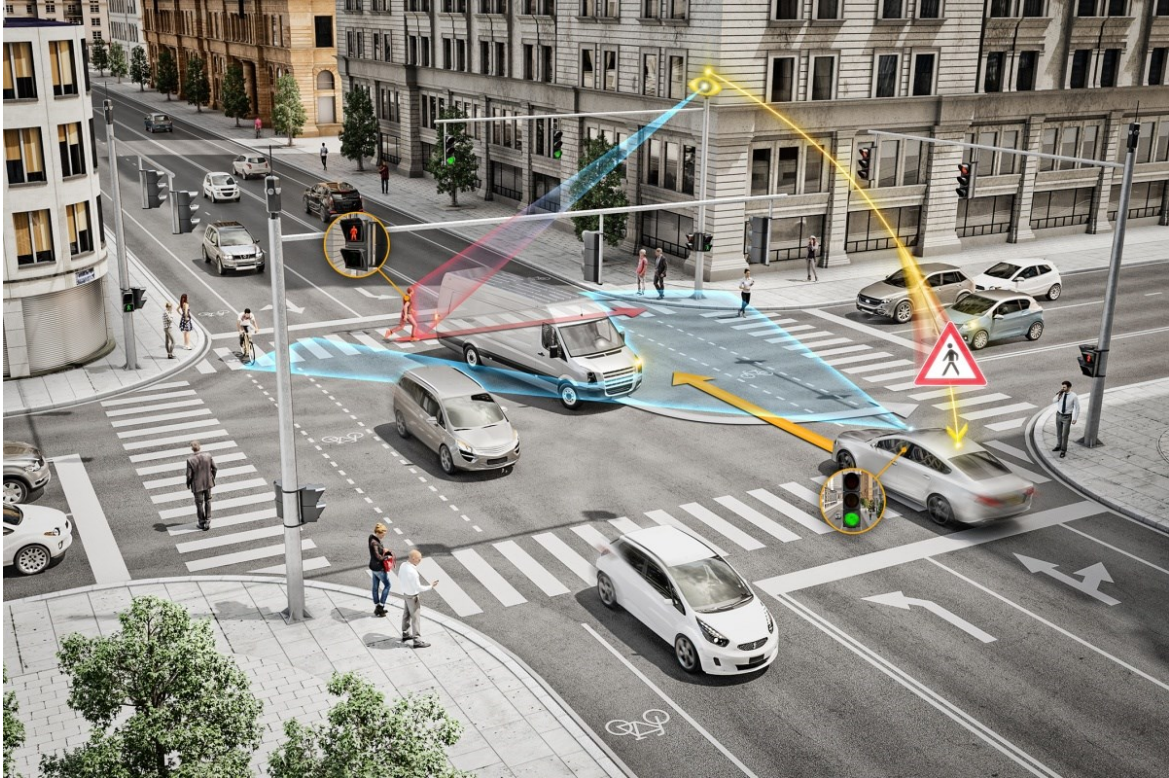
<sup>113</sup> Gao, L., Ruan, N., & Zhu, H. (2016): Efficient and secure message authentication in cooperative driving: A game theoretic approach. In: *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference of Communications (ICC 2016)*, doi: 10.1109/ICC.2016.7510673.

<sup>114</sup> Car2Car Communication Consortium. <https://www.car-2-car.org/about-c-its/>

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

συλλέγονται μεταδίδονται σε οχήματα που προσεγγίζουν ώστε να προειδοποιήσουν κατάλληλα τους οδηγούς (βλ. Εικόνα 11).

Οι ανωτέρω πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για να αποφευχθεί πιθανή σύγκρουση όσο και για να βελτιστοποιηθεί η ακολουθούμενη πορεία για την διέλευση από τη διασταύρωση.



Εικόνα 11: Διαλειτουργικότητα συστημάτων V2X και αισθητήρων σε μια έξυπνη διασταύρωση<sup>115</sup>

### 3.1.5. Πρόσθετες Απαιτήσεις Ασφάλειας των CAVs

Τα χαρακτηριστικά της διασυνδεσιμότητας μεταξύ των οχημάτων αλλά και τα ηλεκτρονικά συστήματα των αυτόνομων και ημιαυτόνομων<sup>116</sup> οχημάτων συνεπάγονται την ύπαρξη πληθώρας ηλεκτρονικών συσκευών και δικτύων επικοινωνίας εξαιτίας των οποίων αναφύονται νέοι κίνδυνοι και απειλές στο επίπεδο της κυβερνοαφάλειας [32].

Στο παρελθόν έχουν αναφερθεί εξ αποστάσεως επιθέσεις στις κάμερες και στα συστήματα LiDAR των οχημάτων<sup>117</sup>, οι οποίες οδηγούν σε φαινόμενα δυσλειτουργίας των αισθητήρων, άλλοτε εμφανίζοντας αντικείμενα του πραγματικού κόσμου σε σημεία

<sup>115</sup> Βλέπε: <https://www.smartcitiesworld.net/news/news/smart-intersection-aims-to-increase-safety-2422>

<sup>116</sup> Ημιαυτόνομα καλούνται τα αυτόνομα οχήματα στα οποία υπάρχει οδηγός για να παρέμβει σε έκτακτες περιπτώσεις

<sup>117</sup> Petit, J., Stottelaar, B., Feiri, M., & Kargl, F. (2015): Remote Attacks on Automated Vehicle Sensors: Experiments on Camera and LIDAR. Available at: <https://www.blackhat.com/docs/eu-15/materials/eu-15-Petit-Self-Driving-And-Connected-Cars-Fooling-Sensors-And-Tracking-Drivers-wp1.pdf>

διαφορετικά από αυτά στα οποία βρίσκονται στην πραγματικότητα και άλλοτε κατασκευάζοντας εξ ολοκλήρου τα δικά τους αντικείμενα. Εκτός όμως από τα σενάρια κακόβουλων δράσεων σε αισθητήρες, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι προσβολών, όπως π.χ. η εξαπάτηση των συστημάτων γεωεντοπισμού που χρησιμοποιούν συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών (GNSS)<sup>118</sup> και η εξαπάτηση συστημάτων που βασίζονται σε AI, όπως συνέβη στην περίπτωση ενός αυτο-οδηγούμενου οχήματος σχεδιάζοντας έναν κύκλο κιμωλίας γύρω από αυτό<sup>119</sup>.

Οι επιθέσεις που στοχεύουν σε έξυπνα αυτοκίνητα μπορεί δυνητικά να επιφέρουν ακινητοποίηση των οχημάτων, τροχαία ατυχήματα, οικονομικές απώλειες, αποκάλυψη ευαίσθητων ή/και προσωπικών δεδομένων, ακόμα και να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των χρηστών του δρόμου. Επομένως, επιβάλλεται η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για τον μετριασμό των κινδύνων, ειδικά με δεδομένο ότι οι συγκεκριμένες επιθέσεις απειλούν την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα τόσο των επιβαινόντων στο όχημα όσο και των υπόλοιπων χρηστών του δρόμου, συμπεριλαμβανομένων των πεζών [32].

### 3.2. Επίπεδα Αυτοματοποιημένης Κινητικότητας στην Ε.Ε.<sup>120</sup>

Η Society of Automotive Engineers (SAE) έχει καθορίσει τα επίπεδα αυτοματισμού των οχημάτων, διακρίνοντας 6 επίπεδα (Εικόνα 12).

Τα οχήματα κατατάσσονται αναλόγως των χαρακτηριστικών τους στα παρακάτω επίπεδα [33]:

- Στο επίπεδο 0 ανήκουν τα οχήματα τα οποία δεν διαθέτουν κάποιο είδους αυτοματισμού και ο οδηγός φέρει την πλήρη ευθύνη. Κάποια συστήματα υποβοήθησης μπορεί να υπάρχουν αλλά αυτά είναι κυρίως προειδοποιητικά και όχι παρεμβατικά (π.χ. έλεγχος σταθερότητας, προειδοποίηση σύγκρουσης, προειδοποίηση τυφλού σημείου).
- Στο επίπεδο 1 ανήκουν τα οχήματα τα οποία διαθέτουν συστήματα υποβοήθησης του οδηγού αλλά ο οδηγός φέρει την πλήρη ευθύνη και για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση αυτών. Τα οχήματα πρέπει να διαθέτουν τουλάχιστον ένα σύστημα υποβοήθησης της κατεύθυνσης ή της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης (π.χ. Adaptive Cruise Control, lane-centering assistance και lane-following assistance).

---

<sup>118</sup> Zeng, K., Liu, S., Shu, Y., Wang, D., Li, H., et al. (2018, August) : All your GPS are belong to us : Towards stealthy manipulation of road navigation systems. In : *Proceedings of the 27th USENIX Conference on Security Symposium*, pp.1527-1544. USENIX Association. Available at: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity18/presentation/zeng>

<sup>119</sup> The European Union Agency for Cybersecurity (ENISA) (2019): ENISA good practices for security of Smart Cars. Available at: <https://www.enisa.europa.eu/publications/smart-cars>

<sup>120</sup> Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2019): Αυτόνομα αυτοκίνητα στη Ε.Ε.: Από επιστημονική φαντασία ... σε απτή πραγματικότητα (Άρθρο). Αριθμός αναφοράς: 20190110STO23102. Διαθέσιμο σε: [https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/1/story/20190110STO23102/20190110STO23102\\_el.pdf](https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/1/story/20190110STO23102/20190110STO23102_el.pdf)

- Στο επίπεδο 2 ανήκουν τα οχήματα τα οποία διαθέτουν συστήματα ADAS (Advanced Driving Assistance Systems) τα οποία κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αναλαμβάνουν τον έλεγχο του τιμονιού, της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης (π.χ. Highway Driving Assist). Ο οδηγός είναι σε εγρήγορση και έχει την εποπτεία των συστημάτων αυτών. Στην πλειονότητα των συστημάτων ο οδηγός έχει τα χέρια στο τιμόνι αλλά σε κάποια συστήματα (π.χ. BlueCruise της Ford) μπορεί προσωρινά και σε συγκεκριμένους δρόμους να το αφήνει.
- Στο επίπεδο 3 ανήκουν τα οχήματα τα οποία διαθέτουν διάφορα συστήματα αυτόνομης οδήγησης και τεχνητής νοημοσύνης ώστε να μπορούν να παίρνουν αποφάσεις υπό πραγματικές συνθήκες. Οι άνθρωποι εντός του οχήματος δεν χρειάζεται να το παρακολουθούν, αλλά η παρουσία οδηγού είναι απαραίτητη ειδικά για να παρέμβει σε περίπτωση αστοχίας κάποιου συστήματος.
- Στο επίπεδο 4 ανήκουν τα οχήματα τα οποία δεν απαιτούν οδηγό κατά τη χρήση τους οπότε δεν απαιτείται καν να διαθέτουν τιμόνι και πετάλια. Σε περίπτωση βλάβης σταματούν μόνα τους. Τα οχήματα αυτής της κατηγορίας προγραμματίζονται να ακολουθήσουν μια διαδρομή μεταξύ δύο σημείων και η διαδρομή τους περιορίζεται γεωγραφικά. Οι κύριες εφαρμογές τους είναι τα ταξί, τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς και τα φορτηγά χωρίς οδηγό. Κάτω από κάποιες προϋποθέσεις (π.χ. άσχημες καιρικές συνθήκες) μπορεί να σταματήσει η αυτόματη παροχή της υπηρεσίας.
- Στο επίπεδο 5 ανήκουν τα οχήματα τα οποία μπορούν να εκτελούν δρομολόγια πλήρως αυτοματοποιημένα κάτω από όλες τις συνθήκες, χωρίς να επηρεάζονται από καιρικές συνθήκες και χωρίς η διαδρομή τους να περιορίζεται σε γεωγραφικά όρια. Εδώ ο άνθρωπος απλά εισαγάγει τον προορισμό και το όχημα οδεύει προς αυτόν.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) τα συστήματα υποβοήθησης οδηγού (επίπεδα αυτοματισμού 1 και 2) αποτελούν ήδη πραγματικότητα. Τα αυτόνομα οχήματα (επίπεδα 3 και 4) βρίσκονται, προς το παρόν, κυρίως σε δοκιμαστικό στάδιο και προβλέπεται να κάνουν την εμφάνισή τους στην αγορά μεταξύ του 2021 και του 2030. Η Honda είναι η 1<sup>η</sup> που έχει πάρει έγκριση στην Ιαπωνία για όχημα επιπέδου 3 [34] ενώ η Mercedes πήρε πολύ πρόσφατα έγκριση (12/2021) και προβλέπει το 2022 να κυκλοφορήσει στην αγορά όχημα επιπέδου 3 [35].

Τα πλήρως αυτοματοποιημένα οχήματα (επίπεδο 5) αναμένονται για μετά το 2030.

Η πλήρης συνδεσιμότητα όλων των νέων οχημάτων αναμένεται να επιτευχθεί τα προσεχή έτη.

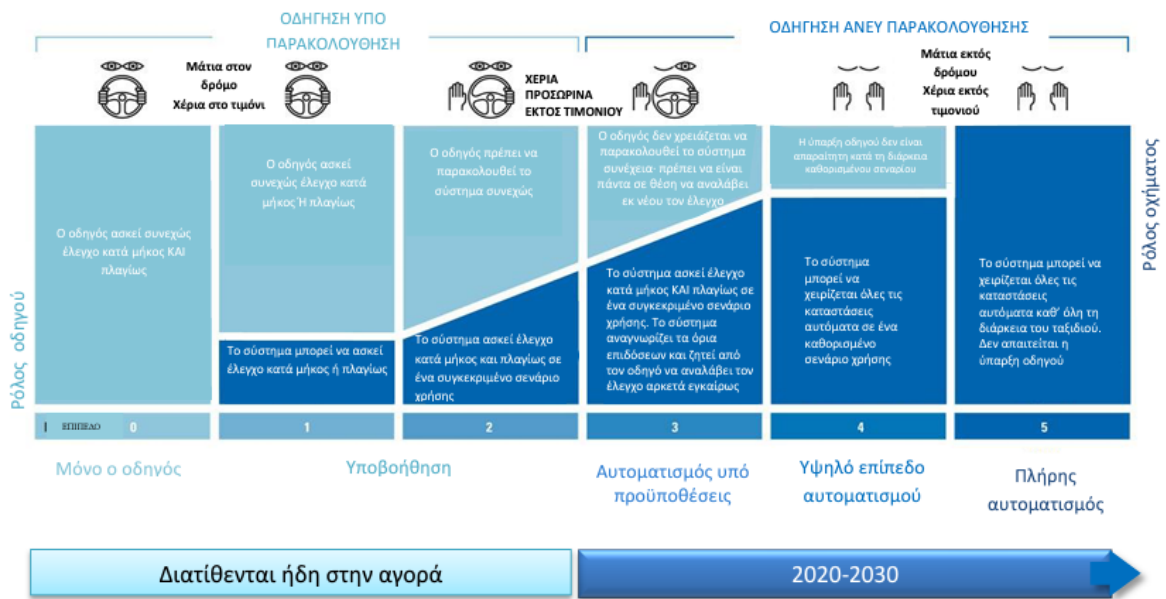
Τα αυτοματοποιημένα οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογικά συστήματα υποβοήθησης οδηγού ώστε όλες οι λειτουργίες οδήγησης να μεταβιβαστούν σε αυτοματοποιημένο σύστημα.

Τα μη επανδρωμένα οχήματα συνιστούν αυτόνομα οχήματα επιπέδου 3, 4 ή 5.

Τα συνδεδεμένα οχήματα είναι εξοπλισμένα με συσκευές που επιτρέπουν την επικοινωνία με άλλα οχήματα ή με τους διάφορους διαχειριστές υποδομής μέσω διαδικτύου.

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

Οι τεχνολογίες αυτοματοποίησης και συνδεσιμότητας είναι «συμπληρωματικές» και όλα τα αυτοματοποιημένα οχήματα ενδέχεται να είναι συνδεδεμένα στο κοντινό μέλλον.



Εικόνα 12: Επίπεδα αυτοματισμού (πηγή: Society of Automotive Engineers - SAE<sup>121</sup>)

<sup>121</sup> Για τον πλήρη ορισμό των επιπέδων σύμφωνα με την Society of Automotive Engineers, βλέπε σχετικά: [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_202104](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104).

## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ & ΕΞΥΠΝΟΙ ΔΡΟΜΟΙ

### 4.1. Εισαγωγή

Πάρα πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τις προσπάθειες για να σχεδιάσουν και αναπτύξουν «έξυπνες πόλεις»<sup>122, 123, 124</sup>. Στην Κίνα υπάρχουν σε εξέλιξη τουλάχιστον 300 έργα έξυπνων πόλεων με συμμετοχή τόσο του κρατικού όσο και του ιδιωτικού τομέα. Στην Ινδία αντίστοιχα τρέχουν πάνω από 100 έργα<sup>125</sup> έξυπνων πόλεων [36].

Τον Οκτώβριο του 2015, η Ομάδα Μελέτης 5 της ITU-T αφού ανέλυσε πάνω από 100 ορισμούς για την «έξυπνη πόλη» κατέληξε στον ακόλουθο ορισμό της «Έξυπνης Βιώσιμης Πόλης»<sup>126</sup>: «Μια έξυπνη βιώσιμη πόλη είναι μια καινοτόμος πόλη που χρησιμοποιεί τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) και άλλα μέσα για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, της αποτελεσματικότητας της αστικής λειτουργίας και των υπηρεσιών και της ανταγωνιστικότητας, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι ανταποκρίνεται στις ανάγκες των σημερινών και των μελλοντικών γενεών με σεβασμό στις οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές καθώς και πολιτιστικές πτυχές» [37].

Ορισμένοι κατ' αναλογία ορισμοί έχουν επίσης προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία<sup>127, 128, 129</sup>.

Οι τρεις τομείς που χαρακτηρίζουν τις έξυπνες πόλεις<sup>130</sup> είναι: (i) Οι μεταφορές, (ii) η υγεία και (iii) η διαβίωση. Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε αποκλειστικά στις μεταφορές για τις έξυπνες πόλεις<sup>131</sup>. Συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε τις προόδους των τελευταίων δεκαετιών στους έξυπνους δρόμους, παγκοσμίως.

Ενώ οι μεταφορές αντιμετωπίζονται συνήθως ως ένα κλασικό πρόβλημα πολιτικής και δομικής μηχανικής, καθίστανται όλο και περισσότερο «ψηφιακά ενεργοποιημένες» με τη χρήση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών.

---

<sup>122</sup> Camero, A., & Alba, E. (2019): Smart City and information technology: A review. *Cities*, vol.93, pp.84-94. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.014>

<sup>123</sup> Caird, S.P., & Hallett, S.H. (2019): Towards evaluation design for smart city development. *Journal of Urban Design*, vol.24, issue 2, pp.188-209. <https://doi.org/10.1080/13574809.2018.1469402>

<sup>124</sup> Anthopoulos, L. (2019): Smart City Emergence: Cases From Around the World; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.

<sup>125</sup> Toh, C.-K., Sanguesa, J. A., Cano, J.C., & Martinez, F.J. (2020): Advances in smart roads for future smart cities. *Proceedings of the Royal Society*, A476, pp.1-24. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0439>

<sup>126</sup> ITU Study Group on Smart Cities (2015, October): ITU/Focus Group on Smart Sustainable Cities Available at: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ssc/Pages/default.aspx>

<sup>127</sup> European Commission: Smart Cities. Available at: [https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities\\_en](https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en)

<sup>128</sup> British Standard Institution (2015, February): Smart Cities Overview. Guide. BSI Standards Publication. Available at: <https://shop.bsigroup.com/products/smart-cities-overview-guide/standard>

<sup>129</sup> International Electrotechnical Commission (IEC) (2019, June): Strategic Business Plan (SBP) SMB/6817/R. Available at: <https://www.iec.ch/public/miscfiles/sbp/SYCSMARTCITIES.pdf>

<sup>130</sup> Lai, C.S., Jia, Y., Dong, Z., Wang, D., Tao, Y., Lai, Q.H., Wong, R.T.K., Zobia, A.F., Wu, R., & Lai, L.L. (2020): A Review of Technical Standards for Smart Cities. *Clean Technologies*, vol.2, no.3, pp.290-310. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2030019>

<sup>131</sup> Guevara, L., & Cheein, F.A. (2020): The role of 5G technologies: Challenges in smart cities and intelligent transportation systems. *MDPI, Sustainability*, vol.12, no.16, 6469. <https://doi.org/10.3390/su12166469>

Τα τρέχοντα κυκλοφοριακά προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα η κοινωνία μας περιλαμβάνουν: (i) κυκλοφοριακή συμφόρηση, (ii) οδικά ατυχήματα, (iii) ρύπανση, (iv) κόστος καυσίμων, (v) έλλειψη καυσίμων, (vi) υψηλό κόστος ασφάλισης και (vii) άλλου είδους προβλήματα. Η αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις σε συνδυασμό με την αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων, των ποδηλάτων, των μοτοσικλετών και των χρηστών του δρόμου εν γένει έχει αυξήσει σημαντικά τον κίνδυνο ατυχημάτων, κυκλοφοριακής συμφόρησης, κτλ. Ως εκ τούτου, έχει διατεθεί σημαντική προσπάθεια και έχει συντελεστεί αρκετή πρόοδος τις τελευταίες δεκαετίες, για την αντιμετώπιση ορισμένων από αυτά τα προβλήματα.

Οι έξυπνες μεταφορές γενικά περιλαμβάνουν: (i) Έξυπνους δρόμους, (ii) έξυπνα φώτα δρόμου, (iii) έξυπνα αυτοκίνητα και (iv) έξυπνα σήματα κυκλοφορίας. Στην προσπάθεια για επίτευξη μηδενικών εκπομπών άνθρακα και για την αντιμετώπιση των υψηλών τιμών της βενζίνης, έχουν κάνει την εμφάνισή τους τα ηλεκτρικά οχήματα (Electrical Vehicles - EVs). Επίσης, με την υποστήριξη μεγάλων εταιρειών όπως η GOOGLE και η UBER, σχεδιάζονται, δημιουργούνται και δοκιμάζονται αυτόνομα οχήματα (Autonomous Vehicles - AVs). Ορισμένες εταιρείες φτάνουν ακόμη και στο σχεδιασμό και την κατασκευή ιπτάμενων αυτοκινήτων<sup>132</sup> [38]. Όλα αυτά τροφοδοτούνται περαιτέρω από εταιρείες που εργάζονται σε προηγμένα συστήματα υποστήριξης οδηγού (ADAS), λύσεις φόρτισης οχημάτων και εταιρείες ημιαγωγών που παράγουν ισχυρά πλινθισύνολα (chipsets) τεχνητής νοημοσύνης.

Στην πραγματικότητα, εισερχόμαστε στην εποχή όπου ο «αυτοκινητόδρομος των πληροφοριών» (συνδεσιμότητα, Διαδίκτυο και υπολογιστικό νέφος) συναντά τον «αυτοκινητόδρομο των μεταφορών». Οι δρόμοι δεν θεωρούνται πλέον απλά μια φυσική οντότητα ή στέρεο έδαφος. Αναβαθμίζονται με δυνατότητες επικοινωνίας, ευφυΐα και ικανότητα αίσθησης, στοιχεία τα οποία δεν ήταν εφικτά πριν από μερικές δεκαετίες. Και ενώ οι αρχικές προσεγγίσεις επικεντρώθηκαν κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες, φαίνεται να υπάρχουν διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις για νέα αρχιτεκτονική, συστήματα και εφαρμογές.

Ενδεικτικά, κάποιες από τις υφιστάμενες εξελίξεις όπως αναδείχθηκαν τα τελευταία χρόνια σχετικά με τους έξυπνους δρόμους, αναλύονται στη συνέχεια.

## 4.2. Δρόμοι που Συσσωρεύουν Ενέργεια

Έως τώρα ο δρόμος θεωρείται ένα ανενεργό στοιχείο που προσφέρει απλά τη διασύνδεση δύο σημείων κατά τρόπο αξιοποιήσιμο από τα οχήματα. Υπάρχουν, εντούτοις, αρκετές ιδέες κατά τις οποίες οι δρόμοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα για συσσώρευση ενέργειας και αρκετές χώρες έχουν ξεκινήσει προσπάθειες για τη σχεδίαση και την υλοποίηση συναφών λύσεων<sup>133, 134, 135</sup>.

---

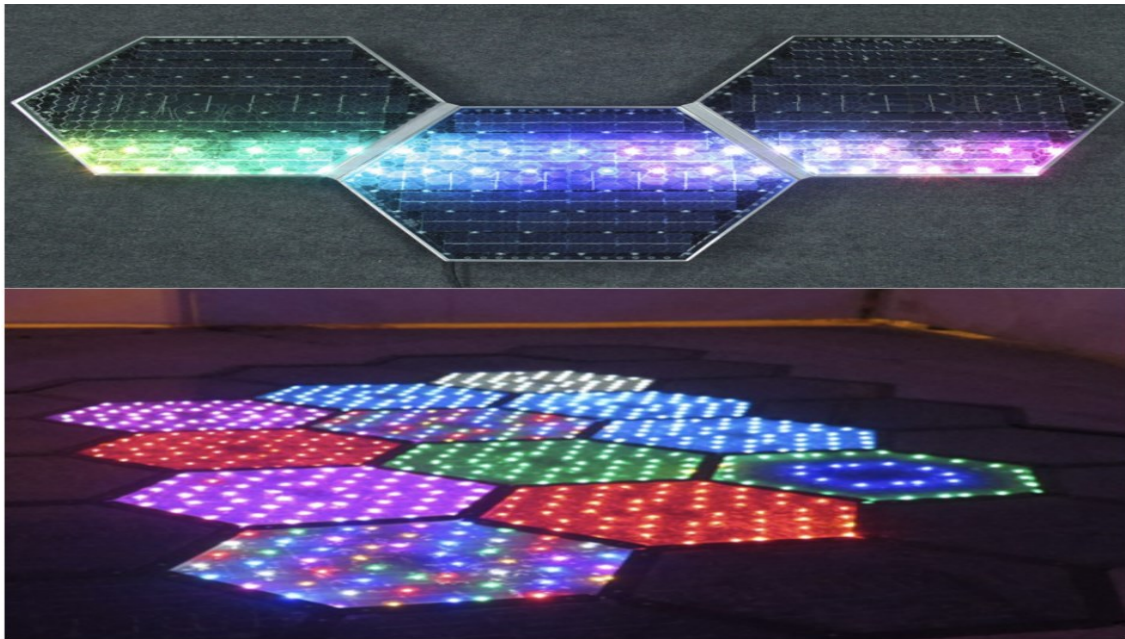
<sup>132</sup> Terrafugia Inc. <https://terrafugia.com/>

<sup>133</sup> Lirong, W., Jinwoo, P., et al. (2014, November): On-Road Energy Harvesting from Running Vehicles. Final Report. University Transportation Research Center - Region 2. Available at: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/31201>

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι με τις οποίες θα μπορούσε να συλλεχθεί ενέργεια από τους δρόμους. Κάποιες χρησιμοποιούν ηλιακούς συλλέκτες [39] (έτσι δημιουργήθηκε και ο όρος *ηλιακός δρόμος*<sup>136</sup>) ενώ άλλες εκμεταλλεύονται τις δονήσεις των διερχομένων οχημάτων<sup>137</sup>.

Η ενέργεια που συλλέγεται από τους ηλιακούς δρόμους<sup>138</sup> μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του φωτισμού ή/και των φαναριών κυκλοφορίας ή/και να μεταπέσει στο δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού.

Η ενέργεια θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για φωτισμό των ορίων των λωρίδων κυκλοφορίας ή για το λιώσιμο του χιονιού ή του πάγου, το χειμώνα. Στους δρόμους αυτούς τα φωτοβολταϊκά πάνελς τοποθετούνται στην επιφάνεια ώστε να συλλέγουν το ηλιακό φως, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Φωτοβολταϊκά πάνελς για τοποθέτηση στην επιφάνεια των δρόμων<sup>139</sup>

<sup>134</sup> Li, R., Yicheng, X., Pei, J., and Xiaokang, Z. (2014): The Theoretical Research about The Piezoelectric Material's Generating Capacity on Road. *Applied Mechanics and Materials*, vol.470, pp.807-813, doi:10.4028/www.scientific.net/amm.470.807.

<sup>135</sup> Abramovich, H. (2009, August): Energy Harvesting From Roads and Airport Runways. US Patent Office. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/93/fe/9b/36097162f2c0d2/CA2715129A1.pdf>

<sup>136</sup> The Institution of Engineering and Technology (IET) (2018, September): Is it the end of the road for asphalt and concrete? Available at: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2018/09/is-it-the-end-of-the-road-for-asphalt-and-concrete/>

<sup>137</sup> Ennawaoui, C., Lifi, H., Hajjaji, A., Azim, A.-E., Elballouti, A., & Rguiti, M. (2018): New System to Harvest Road Energy Using Piezoelectric Polymers. *Sensor Letters*, vol.16, no.1, pp.41-47. <https://doi.org/10.1166/sl.2018.3932>

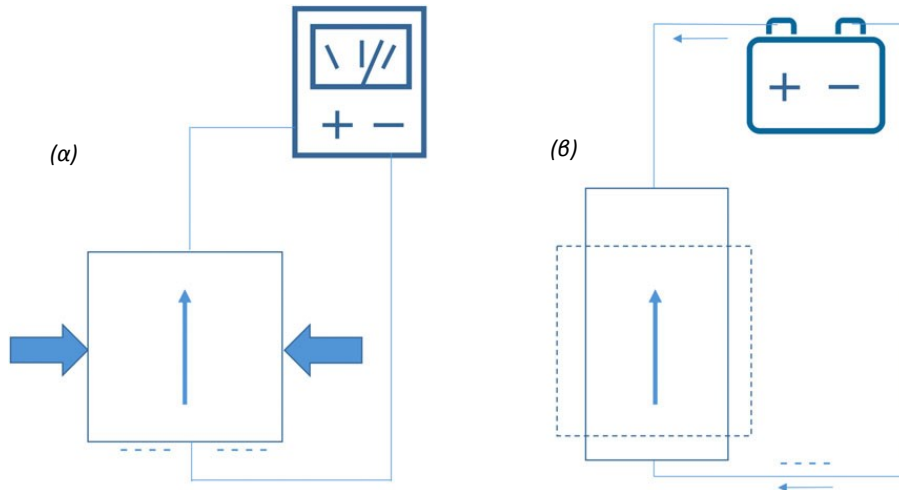
<sup>138</sup> Xiang, B., Yuan, Y., Ji, Y., Cao, X., & Zhou, J. (2020): Thermal and electrical performance of a novel photovoltaic-thermal road. *Solar Energy*, vol.199, pp.1-18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.021>



Οι πιεζοηλεκτρικοί δρόμοι [40] χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους τοποθετημένους περίπου 5 cm κάτω από την ασφάλτο οι οποίοι παραμορφώνονται ελαφρώς κατά τη διέλευση των οχημάτων από πάνω τους<sup>140</sup>.

Εννοείται ότι η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για δρόμους με πολλή κίνηση και υπολογίζεται ότι 1 km τέτοιου δρόμου θα μπορούσε να αποδώσει ισχύ 400 KW η οποία θα κάλυπτε τις ανάγκες 162 οικιών των ΗΠΑ<sup>141</sup> [36].

Στην Εικόνα 14 εξηγείται η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου.



Εικόνα 14: Λειτουργία πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου

(α): Η μηχανική καταπόνηση δημιουργεί ηλεκτρική τάση

(β): Αντίστροφα, η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης επιφέρει μηχανική παραμόρφωση

Στους δρόμους αυτούς η ροή κυκλοφορίας (οχήματα / ώρα) επηρεάζει ανάλογα την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, οπότε η τεχνολογία αυτή αποδίδει καλύτερα σε δρόμους με μεγάλο φόρτο κυκλοφορίας.

### 4.3. Δρόμοι που Παράγουν Μουσική - Μουσικοί Δρόμοι

Οι μουσικοί δρόμοι μπορούν να παράγουν μουσική ή ήχους όταν διέρχονται οχήματα<sup>142</sup>. Το Hokkaido Industrial Research Institute της Ιαπωνίας έχει αναπτύξει ένα σύστημα κατά

<sup>139</sup> Toh, C.-K., Sanguesa, J. A., Cano, J.C., Martinez, F.J. (2020): Advances in smart roads for future smart cities. *Proceedings of the Royal Society*, A476, pp.1-24. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0439>

<sup>140</sup> Kokkinopoulos, A., Vokas, G., & Papageorgas, P. (2014): Energy Harvesting Implementing Embedded Piezoelectric Generators – The Potential for the Attiki Odos Traffic Grid. *Energy Procedia*, vol.50, pp.1070-1085, doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.126.

<sup>141</sup> Toh, C.-K., Sanguesa, J.A., Cano, J.C., & Martinez, F.J. (2020): Advances in smart roads for future smart cities. *Proceedings of the Royal Society*, A476, pp.1-24. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0439>

<sup>142</sup> Zhou, M., Huang, D., Hu, Y., Zhou, L., & An, L. (2022, February): Musical roads: Design, construction and potential economic and safety benefits. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, vol.75, issue 1, pp.34-42. <https://doi.org/10.1680/jtran.18.00136>, <https://www.researchgate.net/>

το οποίο τα διερχόμενα οχήματα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μουσικής<sup>143</sup>. Η βασική ιδέα είναι η χρήση αυλακώσεων ή λωρίδων κρότου, οι οποίες απέχουν συγκεκριμένα διαστήματα στην επιφάνεια του δρόμου. Ως εκ τούτου, ανάλογα με τη απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων, τα αυτοκίνητα που κινούνται πάνω τους θα δημιουργήσουν μια σειρά από ψηλές ή χαμηλές νότες<sup>144</sup>. Οι σχεδιαστές μπορούν στη συνέχεια να δημιουργήσουν μουσική με βάση παραλλαγή από αυτές τις νότες. Οι αποστάσεις των αυλακώσεων ρυθμίζονται ανάλογα με το επιθυμητό όριο ταχύτητας, για παράδειγμα στα 28 mph ή στα 45 mph, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15. Το να οδηγεί κανείς πολύ γρήγορα πάνω σε τέτοιο δρόμο, ισοδυναμεί με το να παίζει γρήγορα ένα μουσικό κομμάτι [36], όπως αναλύεται και στη συνέχεια.



(α)



(β)

Εικόνα 15: Μουσικός Δρόμος

(α): Δρόμος με Αυλακώσεις σε συγκεκριμένα διαστήματα ώστε να παράγεται μελωδία<sup>145</sup>

(β): Πινακίδα που προτρέπει την διατήρηση της ταχύτητας των 45mph ώστε να ακούγεται σωστά η μελωδία<sup>146</sup>

Στο παρελθόν έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι κατασκευής μουσικών δρόμων<sup>142</sup>, ως εξής:

#### **α) Με βάση εγκάρσιες αυλακώσεις**

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, στο οδόστρωμα χαράσσονται εγκάρσιες αυλακώσεις και ανάλογα με το διάμηκες πλάτος και την απόστασή τους, ένα όχημα που κινείται με προκαθορισμένη ταχύτητα παράγει έναν τόνο<sup>147</sup> (ήχο μιας βασικής συχνότητας). Σε όλο το μήκος του δρόμου στο οποίο διατηρείται το ίδιο μοτίβο, παράγεται ο ίδιος τόνος. Εάν

<sup>143</sup> Timestravel, <https://timesofindia.indiatimes.com/travel/things-to-do/these-musical-roads-of-japan-play-music-as-you-drive-over-them/as82406440.cms>

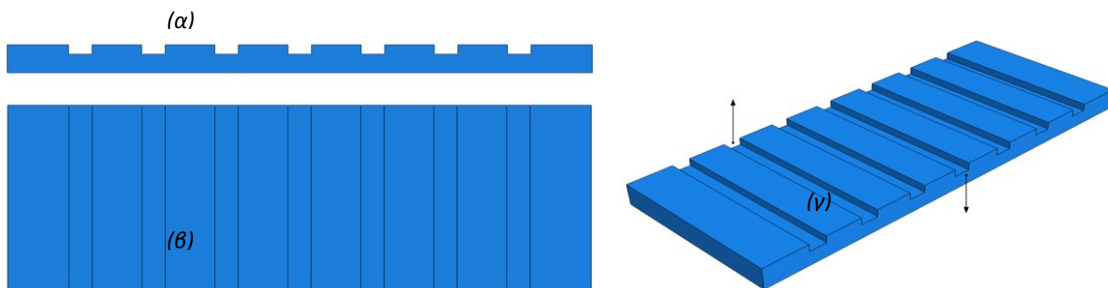
<sup>144</sup> Cho, J. and Lee, R. (2007, November): Singing streets and melody roads. ABC News. See: <https://abcnews.go.com/WN/Webcast/story?id=3931873&page=1>

<sup>145</sup> Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Musical\\_road](https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_road)

<sup>146</sup> Musical Highway Albuquerque, New Mexico: <https://www.atlasobscura.com/places/musical-highway>

<sup>147</sup> Liu, X.W., and Xue, C.L. (2011, January): A Method of Producing Pavement Music. Chinese Patent CN 102587233A, (in Chinese).

το όχημα κινηθεί ταχύτερα από την προκαθορισμένη ταχύτητα, τότε η συχνότητα ανεβαίνει και η διάρκεια μειώνεται, ώστε η εντύπωση που παράγεται τελικά είναι ότι ακούγεται γρηγορότερα το μουσικό κομμάτι. Στον ήχο που παράγεται με τη μέθοδο αυτή όμως, όπως αναλύθηκε, έχει ληφθεί υπόψη μόνο η συχνότητα και η διάρκεια, χαρακτηριστικά που είναι ανεπαρκή για τη δημιουργία ποιοτικής μουσικής. Στην Εικόνα 16 αναπαριστούνται οι όψεις μιας τέτοιας κατασκευής μουσικού δρόμου.



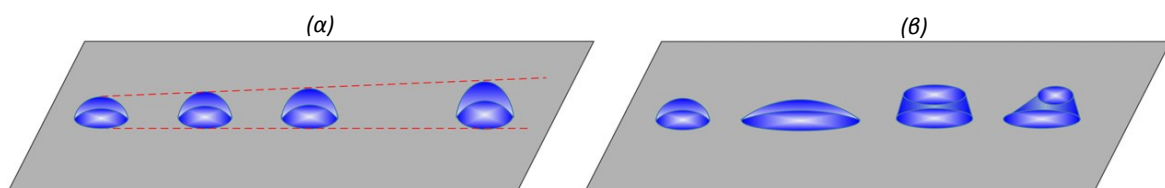
Εικόνα 16: Μουσικός δρόμος με αυλακώσεις [41]  
(α) Πλάγια όψη, (β) κάτοψη και (γ) 3D αναπαράσταση

### β) Με βάση υπερυψωμένες περιοδικές δομές

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, στο οδόστρωμα αναπτύσσονται σε τακτά διαστήματα πολλαπλές υπερυψωμένες δομές (σημάδια), ώστε το όχημα κινούμενο με σταθερή ταχύτητα να παράγει ελεγχόμενο ήχο τόσο ως προς τη συχνότητα και τη διάρκεια, αλλά επιπλέον και ως προς την ένταση και την χροιά του.

Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας το ύψος των δομών/σημαδιών, μεταβάλλεται ανάλογα και η ένταση του παραγόμενου ήχου (βλέπε Εικόνα 17α).

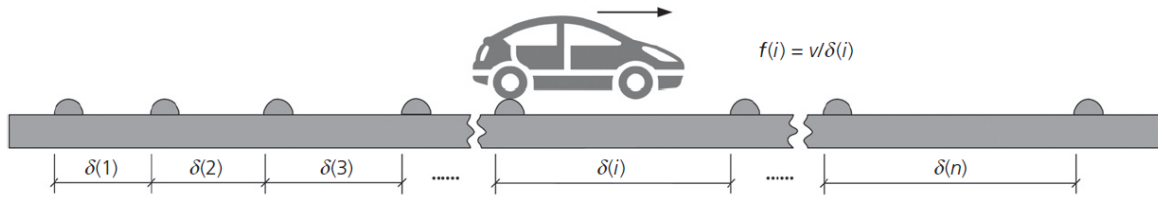
Η χροιά ενός ήχου που παράγεται από ένα μουσικό όργανο εξαρτάται από τη μορφή του φάσματος των παραγόμενων συχνοτήτων. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να προσεγγισθεί μεταβάλλοντας το σχήμα των υπερυψωμένων δομών<sup>148</sup> (βλέπε Εικόνα 17β).



Εικόνα 17: Διάφορα ανυψωμένα σημάδια [41]  
(α) Μεταβαλλόμενου ύψους και (β) Μεταβαλλόμενου σχήματος.

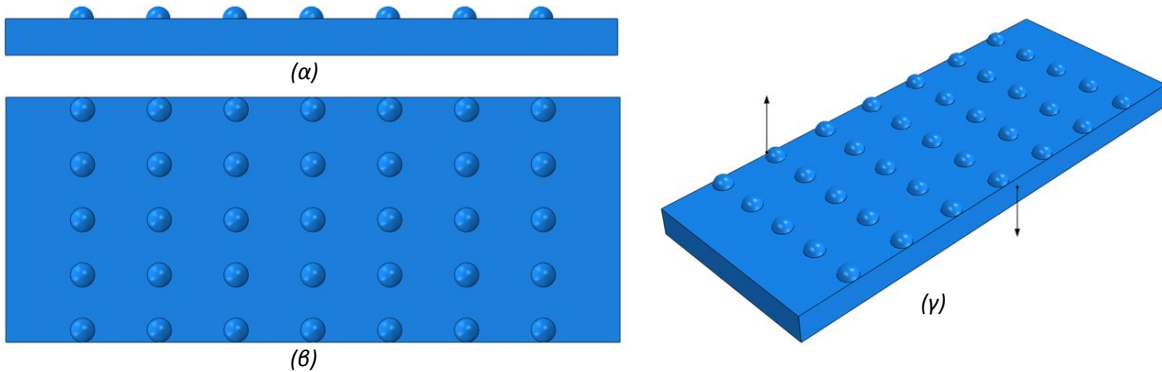
Στην Εικόνα 18 φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού των διαμηκών αποστάσεων μεταξύ των σημαδιών, ώστε με δεδομένη ταχύτητα ( $v$ ) να παράγεται συχνότητα ( $f$ ).

<sup>148</sup> Zhang, G.C. (2013, March): One Kind of Music Road and its Method of Producing Music. Chinese Patent CN 103174077A, (in Chinese).



Εικόνα 18: Υπολογισμός διαστημάτων  $\delta(i)$  [41]

Στην Εικόνα 19 αναπαριστούνται οι όψεις μιας τέτοιας κατασκευής μουσικού δρόμου.



Εικόνα 19: Μουσικός δρόμος με υπερυψωμένες περιοδικές δομές [41]  
(α) Πλάγια όψη, (β) κάτοψη και (γ) 3D αναπαράσταση

### γ) Με βάση υπερυψωμένη διαγράμμιση

Αυτοί οι μουσικοί δρόμοι κατασκευάζονται από πολλαπλές ανυψωμένες εγκάρσιες γραμμές σήμανσης στο οδόστρωμα, έτσι ώστε όταν ένα όχημα περνά από πάνω να υπάρχει μια ρυθμική δόνηση και να δημιουργείται κατ'αυτόν τον τρόπο μια ευχάριστη μουσική μελωδία.

Οι ανυψωμένες γραμμές σήμανσης τοποθετούνται στο υπάρχον οδόστρωμα, χωρίς να καταστρέφεται η αρχική δομή του.

Τέτοιοι δρόμοι είναι εύκολοι στη συντήρηση και βολικοί για την αλλαγή μουσικής. Ο χρόνος κατασκευής είναι μικρός γιατί δεν εξαρτάται από έργα διαμόρφωσης της οδοποιίας. Η κατασκευή απαιτεί μόνο τη μηχανή τοποθέτησης της σήμανσης και την κατασκευή των χαλύβδινων πλακών, γεγονός που την κάνει γρήγορη και βολική<sup>149</sup>.

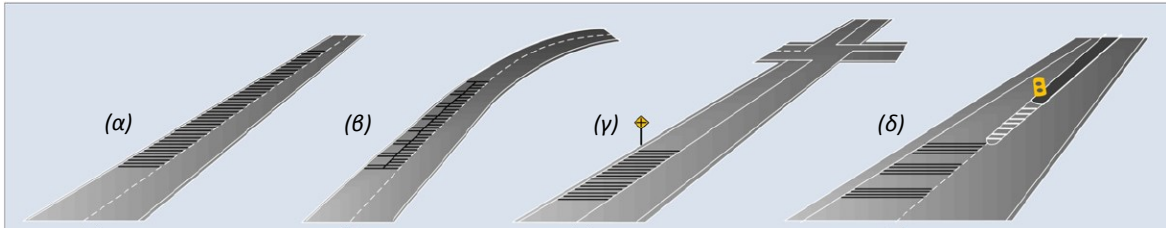
Ο σκοπός των μουσικών δρόμων δεν είναι απλώς η ψυχαγωγία αλλά και η προειδοποίηση κινδύνου, η οδική ασφάλεια και η βοήθεια προς τους οδηγούς για να τηρούν το προβλεπόμενο όριο ταχύτητας<sup>150</sup>. Οι δρόμοι με αυλακώσεις βοηθούν στην αύξηση της αντίστασης στην ολίσθηση, στη μείωση της απόστασης ακινητοποίησης και

<sup>149</sup> Hu, W.C., Wu, R., Liu. Q. and Shi, W.T. (2015, November): One Kind of Raised Marker Line-based Musical Road and its Construction Method. Chinese Patent CN 105019330A, (in Chinese).

<sup>150</sup> NBM&CW: [infrastructure-construction/roads-and-pavements/new-road-technologies-smart-roads.html](https://www.nbm&cw.com/infrastructure-construction/roads-and-pavements/new-road-technologies-smart-roads.html)

στην αύξηση της ταχύτητας υδρολίσθησης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο ατυχημάτων σε βροχερό καιρό για τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά<sup>151</sup>.

Στην Εικόνα 20 φαίνονται διάφοροι τύποι διαγράμμισης οι οποίοι προειδοποιούν τον οδηγό. Ο τύπος (α) είναι ο βασικός τύπος, ο τύπος (β) επισημαίνει την προσέγγιση σε επικίνδυνη στροφή, ο τύπος (γ) την προσέγγιση σε επικίνδυνη διασταύρωση και ο τύπος (δ) θέτει προειδοποίηση για σύμπτυξη της μεσαίας λωρίδας ή προσέγγιση σε τούνελ.



Εικόνα 20: Μουσικές διαγραμμίσεις δρόμων και θέσεις τοποθέτησης [41]

Ωστόσο, ο ήχος των μουσικών δρόμων μπορεί να είναι ενοχλητικός για τους κατοίκους που ζουν κοντά σε τέτοιους δρόμους, ιδίως κατά τις νυχτερινές ώρες, καθώς ο ύπνος τους θα διακόπτεται συχνά. Κατά συνέπεια, οι μουσικοί δρόμοι πρέπει να περιορίζονται τη νύχτα ή πρέπει να βρίσκονται μακριά από κατοικημένη περιοχή. Τουναντίον, είναι ιδιαίτερα κατάλληλα συστήματα για αυτοκινητόδρομους και μεγάλους επαρχιακούς δρόμους, για να χρησιμεύουν ως υπενθύμιση της ταχύτητας οδήγησης.

#### 4.4. Δρόμοι που Ζυγίζουν Αυτόματα τα Αυτοκίνητα/Φορτηγά

Οι δρόμοι χρησιμοποιούνται για την μεταφορά αγαθών και εδώ μεγάλο ρόλο παίζουν τα φορτηγά. Όμως τα υπερφορτωμένα φορτηγά αποτελούν μεγάλη απειλή για την ασφάλεια. Έτσι απαιτείται συχνά έλεγχος του βάρους τους. Ανάλογα με την κατάσταση της κίνησης του οχήματος κατά την ζύγιση διακρίνουμε διαφορετικές μεθόδους ζύγισης.

##### α) Ζύγιση εν Στάσει

Σε κάποιες χώρες, όπως στις ΗΠΑ, στις εισόδους των μεγάλων αυτοκινητοδρόμων υπάρχουν πλατφόρμες όπου τα φορτηγά ζυγίζονται για να υπολογισθούν τα τέλη χρήσης της οδικής υποδομής ενώ σε άλλες χώρες όπως και στην Ελλάδα τα φορτηγά υποχρεούνται να φέρουν έγγραφο ζύγισης από πιστοποιημένο σταθμό.

<sup>151</sup> Anupam, K. (2011): Numerical Simulation of Vehicle Hydroplaning and Skid Resistance on Grooved Pavement. Indian Institute of Technology, Roorkee, India.



Εικόνα 21: Πιστοποιημένη πλατφόρμα ζύγισης [36]

### **β) Ζύγιση εν Κινήσει (Weight In Motion - WIM)**

Τις δεκαετίες του 1970 και 1980 πρωτοεμφανίστηκαν τα συστήματα ζύγισης εν κινήσει<sup>152</sup> (WIM) [42] με εφαρμογή στη βαθμονόμηση και στον έλεγχο των γεφυρών, εστιάζοντας κυρίως στα φαινόμενα κόπωσης και φορτίου.

Την δεκαετία του 1990 εμφανίστηκαν τα πρότυπα μέτρησης εν κινήσει ASTM<sup>153</sup> στις ΗΠΑ και COST323<sup>154</sup> στην Ευρώπη.

Μετά το 2000 η ακρίβεια της ζύγισης εν κινήσει αυξήθηκε σε βαθμό τέτοιο που επέτρεψε την χρήση της για τον εντοπισμό των υπέρβαρων οχημάτων<sup>155</sup>. Τα πλεονεκτήματα της ζύγισης εν κινήσει είναι πολλαπλά, γιατί τα φορτηγά δεν χρειάζεται να σταματούν και να περιμένουν στη σειρά για ζύγιση.

### **γ) Ζύγιση εν Κινήσει με Μεγάλη Ταχύτητα (High Speed Weight In Motion - HS-WIM)**

---

<sup>152</sup> Jacob, B., Feypell-de La Beaumelle, V. (2010, July): Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*, vol.34, issue 1, pp.9-15. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2010.06.003>

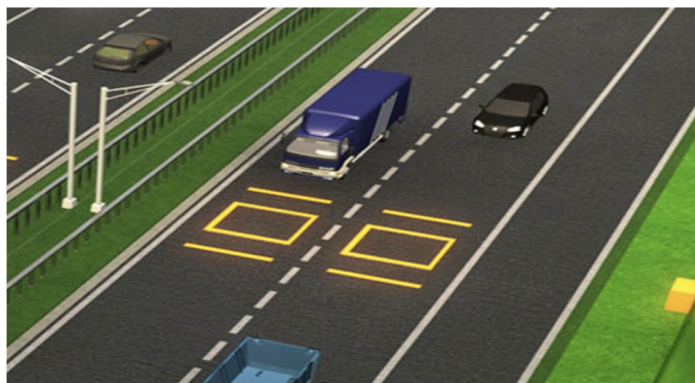
<sup>153</sup> American National Standards Institute (ANSI): ASTM E 1318. (2022): Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods. *ASTM Standard E 1318, 04*. Available at: <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme131809>

<sup>154</sup> Jacob, B., & O'Brien, E.J. (1998): European specification on weigh-in-motion of road vehicles (COST323). In: *Proceedings of the Second European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles*, pp.172-183. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/341911554\\_EUROPEAN\\_SPECIFICATION\\_ON\\_WEIGH-IN-MOTION\\_OF\\_ROAD\\_VEHICLES\\_COST323](https://www.researchgate.net/publication/341911554_EUROPEAN_SPECIFICATION_ON_WEIGH-IN-MOTION_OF_ROAD_VEHICLES_COST323)

<sup>155</sup> Han, L.D., Ko, S.S., Gu, Z., & Jeong, M.K. (2012): Adaptive weigh-in-motion algorithms for truck weight enforcement. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.24, pp.256-269. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.01.010>

Η μέτρηση του βάρους είναι δυνατή πλέον και σε κινούμενο όχημα με μεγάλη ταχύτητα (π.χ. 130 km/h) και επομένως δεν χρειάζεται το όχημα να σταματήσει ή να επιβραδύνει<sup>156, 157, 158</sup>.

Τα συστήματα HS-WIM μπορούν να καταγράφουν και να εμφανίζουν αυτόματα τα φορτία των τροχών, των αξόνων, το μικτό βάρος των οχημάτων (Gross Vehicle Weight - GVW) και άλλες παραμέτρους. Τα HS-WIM είναι κατάλληλα για έλεγχο παραβάσεων υπερφόρτωσης, για παρακολούθηση του φορτίου των γεφυρών, για τον υπολογισμό των διοδίων και για τη συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας. Η παρέμβαση στην οδοποιία είναι πολύ μικρή και γίνεται με αυλακώσεις μικρότερες από 75 mm (βλέπε Εικόνα 22), στις οποίες τοποθετούνται λωρίδες μέτρησης του βάρους (μεταβλητής αντίστασης) υψηλής απόδοσης και αντοχής σε καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 22: Μέτρηση βάρους εν κινήσει [36]

#### δ) Εικονική Ζύγιση εν Κινήσει (Virtual Weight In Motion - V-WIM)

Τα Virtual WIM<sup>159</sup> [43] συστήματα δεν απαιτούν την ανθρώπινη παρουσία αφού τα δεδομένα συλλέγονται από κατάλληλο εξυπηρετητή (server) ο οποίος τα διαβιβάζει σε αντίστοιχη νεφοϋπολογιστική<sup>160</sup> (cloud) πλατφόρμα.

Τέτοιοι δρόμοι συνδυάζουν δεδομένα βάρους, εικόνας, αναγνώριση πινακίδας, αναγνώριση τύπου οχήματος κ.α. Διαθέτουν επίσης την απαιτούμενη ακρίβεια

<sup>156</sup> Kirushanth, S., & Kabaso, B. (2020): Design and Development of Weigh-In-Motion Using Vehicular Telematics. *Journal of Sensors*, vol.2020. <https://doi.org/10.1155/2020/7871215>

<sup>157</sup> Gajda, J., Burnos, P., and Sroka, R. (2018): Accuracy assessment of weigh-in-motion systems for vehicle's direct enforcement. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol.10, no.1, pp.88-94, doi: 10.1109/MITS.2017.2776111.

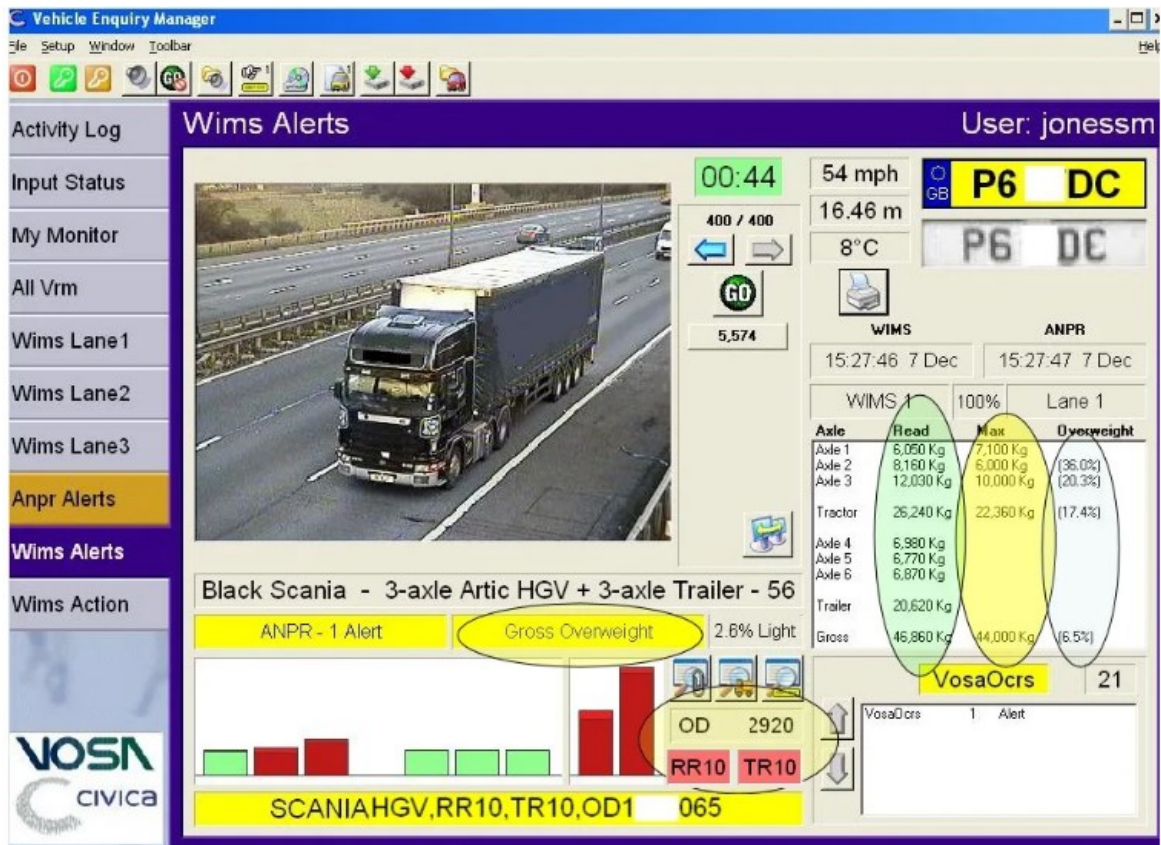
<sup>158</sup> Shah, R., Sharma, Y., Mathew, B., Kateshiya, V., and Parmar, J. (2016): Review paper on overloading effect. *International Journal of Advanced Scientific Research and Management*, vol.1, no.4, pp.131-134.

<sup>159</sup> Maryland Department of CVISN (2009): Maryland Virtual Weigh Station. Available at: [https://www.roads.maryland.gov/OOTS/MD\\_VWS\\_Final\\_Report.pdf](https://www.roads.maryland.gov/OOTS/MD_VWS_Final_Report.pdf)

<sup>160</sup> Green, J., Allen, E., Nuber, L., Thomaz, J., Bullock, D., Wasson, J., Nichols, A., Boruff, G., & Newman, M. (2002, June): Virtual Weigh Station. Joint Transportation Research Program. FHWA/IN/JTRP-2001/09. Final Report. Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette. <https://doi.org/10.5703/1288284313348>

μέτρησης και αναγνώρισης ώστε να διαβιβάζουν τα στοιχεία του οχήματος στις αρμόδιες αρχές ελέγχου της κυκλοφορίας.

Στην Εικόνα 23 φαίνεται η οθόνη μιας εφαρμογής V-WIM όπου παρουσιάζεται η εικόνα του οχήματος, η αναγνώριση του τύπου και των στοιχείων πινακίδας του. Με κίτρινο χρώμα εμφανίζονται τα στοιχεία αναφοράς του τύπου του οχήματος όπως αντλούνται από βάση δεδομένων ενώ με πράσινο ή κόκκινο αντίστοιχα οι εικονικές μετρήσεις. Στο κάτω μέρος αναπαρίστανται οι άξονες του οχήματος και ποιοι από αυτούς είναι υπερφορτωμένοι (κόκκινο) ή όχι (πράσινο).



Εικόνα 23: Ενδεικτική οθόνη συστήματος V-WIM<sup>161</sup>

#### 4.5. Δρόμοι που Φορτίζουν τα Ηλεκτρικά Οχήματα

Με την αυξανόμενη τάση για ηλεκτρικά οχήματα η απαίτηση για φόρτιση γίνεται πολύ πιεστική. Η φόρτιση σε συγκεκριμένα σημεία δεν είναι πάντα εύκολη, ειδικά στις αστικές περιοχές και ειδικά για τα φορτηγά που έχουν μεγάλο βάρος και χρειάζονται συχνή φόρτιση.

Στη Σουηδία, περίπου ένα τμήμα δρόμου μήκους 2 km έξω από την Στοκχόλμη έχει μετατραπεί σε ηλεκτροκίνητο δρόμο<sup>162</sup>. Φορτίζει τις μπαταρίες των αυτοκινήτων και των

<sup>161</sup> Keep On Trucking (2021, March): <https://keepontrucking.uk/weigh-in-motion-sensors-wims-explained/>



φορτηγών ενώ τον διασχίζουν [44]. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ζεύγος μεταλλικών γραμμών στο δρόμο και το διερχόμενο όχημα θα πρέπει να διαθέτει αντίστοιχο εξοπλισμό σύνδεσης εν κινήσει.



Εικόνα 24: Σύστημα φόρτισης εν κινήσει στην Στοκχόλμη [44]

Το ενδιαφέρον πάντως βρίσκεται σε συστήματα φόρτισης με επαγωγή [45], όπου καλώδια θαμμένα κάτω από την επιφάνεια του δρόμου<sup>163</sup> θα παράγουν ένα αρκετά δυνατό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ώστε τα οχήματα που θα διαθέτουν αντίστοιχο δέκτη<sup>164</sup> να μπορούν να το μετατρέψουν σε ηλεκτρική ισχύ<sup>165, 166</sup>.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, μια πράσινη λωρίδα έχει δεσμευτεί για αυτή τη χρήση.

---

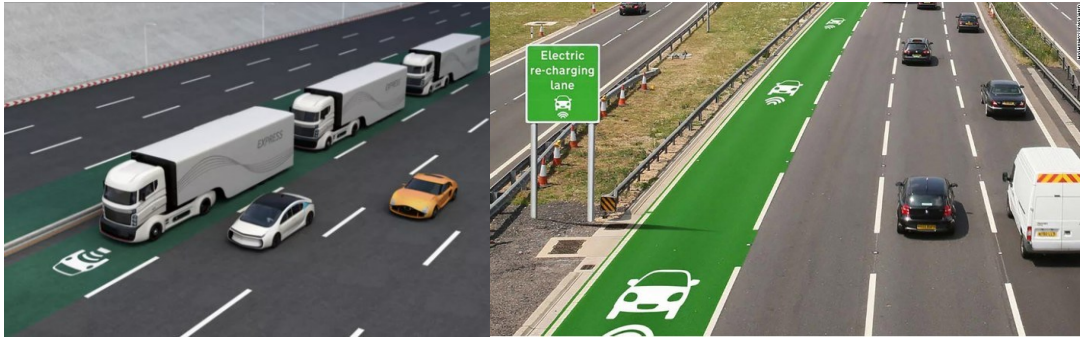
<sup>162</sup> The Guardian (2018): World's first electrified road for charging vehicles opens in Sweden. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2018/apr/12/worlds-first-electrified-road-for-charging-vehicles-opens-in-sweden>

<sup>163</sup> The Conversation (2017, February): Wired-up roads will soon charge your electric car – while you're driving. Available at: <https://theconversation.com/wired-up-roads-will-soon-charge-your-electric-car-while-youre-driving-72625>

<sup>164</sup> Schwerdfeger, S., Bock, S., Boysen, N., & Briskorn, D. (2021, June): Optimizing the electrification of roads with charge-while-drive technology. *European Journal of Operational Research*, vol.299, issue 3, pp.1111-1127. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.08.045>

<sup>165</sup> Deflorio, F.P., Castello, L., Pinna, I., & Guglielmi, P. (2015): Charge while driving for electric vehicles: Road traffic modeling and energy assessment. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol.3, no.2, pp.277-288. <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0109-z>

<sup>166</sup> Deflorio, F., & Castello, L. (2014): Traffic modeling of a cooperative charge while driving system in a freight transport scenario. In: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium of Transport Simulation and International Workshop on Traffic Data Collection and ITS Standardisation (ISTS & IWTDCS'14)*, Ajaccio, France, 1-4 June 2014, pp.7-18.



Εικόνα 25: Χρήση λωρίδας για επαγωγική φόρτιση [46]

#### 4.6. Δρόμοι με Έξυπνη Οδική Σήμανση

Τα σήματα οδικής κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και η χρησιμότητά τους είναι αδιαμφισβήτητη. Ωστόσο, πολλές φορές εμφανίζονται προβλήματα που έχουν να κάνουν με την κακή ορατότητα, τη δύσκολη τοποθέτηση και την αδυναμία ερμηνείας τους από μερίδα των οδηγών.

Η ιδέα της έξυπνης πινακίδας έγκειται στην τοποθέτηση μιας υπολογιστικής μονάδας (RSU) στη θέση της πινακίδας, η οποία να εκπέμπει κωδικοποιημένα το σήμα που αυτή αναπαριστά προς τα επερχόμενα οχήματα. Ο αντίστοιχος δέκτης στα οχήματα θα μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα<sup>167</sup>,<sup>168</sup> και να προειδοποιήσει οπτικά ή/και ηχητικά τον οδηγό [47].

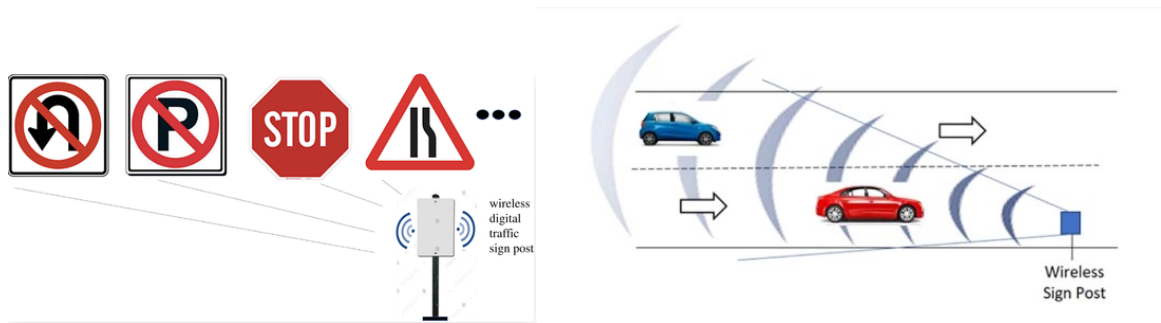
Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι πολλά: (i) Εξαλείφεται η ανάγκη για να είναι ορατή η πινακίδα στο ανθρώπινο μάτι, (ii) μειώνεται ο φόρτος του οδηγού για να επιδεικνύει προσοχή στα σήματα κατά την οδήγηση, (iii) περιορίζεται η πίεση του οδηγού για να θυμάται όλα τα σήματα κυκλοφορίας, (iv) δεν επηρεάζεται από κακές καιρικές συνθήκες ή/και συνθήκες φωτισμού, (v) η πινακίδα είναι προγραμματιζόμενη, γεγονός που σημαίνει ότι η αλλαγή της είναι τόσο εύκολη όσο και ο επαναπρογραμματισμός της, (vi) δεν υπάρχει ανάγκη για πολύπλοκη επεξεργασία σήματος εικόνας για την αναγνώριση των πινακίδων κυκλοφορίας που χρησιμοποιείται στα αυτόνομα οχήματα σήμερα, (vii) επιτυγχάνεται αυτόματος υπολογισμός του κυκλοφοριακού όγκου, και (viii) επιτυγχάνεται χαμηλό κόστος [47].

Εννοείται ότι θα πρέπει να συνυπάρχουν πολλές έξυπνες πινακίδες και επειδή τα σήματα αφορούν μόνο τα επερχόμενα οχήματα, η κεραία τους θα πρέπει να είναι κατευθυντική και να καλύπτει όλες τις λωρίδες κυκλοφορίας που αφορά στο σήμα.

---

<sup>167</sup> Toh, C.-K., Cano, J.-C., Fernandez-Laguia, C., Manzoni, P., & Calafate, C.T. (2019, January): Wireless digital traffic signs of the future. *IET Networks*, vol.8, issue 1, pp.74-78. <https://doi.org/10.1049/iet-net.2018.5127>

<sup>168</sup> Filatov, D.V., Ignatev, K.V., Deviatikin, A.V., and Serykh, E.V. (2018): Application of machine learning methods for traffic signs recognition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol.315, doi:10.1088/1757-899X/315/1/012008.

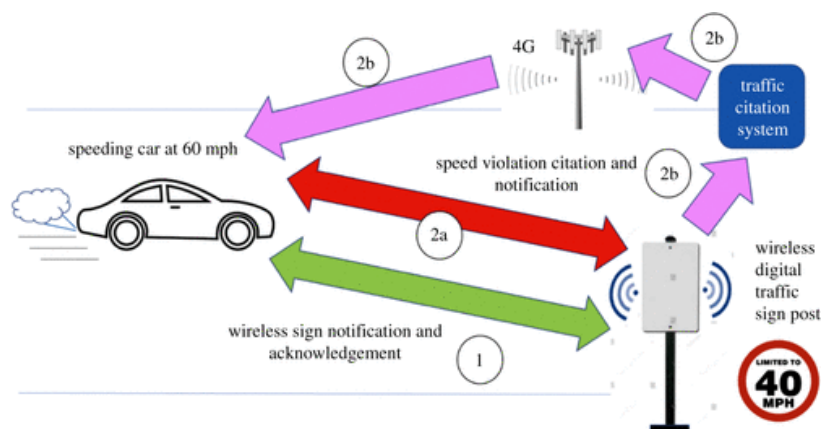


Εικόνα 26: Έξυπνη οδική σήμανση [36], [47]

#### 4.7. Δρόμοι με Έξυπνο Εντοπισμό Παραβάσεων Κυκλοφορίας

Οι παραβάσεις της κυκλοφορίας ελέγχονται επί του παρόντος με κάμερες και ραντάρ μέτρησης της ταχύτητας. Οι μέθοδοι αυτές δεν είναι πολύ αποτελεσματικές σε κακές καιρικές συνθήκες, όπως βροχή, χιόνι και ομίχλη λόγω μειωμένης ορατότητας. Δύο νέοι τρόποι που προτείνονται είναι: (i) με χρήση της έξυπνης σήμανσης και (ii) με χρήση drones.

Στην περίπτωση της έξυπνης σήμανσης [47], η ίδια η πινακίδα διαπιστώνει την παράβαση<sup>169</sup> και ειδοποιεί τον οδηγό ενώ ταυτόχρονα στέλνει αναφορά σε κάποιο κεντρικό σύστημα για να βεβαιωθεί η παράβαση. Το σύστημα ADAS του οχήματος καταγράφει τις ειδοποιήσεις και έτσι καθίσταται πολύ δύσκολο για τον οδηγό να ισχυριστεί ότι δεν ειδοποιήθηκε εγκαίρως.



Εικόνα 27: Χρήση της έξυπνης σήμανσης για τον εντοπισμό παραβάσεων [36], [47]

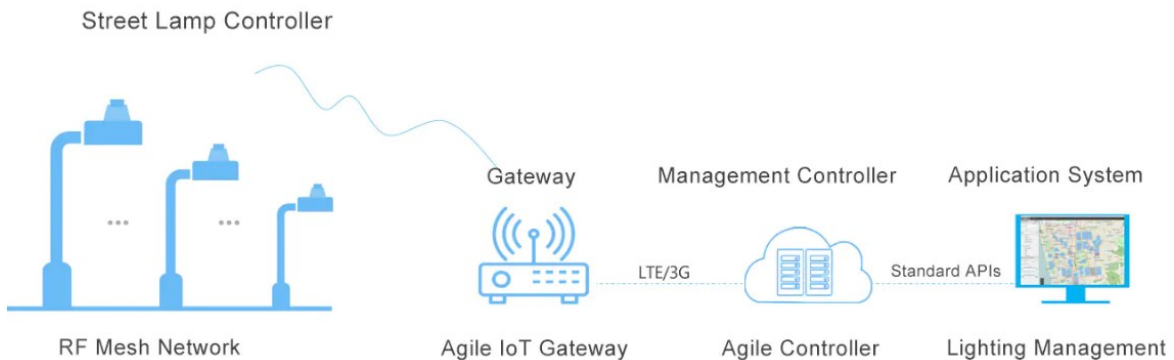
<sup>169</sup> Gao, J., Yang, Q., Gao, Z., & Yin, S. (2020): Digital Traffic Signs for the Future Transportation System. In *Proceedings of the 2020 13<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA 2020)*, pp.490-496. <https://doi.org/10.1109/ICICTA51737.2020.00110>

Στην περίπτωση της χρήσης drones, το drone ανιχνεύει την παράβαση και δίνει αναφορά ενώ παράλληλα καταγράφει με κάμερα το συμβάν ώστε να μην μπορεί να αμφισβητηθεί. Είναι μια μέθοδος που ήδη βρίσκεται σε χρήση σε αρκετές χώρες, όπως στις ΗΠΑ<sup>170</sup> [48], στη Γαλλία<sup>171</sup> [49], στην Κίνα<sup>172</sup> [50] και στο Ισραήλ<sup>173</sup> [51].

#### 4.8. Δρόμοι με Έξυπνο Φωτισμό

Εδώ συγκαταλέγονται τα συνδεδεμένα φώτα, τα επαναφορτιζόμενα με ηλιακή ενέργεια, αυτά που ενεργοποιούνται από την κίνηση, φώτα με παροχή υπηρεσίας WiFi access point, φώτα με δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων και φώτα αυτόματης ρύθμισης του φωτισμού τους από το περιβάλλον<sup>174</sup>.

Επειδή τα φώτα είναι ακίνητα η διασύνδεσή τους μπορεί να γίνει είτε μέσω του δικτύου τροφοδοσίας τους είτε με RF. Εάν ένα φως χαλάσει, τα γειτονικά του θα μπορούσαν να αυξήσουν τον φωτισμό τους ώστε να καλύψουν την απώλειά του<sup>175</sup>. Επίσης θα ειδοποιήσουν το κέντρο ώστε να δρομολογηθεί η διαδικασία αποκατάστασής του [52].



Εικόνα 28: Σύστημα έξυπνου φωτισμού δρόμου [52]

<sup>170</sup> Wang, L., Chen, F., Yin, H. (2016, May): Detecting and tracking vehicles in traffic by unmanned aerial vehicles. *Automation in Construction*, vol.72, part 3, pp.294-308, doi: 10.1016/j.autcon.2016.05.008.

<sup>171</sup> Drobots Company (2017, November): Watch Out! Your Next Traffic Ticket May Come From A Drone. <https://drobotscompany.com/drones-traffic-tickets/>

<sup>172</sup> Fu, B. (2016, September): Drones Are Writing Tickets For Traffic Police On Highways In China. Buzfeed News. Available at: <https://www.buzzfeednews.com/article/beimengfu/cops-in-china-are-using-drones>

<sup>173</sup> The Times of Israel (2018, August): Israel police roll out traffic drones to catch reckless drivers. Available at: <https://www.timesofisrael.com/israel-police-roll-out-traffic-drones-to-catch-reckless-drivers/>

<sup>174</sup> Wang, S., & Yang, Y. (2020). Intelligent street lamp management system. In: Liang Q., Liu X., Na Z., Wang W., Mu J., Zhang B. (eds) *Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol.517, pp.612-620. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6508-9\\_74](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6508-9_74)

<sup>175</sup> Huawei Technologies Co. (2022): Huawei LiteOS-assisted Smart Lighting Solution. Available at: [huawei.com/minisite/liteos/en/lighting.html](https://huawei.com/minisite/liteos/en/lighting.html)

#### 4.9. Δρόμοι με άλλα έξυπνα χαρακτηριστικά

Τα παρακάτω θέματα καλύπτονται σε άλλα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Εντούτοις για λόγους πληρότητας και νοηματικής συνέπειας αναφέρουμε και τις κάτωθι περιπτώσεις:

- **Δρόμοι με V2X και VANETs.**

Επί του παρόντος, το V2V μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση ειδοποιήσεων ατυχημάτων σε άλλα γειτονικά αυτοκίνητα<sup>176, 177, 178</sup>. Η κατάσταση της κυκλοφοριακής συμφόρησης μπορεί επίσης να διαδοθεί, συμβουλεύοντας τα πίσω αυτοκίνητα να βγουν εκ των προτέρων από την λωρίδα ή το ρεύμα κυκλοφορίας και να αναζητήσουν εναλλακτικές διαδρομές<sup>179, 180</sup> για να αποφύγουν περαιτέρω συμφόρηση [53].

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση επικίνδυνων οδηγών<sup>181, 182, 183, 184</sup> (οδηγοί με κακή συμπεριφορά ή εγκληματίες εν κινήσει) στους δρόμους [54].

- **Δρόμοι με αρχιτεκτονική διάσωσης έκτακτης ανάγκης με χρήση V2X.**

Στην περίπτωση σύγκρουσης, το όχημα στέλνει ειδοποίηση στο τοπικό κέντρο έκτακτης ανάγκης και επίσης ειδοποιεί τα υπόλοιπα οχήματα. Τα γειτονικά οχήματα αναμεταδίδουν το σήμα, ώστε αυτό να φτάσει σίγουρα στο κέντρο

---

<sup>176</sup> Machardy, Z., Khan, A., Obana, K. (2018): V2X Access technologies: Regulation, research, and remaining challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.20, no.3, pp.1858-1877, doi: 10.1109/COMST.2018.2808444.

<sup>177</sup> La Vinh, H., and Cavalli, A.R. (2014, April): Security attacks and solutions in vehicular ad hoc networks: A survey. *International Journal on AdHoc Networking Systems*, vol.4, no.2, pp.1-20, doi: 10.5121/ijans.2014.4201.

<sup>178</sup> Isaac, J.T., Zeadally, S., and Cmara, J.S. (2009): Security attacks and solutions for vehicular ad hoc networks. *IET Communications*, pp.894-903.

<sup>179</sup> Martinez, F.J., Toh, C.-K., Cano, J.-C., Calafate, C.T., & Manzoni, P. (2010, October): Emergency Services in Future Intelligent Transportation Systems Based on Vehicular Communication Networks. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol.2, issue 2, pp.6-20, doi: 10.1109/MITS.2010.938166.

<sup>180</sup> Tanuja, K., Sushma, T., Bharathi, M., and Arun, K. (2015): A survey on VANET technologies. *International Journal of Computer Applications*, vol.121, no.18, pp.1-9, doi: 5120/21637-4965.

<sup>181</sup> Yan, G., Olariua, S., and Weigle, M.C. (2008, July): Providing VANET security through active position detection. *Computer Communications*, vol.31, no.12, pp.2883-2897.

<sup>182</sup> Sengupta, R., Rezaei, S., Shladover, S.E., Cody, D., Dickey S., and Krishnan, H. (2007): Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol.11, issue 3, pp.143-155. <https://doi.org/10.1080/15472450701410452>.

<sup>183</sup> Umedu, T., Isu, K. Higashino, T. and Toh, C.-K. (2010, February): An Intervehicular-Communication Protocol for Distributed Detection of Dangerous Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.59, no.2, pp.627-637, doi: 10.1109/TVT.2009.2035041.

<sup>184</sup> Yin, J.-L., Chen, B.-H., Lai K.-H.R., and Li, Y. (2018, June): Automatic Dangerous Driving Intensity Analysis for Advanced Driver Assistance Systems From Multimodal Driving Signals. *IEEE Sensors Journal*, vol.18, no.12, pp.4785-4794, doi: 10.1109/JSEN.2017.2765315.

έκτακτης βοήθειας και επίσης προειδοποιούν τους οδηγούς για να λάβουν τα κατάλληλα μέτρα αποφυγής σύγκρουσης ή παροχής βοήθειας<sup>185</sup>.

- **Δρόμοι με έξυπνες διασταυρώσεις.**

Στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στα συστήματα αυτά.

---

<sup>185</sup> Hu, H., Chen, K., He, J., Zhang, Y., Zhou, J., & Han, Y. (2019): Scenario-based emergency material scheduling using V2X communications. *MDPI Electronics (Switzerland)*, vol.8, no.6, 707. <https://doi.org/10.3390/electronics8060707>

## 5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΥΦΥΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ

### 5.1. Ιστορική Αναδρομή

Με την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών στα τέλη της δεκαετίας του '70 και στις αρχές του '80, εμφανίστηκαν αρκετά συστήματα προσαρμογής των φαναριών κυκλοφορίας σε συνθήκες πραγματικής κίνησης των οχημάτων. Τα συστήματα αυτά ανταποκρίνονταν στις αλλαγές των κυκλοφοριακών αναγκών, εκτελώντας τοπικές βελτιστοποιήσεις.

Τα πιο αξιόλογα από αυτά είναι τα SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) (βλέπε: [55], [56]) και SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique) ([56], [57]) τα οποία στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της διάρκειας κύκλου (cycle time), της διαίρεσης φάσης (phase split) και του χρόνου μετατόπισης (offset). Η διάρκεια κύκλου είναι ο χρόνος για μια πλήρη εναλλαγή όλων των φάσεων ενός σήματος, δηλαδή από τη στιγμή που θα ανάψει πράσινο έως ότου να ξανανάψει πράσινο στον σηματοδότη. Η διαίρεση φάσης έχει να κάνει με τη διαίρεση της διάρκειας κύκλου σε πράσινη, πορτοκαλί και κόκκινη φάση και ο χρόνος μετατόπισης είναι ο χρόνος που μεσολαβεί για την αλλαγή σε πράσινη φάση μεταξύ γειτονικών διασταυρώσεων.

#### 5.1.1. SCATS

Στο σύστημα SCATS ομάδες διασταυρώσεων οργανώνονται σε υποσυστήματα. Κάθε υποσύστημα περιέχει μόνο μια κρίσιμη διασταύρωση<sup>186</sup>, της οποίας οι χρονικές παράμετροι καθορίζονται απευθείας από έναν περιφερειακό υπολογιστή, βασιζόμενο στην επικρατούσα μέση κυκλοφοριακή κατάσταση στην περιοχή. Όλες οι άλλες διασταυρώσεις στο υποσύστημα συντονίζονται πάντα με την κρίσιμη διασταύρωση και μοιράζονται μια κοινή διάρκεια κύκλου και συντονισμένη διαίρεση φάσης και χρόνο μετατόπισης [58].

Σε χαμηλότερο επίπεδο, κάθε διασταύρωση μπορεί ανεξάρτητα να μειώσει τον χρόνο ή ακόμη να παραλείψει μια συγκεκριμένη φάση των χρωμάτων των σηματοδοτών, λαμβάνοντας υπόψη την τοπική κυκλοφορία, ωστόσο ο συνολικός χρόνος των φάσεων της θα πρέπει να διατηρηθεί ώστε η διάρκεια κύκλου να παραμείνει η ίδια με αυτήν της κρίσιμης διασταύρωσης.

Το βασικό δεδομένο της κίνησης που χρησιμοποιείται από το SCATS είναι το «επίπεδο κορεσμού», που ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της πραγματικής χρησιμοποιούμενης ώρας πράσινου χρώματος των σηματοδοτών και της συνολικής διαθέσιμης ώρας πράσινου των σηματοδοτών [59].

Ο αλγόριθμος του συστήματος προσαρμόζει τις χρονικές παραμέτρους της κυκλοφοριακής σήμανσης σύμφωνα με τα παρακάτω:

---

<sup>186</sup> Κρίσιμη ή κεντρική διασταύρωση είναι για παράδειγμα αυτή όπου διασταυρώνονται μεγάλες λεωφόροι.

- Η διάρκεια κύκλου για μια κρίσιμη διασταύρωση προσαρμόζεται ώστε να διατηρείται υψηλό το επίπεδο κορεσμού για τη λωρίδα με το μεγαλύτερο επίπεδο κορεσμού.
- Η διαίρεση φάσης για μια κρίσιμη διασταύρωση ρυθμίζεται προκειμένου να διατηρηθούν ίσα επίπεδα κορεσμού σε ανταγωνιστικές εισόδους.
- Οι χρονικές μετατοπίσεις μεταξύ των διασταυρώσεων ενός υποσυστήματος επιλέγονται για την ελαχιστοποίηση των στάσεων προς την κατεύθυνση της κυρίαρχης ροής κυκλοφορίας.

Από τον τρόπο λειτουργίας του φαίνεται ότι το SCATS δεν βελτιστοποιεί ρητά κάποια συγκεκριμένη μετρική απόδοσης, όπως την μέση καθυστέρηση ή τις στάσεις [58].

### 5.1.2. SCOOT

Το SCOOT χρησιμοποιεί δεδομένα κίνησης πραγματικού χρόνου για να δημιουργήσει μοντέλα ροής κυκλοφορίας, που ονομάζονται «προφίλ κυκλικής ροής». Στη συνέχεια αυτά χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν πόσα οχήματα θα φτάσουν σε ένα φανάρι-σηματοδότη ρύθμισης κίνησης, όταν αυτό είναι σε κατάσταση κόκκινου χρώματος. Αυτή η εκτίμηση παρέχει προβλέψεις του μεγέθους της ουράς αυτοκινήτων για διαφορετικές υποθετικές αλλαγές στις παραμέτρους χρονισμού σήματος [58].

Ο στόχος του SCOOT είναι να ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των μέσων ουρών σε μια περιοχή. Λίγα δευτερόλεπτα πριν από κάθε αλλαγή φάσης, το SCOOT χρησιμοποιεί το μοντέλο ροής για να αποφασίσει εάν είναι προτιμότερο να επιβραδύνει ή να επιταχύνει την αλλαγή φάσης κατά μερικά δευτερόλεπτα ή να αφήσει αναλλοίωτο τον χρόνο που έχει προκαθοριστεί για το σκοπό αυτό. Σε κάθε κύκλο, τίθεται μια παρόμοια ερώτηση για να καθοριστεί εάν η μετατόπιση (offset) πρέπει να μειωθεί ή να αυξηθεί κατά μερικά δευτερόλεπτα. Μια φορά κάθε λίγα λεπτά, η διάρκεια κύκλου παρομοίως αυξάνεται ή μειώνεται, κατά λίγα δευτερόλεπτα [59].

Το SCOOT επομένως αλλάζει τις παραμέτρους χρονισμού προκειμένου να βελτιστοποιήσει έναν συγκεκριμένο στόχο απόδοσης.

### 5.1.3. Wireless Sensor Networks - WSNs

Με την πρόοδο που έλαβε χώρα στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, έκαναν την εμφάνισή τους αρκετές προτάσεις βελτιστοποίησης των συστημάτων ελέγχου των διασταυρώσεων με τη χρήση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSNs).

Τα συστήματα αυτά προτείνονται τόσο στη φάση της ανίχνευσης των οχημάτων όσο και του υπολογισμού του όγκου της κίνησης με ειδικούς (magneto-resistive) αισθητήρες [60] ή με χρήση βιντεοκαμερών και επεξεργασίας των δεδομένων με fuzzy logic [61] από υπολογιστή που διατίθεται στη σχετική διασταύρωση. Για τη μετάδοση των σημάτων χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 [58]. Σε κάποιες περιπτώσεις, επειδή και οι κάμερες και οι αισθητήρες μπορεί να δίνουν λάθος δεδομένα, προτείνεται η χρήση αναγνωριστικών (tags) RFID [62].



Με δεδομένο το ότι οι αισθητήρες τροφοδοτούνται από μπαταρίες, προτείνονται λύσεις επαναφόρτισης αυτών που στηρίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο [63], [64] εκμεταλλευόμενες τις δονήσεις των οχημάτων που διασχίζουν τη διασταύρωση.

Στις εν λόγω προτάσεις φαίνεται να μην συνιστάται η χρήση επεμβατικών μεθόδων που θα απαιτούσαν εξειδικευμένο υλικό εγκατεστημένο στα οχήματα και οι οποίες προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους της κίνησης μέσα από τη ρύθμιση των φαναριών.

## 5.2. Η Έξυπνη Διασταύρωση στην Εποχή του 5G

Με την ανάπτυξη των σύγχρονων δικτύων και την παράλληλη εξέλιξη των έξυπνων συσκευών οι οποίες πλέον βρίσκονται σε πληθώρα εντός των οχημάτων αλλά ακόμη και στα χέρια των πεζών ή σε ευδιάκριτη θέση στα ποδήλατα ή δίτροχα οχήματα, η σύγχρονη τάση προσανατολίζεται στην ανίχνευση και εξυπηρέτηση όλων των χρηστών μιας διασταύρωσης.

Η διείσδυση τεχνολογιών IoT στα αυτοκίνητα τα έχει μετατρέψει σε ολοκληρωμένα επαγγελματικά συστήματα (Complete Professional Systems - CPS) τα οποία διαθέτουν δυνατότητες ανίχνευσης, ελέγχου και επικοινωνίας. Τα δε αυτόνομα οχήματα (AVs) μπορούν να αλληλοεπιδρούν με έξυπνα συστήματα υποδομής αλλά και με το Διαδίκτυο.

Τα σύγχρονα αυτοκίνητα φέρουν μεγάλο αριθμό από ενσωματωμένες IoT συσκευές, όπως για παράδειγμα On-Board Diagnostics (OBDS), Electronic Control Units (ECUs) και On-Board Units (OBUs) ώστε να λαμβάνουν τα δεδομένα διαφόρων ενσωματωμένων αισθητήρων. Επίσης διαθέτουν συστήματα επικοινωνιών που επιτρέπουν στον οδηγό και στους επιβάτες να αλληλοεπιδρούν με το όχημα (π.χ. μέσω Bluetooth) ενώ επίσης επιτρέπουν στο όχημα να αλληλοεπιδρά με τα συστήματα της υποδομής και/ή το Διαδίκτυο με χρήση τεχνολογίας 5G.

Η ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων διαχείρισης διασταυρώσεων (Autonomous Intersection Management - AIM) είναι μια επείγουσα πρόκληση [29]. Ο αριθμός των φαινομένων κυκλοφοριακής συμφόρησης, ειδικά στις διασταυρώσεις έχει μεγαλώσει κατά πολύ και το ίδιο ο αριθμός των κινούμενων οχημάτων. Η κύρια ευθύνη για αυτό είναι τα ανθρώπινα λάθη στην αντίληψη της κατάστασης και την λήψη αποφάσεων.

### 5.2.1. Χρήση EoT και Blockchain

Πρόσφατα η υποστήριξη των IoT από εφαρμογές και υπηρεσίες που προσφέρονται στις υποδομές νέφους (Cloud) έχει οδηγήσει στο να αναφερόμαστε στο Νέφος των Αντικειμένων (Cloud-of-Things - CoT) ([65], [29]). Η μεγάλη πρόκληση του CoT είναι να διαχειριστεί τα όλο και περισσότερα δεδομένα που δημιουργούνται από τα IoT συστήματα. Έτσι έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος η ιδέα ενός αποκεντρωμένου μοντέλου που ονομάζεται Edge-of-Things (EoT) ([66], [29]) και στο οποίο η αποθήκευση δεδομένων, η επεξεργασία και ο έλεγχος γίνονται κοντά στην πηγή των δεδομένων. Οπότε, στην εν λόγω περίπτωση, κάθε ακραία συσκευή (edge device) μπορεί να αποφασίζει ποια δεδομένα θα αποθηκευτούν ή θα τύχουν επεξεργασίας τοπικά και ποια από τα δεδομένα θα αποσταλούν στο υπολογιστικό νέφος για περαιτέρω χρήση.

Στα αυτόνομα οχήματα η ορθή διαχείριση των διασταυρώσεων είναι η μείζονα πρόκληση. Έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις και έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχοι αλγόριθμοι οι οποίοι βασίζονται σε επικοινωνίες V2V, V2I, V2P και γενικά V2X.

Το σύστημα AIM (Autonomous Intersection Management) προτάθηκε για την αυτόνομη διαχείριση διασταυρώσεων από τους Dresner και Stone [67], οι οποίοι μέσω εξομοίωσης απέδειξαν ότι ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να διαχειρισθεί αποδοτικότερα μια διασταύρωση σε σχέση με τα φανάρια και τα σήματα ελέγχου κυκλοφορίας. Ο κώδικας του προγράμματος προσφέρεται ανοικτός στην ερευνητική κοινότητα και είναι διαθέσιμος για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στην ιστοσελίδα του έργου AIM<sup>187</sup>.

Στο σύστημα AIM γίνεται χρήση ενός συστήματος αυτόματης διαχείρισης διασταυρώσεων πολλαπλών πρακτόρων (Multi-Agent Autonomous Intersection Management, MA-AIM) το οποίο στηρίζεται στην επικοινωνία οχήματος-υποδομής (V2I) και αντίστροφα (I2V) και το οποίο είναι ικανό να διαχειρισθεί την διέλευση πολλών οχημάτων σε μια διασταύρωση.

Σε μία μελέτη του συστήματος AIM [29], για την αντιμετώπιση των θεμάτων αξιοπιστίας και ασφάλειας ενός συστήματος AIM προτείνεται η χρήση τεχνολογιών Edge Of Things (EoT) και Blockchain.

Το σύστημα αυτό αποτελείται (βλ. Εικόνα 29) από ένα υποσύστημα Πράκτορα-Διαχειριστή της Διασταύρωσης (Intersection Manager Agent - IMA) το οποίο διαθέτει η υποδομή της διασταύρωσης και το οποίο:

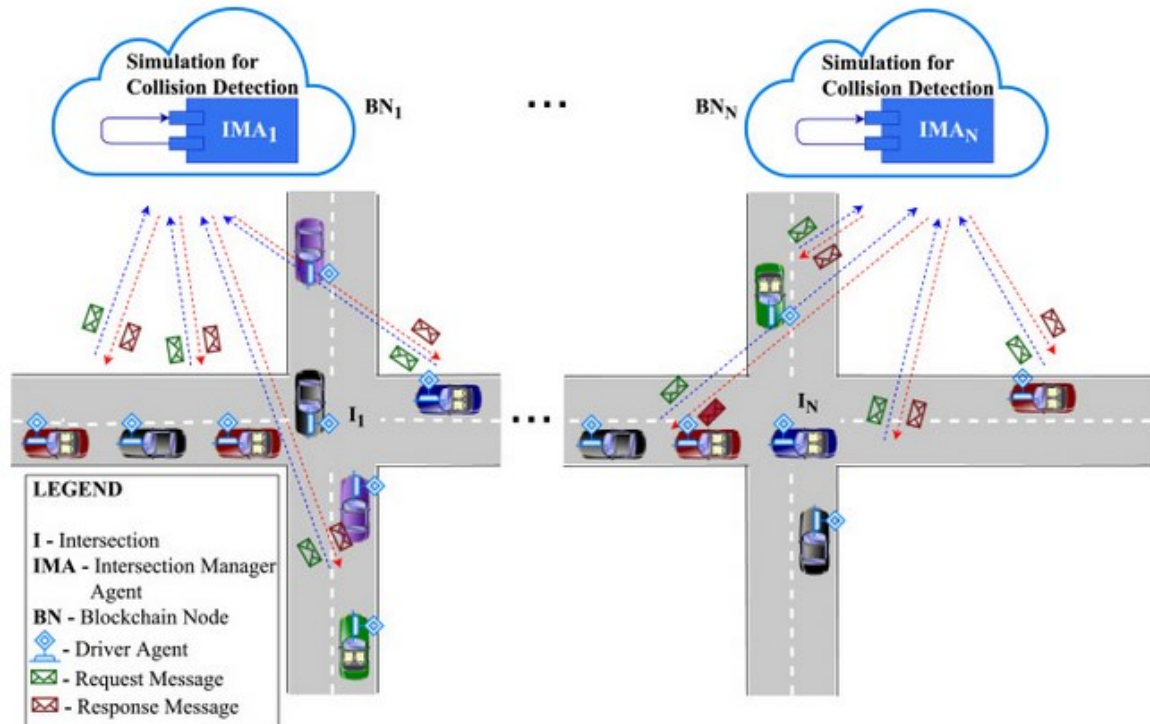
- α. Αλληλεπιδρά με τα οχήματα μέσω αντίστοιχου λογισμικού που έχει εγκατασταθεί και εκτελείται σε αυτά (Πράκτορες-Οδηγοί / Driver Agents - DAs) σε ένα περιβάλλον EoT.
- β. Χρησιμοποιεί μηχανισμούς Blockchain για να ενορχηστρώσει με ασφάλεια την διέλευση των οχημάτων από τη διασταύρωση.

Τα AVs πλησιάζοντας στην διασταύρωση, μέσω των DAs που διαθέτουν, επικοινωνούν με το IMA μέσω συστήματος EoT, ώστε να συμφωνήσουν στη σειρά και στην χρονοθυρίδα (time slot) που θα τους διατεθεί για τη διέλευση. Το AIM που χρησιμοποιεί τα στοιχεία του IMA, διαθέτει έναν προσομοιωτή και χρονοπρογραμματιστή (time scheduler) με τα οποία εξομοιώνει την κίνηση των AVs και εντοπίζει πιθανές συγκρούσεις μεταξύ των AVs αλλά επίσης υπολογίζει και την κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Το blockchain χρησιμοποιείται για να εξαλειφθούν δύο μειονεκτήματα που είναι χαρακτηριστικά του AIM, δηλαδή η αξιοπιστία και η ασφάλεια [29]. Η αξιοπιστία αυξάνεται γιατί το blockchain ως τεχνολογία είναι αποκεντρωμένο και δεν έχει ένα σημείο αστοχίας (single point of failure) ενώ και η ασφάλεια αυξάνει γιατί δεν είναι καθόλου εύκολο μια κακόβουλη επίθεση να αλλάξει ένα block (πλοκάδα) της αλυσίδας.

---

<sup>187</sup> Στην ιστοσελίδα του προγράμματος AIM υπάρχουν διαθέσιμα όλα τα στοιχεία και ο πηγαίος κώδικας. Βλέπε επίσης: <https://www.cs.utexas.edu/~aim/>



Εικόνα 29: Σύστημα AIM βασισμένο σε Blockchain [29]

### 5.2.2. Ομάδα Αυτοκινήτων

Η κίνηση των αυτοκινήτων κατά ομάδες-διμοιρίες είναι μια τεχνική με πεδίο εφαρμογής στους μεγάλους δρόμους (highways) και αφορά κυρίως στα βαρέως τύπου οχήματα (Heavy-Duty Vehicles - HDVs), τα οποία οργανώνονται σε ομάδες, όπου το καθένα ακολουθεί το προηγούμενό του. Η διάταξη αυτή καλείται συχνά και ως «οδικό-τραίνο». Τα οχήματα κινούνται με την ίδια ταχύτητα και σε κοντινή μεταξύ τους απόσταση.

Η κίνηση σε ομάδα αυξάνει την ασφάλεια λόγω της μικρής μεταβλητότητας της ταχύτητας αλλά και την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας, ευρύτερα. Επιπλέον, ελαχιστοποιεί την κατανάλωση καυσίμου και την έκλυση καυσαερίων [68].

Η τεχνική αυτή βρίσκει μεγάλη ανταπόκριση σε ιδιωτικούς στόλους οχημάτων και εμπορικούς μεταφορείς [69].

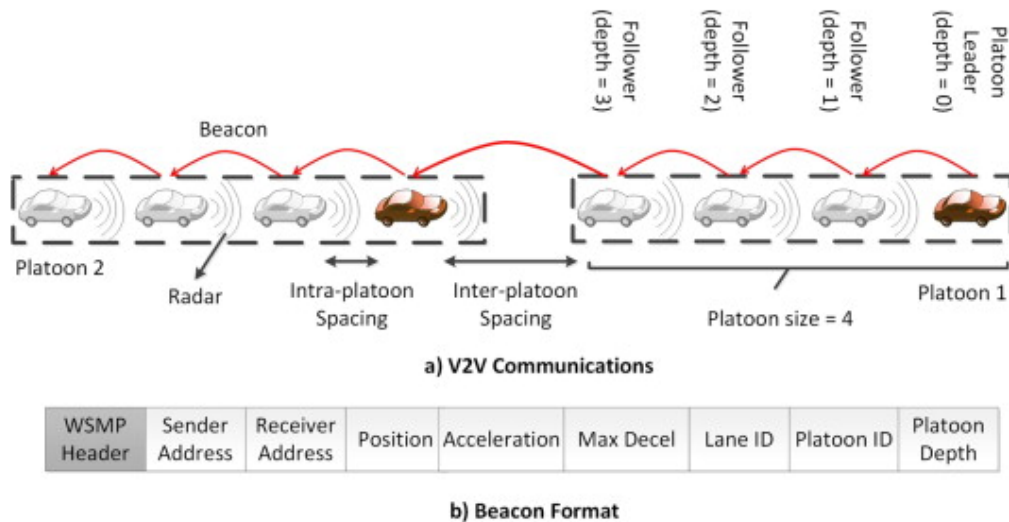
Αν και η κίνηση κατά ομάδες-διμοιρίες σχεδιάστηκε για τους πλήρως αυτοματοποιημένους αυτοκινητόδρομους<sup>188</sup>, η εξέλιξη στις ασύρματες επικοινωνίες και στον έλεγχο των αυτοκινήτων καθιστά την τεχνική αυτή πραγματοποιήσιμη και στα συνεργατικά αυτοματοποιημένα οχήματα (για εφαρμογές Cooperative Adaptive Cruise Control - CACC).

<sup>188</sup> AHS (Automated Highway System - Πλήρως Αυτοματοποιημένος Αυτοκινητόδρομος): Είναι μια αρκετά παλιά πρόταση, όπου τα συστήματα του δρόμου καθοδηγούν το όχημα και όχι ο οδηγός. <https://highways.dot.gov/public-roads/summer-1994/automated-highway-system-idea-whose-time-has-come>

Παρότι η ιδέα της κίνησης σε ομάδα είναι κοινή, έχουν προταθεί και δοκιμαστεί διάφορες υλοποιήσεις. Πάντως σε όλες τις περιπτώσεις, η επικοινωνία V2V αναγνωρίζεται ως εξαιρετικά απαραίτητη για την καλύτερη υλοποίηση του συστήματος, καθώς σε περίπτωση που γίνει χρήση μόνο των δεδομένων των αισθητήρων του αυτόνομου οχήματος η γνώση περιορίζεται στο μπροστινό όχημα και όχι στην κίνηση συνολικά της ομάδας [70].

Υπάρχουν προσεγγίσεις με οχήματα «οδηγούς» τα οποία ορίζουν και καθοδηγούν όλη την παρεπόμενη αλλά και άλλες προσεγγίσεις με πρωτόκολλα επικοινωνίας V2V (όπου το κάθε όχημα επικοινωνεί με το μπροστινό του π.χ. κάνοντας χρήση πρωτοκόλλου DSRC (5,9 GHz) [71]).

Στην Εικόνα 30 φαίνεται η κίνηση κατά ομάδες οχημάτων CACC, όπου το κάθε όχημα λαμβάνει πληροφορίες από το μπροστινό του με χρήση V2V και τροφοδοτεί με αυτές το σύστημα ελέγχου της διαμήκους κίνησης έτσι ώστε να διατηρεί ένα καθορισμένο διάκενο από το μπροστινό του. Όλα τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με radar για να μετρούν την απόσταση και την ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος.



Εικόνα 30: Αναπαράσταση επικοινωνίας V2V σε κίνηση κατά ομάδες CACC [71]

### 5.2.3. Διασταύρωση Ομάδων-Διμοιριών οχημάτων

Η συνεργατική οδήγηση μπορεί να επεκτείνει κατά πολύ την απόδοση των αστικών οδικών δικτύων. Η κίνηση σε ομάδα-διμοιρία επιτρέπει μεγαλύτερη χωρητικότητα γιατί τα οχήματα μπορούν να κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες και σε μικρότερες μεταξύ τους αποστάσεις.

Η καθυστέρηση στις διασταυρώσεις χωρίς σήμανση μπορεί να εξαλειφθεί, συντονίζοντας την άφιξη και την αποχώρηση των ομάδων οχημάτων σε αυτές.

Η ιδανική περίπτωση είναι όταν μια ομάδα φθάνει σε μια διασταύρωση να την βρίσκει κενή και να την διασχίζει, χωρίς καθυστερήσεις. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, ένα σύστημα διαχείρισης θα πρέπει να ρυθμίζει κατάλληλα το μέγεθος της ομάδας, την

ταχύτητα κίνησης και τις αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων. Το μοντέλο κατά το οποίο οι παράμετροι κίνησης των ομάδων εξασφαλίζουν τον απαραίτητο συγχρονισμό για διέλευση χωρίς στάση καλείται ως “*approach-and-pass*” [72].

Στο σενάριο αυτό, το χρονικό διάκενο μεταξύ διαδοχικών ομάδων που κινούνται στην ίδια κατεύθυνση (από το οπίσθιο μέρος του τελευταίου οχήματος της προπορευόμενης ομάδας έως το εμπρόσθιο μέρος του πρώτου οχήματος της επόμενης) σε κάθε κατεύθυνση θα πρέπει να επαρκεί για την ασφαλή διέλευση της διασταυρούμενης ομάδας. Επομένως η αύξηση του μεγέθους της ομάδας δεν έχει πάντα θετικό αντίκτυπο στη συνολική απόδοση του συστήματος, σε αντίθεση με την περίπτωση των πλήρως αυτοματοποιημένων αυτοκινητοδρόμων<sup>189</sup>.

Η απόδοση του συνολικού συστήματος εξαρτάται από την ακρίβεια και την ταχύτητα των αισθητήρων, την υπολογιστική ισχύ, την τεχνολογία επικοινωνίας V2V και V2I και το σύστημα ενεργοποίησης των αποφάσεων. Επειδή πάντα μπορεί να υφίστανται αποκλίσεις μικρού βαθμού μεταξύ της υπολογισθείσας/προτεινόμενης και της πραγματικής κίνησης των οχημάτων, υπάρχει η περίπτωση της αποτυχίας του συγχρονισμού. Αυτό σημαίνει ότι κάποια ομάδα θα φτάσει στη διασταύρωση νωρίς (όταν η ομάδα που αναχωρεί δεν έχει καθαρίσει τη διασταύρωση) ή αργά (όταν το χρονικό διάστημα μέχρι την άφιξη της επόμενης ομάδας που πλησιάζει είναι ανεπαρκές για την ασφαλή διέλευση όλης της ομάδας μέσω της διασταύρωσης), οπότε πρέπει να σταματήσει και να περιμένει για να γίνει επανασυγχρονισμός.

Επανασυγχρονισμός σημαίνει ότι η ομάδα θα περιμένει για το επόμενο διάκενο μεταξύ των ομάδων της διασταυρούμενης κατεύθυνσης για να διασχίσει τη διασταύρωση (“*stop-and-pass*”). Στην περίπτωση αυτή, το διάκενο μεταξύ των ομάδων στη διασταυρούμενη κατεύθυνση θα πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής διέλευση της ομάδας σε αναμονή.

Όταν ο συγχρονισμός αποτυγχάνει επαναληπτικά, η απόδοση του συστήματος μειώνεται.

Ένας τρόπος για να αυξηθεί ο βαθμός επιτυχίας του συστήματος συγχρονισμού, είναι να προβλεφθεί ένα βέλτιστο επιπλέον χρονικό διάκενο (gap) κατά την άφιξη και την αναχώρηση διαδοχικών διασταυρούμενων ομάδων στη διασταύρωση [72].

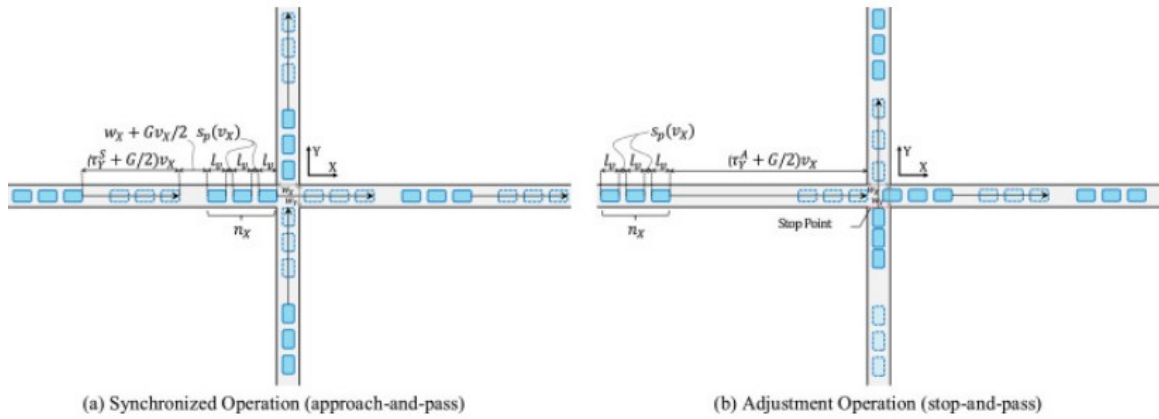
Οι πλέον καθοριστικές παράμετροι για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης είναι ο καθορισμός του μεγέθους (αριθμού οχημάτων) των ομάδων και αυτού του πρόσθετου χρονικού διακενου [72].

Στην Εικόνα 31 φαίνεται η κίνηση των ομάδων στις δύο περιπτώσεις. Στο (a) η ομάδα που φτάνει από αριστερά βρίσκει κενή τη διασταύρωση και την διασχίζει, ενώ στο (b) η ομάδα που φτάνει από κάτω περιμένει τη διέλευση της ομάδας που διασχίζει την διασταύρωση από αριστερά προς τα δεξιά.

---

<sup>189</sup> Σε αυτοματοποιημένες λεωφόρους, η χωρητικότητα είναι μια αυξητική συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των οχημάτων ([71], [72], [73]).

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X



Εικόνα 31: Μοντέλα διασταύρωσης ομάδων οχημάτων [72]

Σε συνθήκες υπερβολικής συμφόρησης τα μοντέλα εξομοίωσης έδειξαν ότι η απόδοση του δικτύου μπορεί να αυξηθεί κατά πολύ (έως και 138%) με την αποδοχή της αλλαγής του μοντέλου λειτουργίας της διασταύρωσης σε μια από τις κατευθύνσεις κυκλοφορίας από *approach-and-pass* σε *stop-and-pass* [72].

## 6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύστημα GLOSA

### 6.1. Περιγραφή του Συστήματος

Το γεγονός ότι τα οχήματα τον περισσότερο χρόνο τους κινούνται με μεγάλη ταχύτητα μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην περίπτωση που συμβεί ένα ατύχημα, ιδίως δε όταν υπάρχει κίνδυνος για την ασφάλεια του οδηγού και των επιβατών.

Επειδή η ασφάλεια ενός οχήματος – όπως και των επιβαινόντων σε αυτό – συνιστά ζήτημα μείζονος προτεραιότητας, είναι εξαιρετικά σημαντικό το να λαμβάνονται συγκεκριμένα μέτρα για την πλήρωση του σκοπού αυτού<sup>190</sup>. Μια από τις σημαντικότερες αιτίες ατυχημάτων είναι η παραβίαση της προτεραιότητας στις διασταυρώσεις, είτε λόγω απροσεξίας είτε λόγω δυσχερών συνθηκών ορατότητας ή για οποιονδήποτε άλλο λόγο.

Η χρήση της τεχνολογίας V2X, επιτρέπει τον εντοπισμό των οχημάτων στην εγγύς περιοχή μιας διασταύρωσης, επιτυγχάνοντας έγκαιρη και αξιόπιστη εκτίμηση της κατάστασης κίνησής των οχημάτων. Στην περίπτωση που κάποια οχήματα βρίσκονται σε τροχιά σύγκρουσης, ένα κατάλληλο σύστημα προειδοποιεί με οπτικά και ηχητικά μηνύματα τους χρήστες. Επιπλέον, εάν χρειαστεί, μπορεί να ληφθούν και οι απαιτούμενες ενέργειες για την αποτροπή της επικείμενης σύγκρουσης<sup>191, 192</sup>.

Μια μέθοδος για τη μείωση των συνεχόμενων στάσεων-εκκινήσεων στις αστικές περιοχές είναι η βελτιστοποίηση του χρονισμού των (φωτεινών) σημάτων ελέγχου της κυκλοφορίας<sup>193</sup>. Ιστορικά, τα εργαλεία της βελτιστοποίησης του χρονισμού των σημάτων αναπτύχθηκαν για τη μείωση των καθυστερήσεων και των στάσεων που βιώνουν οι οδηγοί, στις αστικές κυρίως περιοχές. Πιο πρόσφατες μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση της σήμανσης οδικής κυκλοφορίας, έχουν λάβει υπόψη αλλά και ενσωματώσει τις αλλαγές της συμπεριφοράς των οδηγών<sup>194, 195</sup>.

---

<sup>190</sup> Papadimitratos, P., La Fortelle, A., Evenssen, K., Brignolo, R. and Cosenza, S. (2009, November): Vehicular communication systems: Enabling technologies applications and future outlook on intelligent transportation. *IEEE Communications Magazine*, vol.47, no.11, pp.84-95, doi: 10.1109/MCOM.2009.5307471.

<sup>191</sup> Πολλά συστήματα πληροφοριών οδηγού και παρακολούθησης της κυκλοφορίας έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν: CACS (Capital Area Community Services) στην Ιαπωνία και ALI στη Γερμανία. Τα μελλοντικά συστήματα πρέπει να σχεδιάζονται αρθρωτά σύμφωνα με διακριτά βήματα ως κάτωθι: Το καλύτερο πρώτο βήμα είναι ένα αυτόνομο σύστημα πλοήγησης. Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει κάποια αρκετά φθηνή υποδομή με πληροφορίες σταθερής κατάστασης που μεταδίδονται στα αυτοκίνητα. Το τρίτο βήμα καθιστά αυτές τις πληροφορίες δυναμικές, δηλαδή εξαρτώμενες από την κίνηση. Η Volkswagen και η Siemens κατασκεύασαν σχετικό εξοπλισμό επίδειξης στο Wolfsburg [27].

<sup>192</sup> Βλέπε, π.χ., την προσέγγιση που προτείνεται στην εργασία: Joerer, S., Segata, M., Bloessl, B., Lo Cigno, R., Sommer, C. and Dressler, F. (2012): To Crash or Not to Crash: Estimating its Likelihood and Potentials of Beacon-based IVC Systems. In: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2012)*, Seoul, Korea, November 2012, pp.25-32, IEEE, doi: [10.1109/VNC.2012.6407441](https://doi.org/10.1109/VNC.2012.6407441).

<sup>193</sup> Yang, K., Guler, S.I., & Menendez, M. (2016): Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.72, pp.109-129, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.009>

<sup>194</sup> Rittger, L. (2015): Driving Behaviour and Driver Assistance at Traffic Light Intersections. Julius-Maximilians Universität Würzburg, Germany. Available at: <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/year/2015/docId/11764>

Ο έλεγχος των οδικών φαναριών ως ένας τρόπος διαχείρισης της κυκλοφορίας είναι ένας σημαντικός και αποτελεσματικός παράγοντας για τη βελτίωση της χωρητικότητας των δρόμων στις αστικές περιοχές, για τη διευκόλυνση της κυκλοφοριακής συμφόρησης<sup>196</sup> και επίσης για τη μείωση του χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων [73]. Τόσο ο ορθολογισμός όσο και η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής του ελέγχου των σημάτων οδικής κυκλοφορίας, σχετίζονται άμεσα με την αποτελεσματικότητα της κυκλοφοριακής διαχείρισης<sup>197</sup>.

Για τους παραπάνω λόγους διεξάγεται εκτεταμένη έρευνα [74] προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης κατάλληλων συστημάτων για τον έλεγχο της σήμανσης οδικής κυκλοφορίας. Οι συναφείς στρατηγικές ελέγχου οι οποίες έχουν αναπτυχθεί, επιδιώκουν την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου που διατίθεται από τα μετακινούμενα οχήματα.

Γενικά, ο έλεγχος της κυκλοφορίας μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σταθερού και προκαθορισμένου χρονισμού (fixed-time) και
- χρονισμού προσαρμοζόμενου στην κυκλοφορία.

Ο έλεγχος με σταθερό χρονισμό (fixed-time) αποδίδει καλά σε διασταυρώσεις οι οποίες απέχουν μεταξύ τους αρκετά και/ή που εξυπηρετούν σταθερό όγκο κυκλοφορίας ή για τις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες η κυκλοφορία υπόκειται σε «μοτίβα» σε καθορισμένες ώρες της ημέρας<sup>198, 199</sup>, αλλά δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις αλλαγές κυκλοφορίας/οδικής κίνησης σε πραγματικό χρόνο (real-time) διότι η διάρκεια κύκλου, η αλληλουχία των φάσεων και ο χρόνος κάθε φάσης είναι προκαθορισμένα.

Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, οι ερευνητές<sup>200</sup> πρότειναν ο έλεγχος της κυκλοφορίας να είναι ενεργός και επίσης προσαρμοζόμενος στην ισχύουσα κυκλοφορία<sup>201</sup>. Καταρχήν, ο ενεργός έλεγχος χρησιμοποιεί μετρήσεις από αισθητήρες,

---

<sup>195</sup> Dressler, F., and Sommer, C. (2010): On the Impact of Human Driver Behavior on Intelligent Transportation Systems. In: *Proceedings of the 71<sup>st</sup> IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2010-Spring)*, Taipei, Taiwan, May 2010, pp.1-5, IEEE, doi: 10.1109/VETECS.2010.5493964.

<sup>196</sup> Για περισσότερα σχετικά στοιχεία βλέπε, μεταξύ άλλων: Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000): Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, vol.62, no.2, pp.1805-1824, doi: 10.1103/PhysRevE.62.1805

<sup>197</sup> Figueiredo, L., Jesus, I., Machado, J., Ferreira, J. and Martins de Carvalho, J. (2001): *Towards the development of intelligent transportation systems*. In: *Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems (ITSC-2001)*, (Cat. No.01TH8585), pp.1206-1211, IEEE, doi: 10.1109/ITSC.2001.948835.

<sup>198</sup> Krauss, S. (1998): Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. PhD Thesis, University of Koln. <http://e-archive.informatik.uni-koeln.de/319/>

<sup>199</sup> Nagel, K., Wagner, P. and Woessler, R. (2003): Still flowing: Approaches to traffic flow and traffic jam modeling. *Operations Research*, vol.51, no.5, pp. 681-710, doi: 10.1287/opre.51.5.681.16755.

<sup>200</sup> Βλέπε, μεταξύ άλλων: Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Vasilaki, E., et al. (2021): 5G-DRIVE Program, Deliverable 2.3: "Final Report of Architecture and Use Case Implementation". <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>201</sup> Yang, K., Guler, S.I. & Menendez, M. (2016): Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.72, pp.109-129, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.009>



όπως επαγωγικούς βρόχους ή μοτίβα, κάμερες αναγνώρισης κλπ., για τον προσδιορισμό του όγκου της κυκλοφοριακής κίνησης. Με βάση τα δεδομένα που καταγράφονται, αναπροσαρμόζεται και ο χρόνος της φάσης των σηματοδοτών κυκλοφορίας σε κατάσταση «πράσινου χρώματος».

Η πρόγνωση για την κατάσταση των φαναριών μπορεί να είναι μια υπηρεσία που βελτιώνει την ασφάλεια και την ευκολία για τους οδηγούς, παρέχοντάς τους συνδρομή στις διασταυρώσεις<sup>202</sup> (βλ. Εικόνα 32).

Περιλαμβάνει υπηρεσίες όπως η εφαρμογή Time-To-Green (TTG)<sup>203</sup>, που παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις αλλαγές των φάσεων των φαναριών και η εφαρμογή Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA), η οποία υπολογίζει τη βέλτιστη ταχύτητα προσέγγισης ώστε όταν τα οχήματα πλησιάσουν στην επερχόμενη διασταύρωση να βρουν τον οδικό σηματοδότη με πράσινο φως<sup>204</sup> (βλ. Εικόνα 33) [75].

Αυτές οι «συνεργατικές» υπηρεσίες σε κατάσταση «πράσινου φωτός», συνεπάγονται πολλά οφέλη, όπως ενδεικτικά:

- α) Εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση της ρύπανσης<sup>205</sup> και
- β) παροχή μεγαλύτερης άνεσης στους οδηγούς.

---

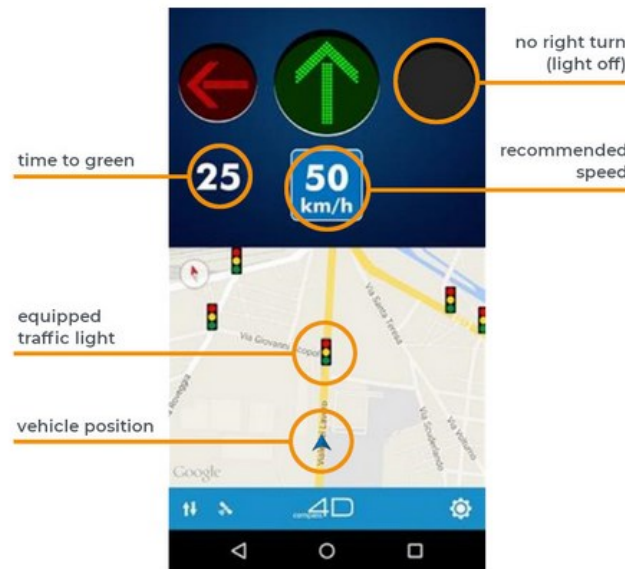
<sup>202</sup> Treiber, M. and Kesting, A. (2014): Automatic and efficient driving strategies while approaching a traffic light. In: *Proceedings of the 2014 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.1122-1128, IEEE, doi: 10.1109/ITSC.2014.6957838.

<sup>203</sup> Βλέπε: <https://www.swarco.com/solutions/connected-driving/traffic-light-assistance>

<sup>204</sup> Chao-Qun, M., Hai-Jun, H. and Tie-Qia, T. (2008): Improving urban traffic by velocity guidance. In: *Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, vol.2, pp.383-387, doi: 10.1109/ICICTA.2008.288.

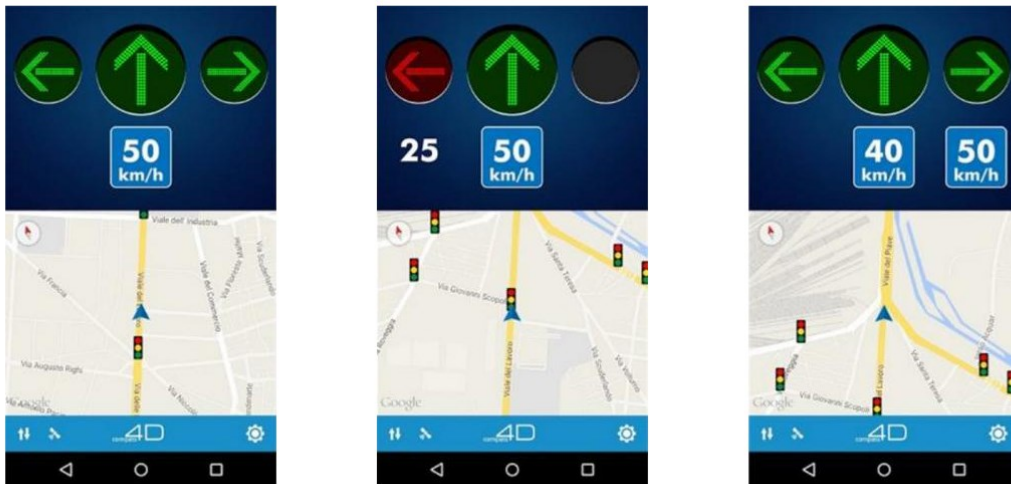
<sup>205</sup> Sanchez, M., Cano, J., and Kim, D. (2006): Predicting Traffic lights to Improve Urban Traffic Fuel Consumption. In: *Proceedings of the 2006 6<sup>th</sup> International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp.331-336, doi: 10.1109/ITST.2006.288906.

## Traffic Light Assistance



Εικόνα 32: Επεξήγηση συμβόλων εφαρμογής GLOSA [73]

## Green Light Optimised Speed Advisory (GLOSA)



Εικόνα 33 : Ενδεικτικές οθόνες εφαρμογής GLOSA [73]

Το σύστημα GLOSA παρέχει στους οδηγούς συμβουλές ταχύτητας που τους επιτρέπουν να διέρχονται από τους σηματοδότες κατά τη διάρκεια του φωτεινού σηματοδότη σε κατάσταση «πράσινου χρώματος». Τα συστήματα αυτά, έως τώρα, υλοποιούνται συνήθως με πινακίδες οδικών μηνυμάτων οι οποίες τοποθετούνται μπροστά από τους

φωτεινούς σηματοδότες-φανάρια. Ωστόσο, λόγω των σημαντικών ζητημάτων κόστους και συντήρησης<sup>206, 207</sup>, μόνο ένας μικρός αριθμός συστημάτων GLOSA έχει τύχει εγκατάστασης σε ευρεία παγκόσμια κλίμακα [10].

Ένα σύστημα GLOSA χρησιμοποιεί έγκαιρες και ακριβείς πληροφορίες σχετικά με το χρονοδιάγραμμα των φάσεων, την τοποθεσία και τα τρέχοντα σήματα της φωτεινής σήμανσης για να καθοδηγήσει τους οδηγούς (μέσω επικοινωνίας υποδομής-οχήματος V2I<sup>208, 209</sup>) με συμβουλές αναφορικά με την ενδεικνυόμενη ταχύτητα, ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη μετακίνηση των οχημάτων μεταξύ των οδικών φαναριών και με λιγότερο χρόνο στάσης/αναμονής.

Η εφαρμογή GLOSA μπορεί δυνητικά να αξιολογηθεί και για τους δύο τύπους χρονισμού των σημάτων κυκλοφορίας που αναφέρθηκαν νωρίτερα (δηλαδή του σταθερού και προκαθορισμένου χρονισμού και για τον μη προκαθορισμένο ενεργό χρονισμό με βάση τις τρέχουσες συνθήκες κυκλοφορίας). Η τηλεπικοινωνιακή υποδομή της αντίστοιχης οδικής διασταύρωσης πρέπει να είναι εξοπλισμένη με συσκευή επικοινωνίας και επίσης να διασυνδέεται με τον ελεγκτή της διασταύρωσης<sup>210</sup>. Με αυτό τον τρόπο, η διασταύρωση στέλνει δεδομένα στα οχήματα που πλησιάζουν (όπως π.χ. δεδομένα των γεωγραφικών συντεταγμένων των λωρίδων εισόδου και εξόδου, δεδομένα θέσης, δεδομένα της τρέχουσας κατάστασης των οδικών φαναριών και της διάρκειας κάθε χρωματικής σήμανσης αυτών). Το ενσωματωμένο σύστημα των οχημάτων-αποδεκτών-ληπτών επεξεργάζεται τα ως άνω δεδομένα για να υπολογίσει τη βέλτιστη ταχύτητα προσέγγισης του οχήματος ώστε αυτό τελικά να φτάσει στη διασταύρωση όταν οι σηματοδότες θα βρίσκονται σε κατάσταση «πράσινου φωτός».

Επιπλέον, τα συστήματα GLOSA στοχεύουν στο να παρέχουν ιδανικές συστάσεις ταχύτητας στον οδηγό όταν πλησιάζει σε ένα φανάρι, αποσκοπώντας παράλληλα στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> (και ταυτόχρονα στην ελάττωση κατανάλωσης καυσίμου<sup>211, 212</sup>) όπως επίσης και στη μείωση του αριθμού των μη αναγκαίων στάσεων

---

<sup>206</sup> Serebinski, M., Wojciech Mazurczyk, W., and Khadraoui, D. (2013, May): Multi-Segment Green Light Optimal Speed Advisory. In: *Proceedings of IEEE 27<sup>th</sup> International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW)*, pp.1-7, IEEE, doi:10.1109/IPDPSW.2013.157.

<sup>207</sup> Eckhoff, D., Halmos, B. and German, R. (2013): Potentials and limitations of Green Light Optimal Speed Advisory systems. In *Proceedings of the 2013 IEEE Vehicular Networking Conference*, pp.103-110, IEEE, doi: 10.1109/VNC.2013.6737596.

<sup>208</sup> Gradinescu, V., Gorgorin, C., Diaconescu, R., Cristea V., and Iftode, L. (2007): Adaptive traffic lights using car-to-car communication. In: *Proceedings of the IEEE 65<sup>th</sup> VTC-Spring*, pp.21-25, IEEE, doi: 10.1109/VETECS.2007.17.

<sup>209</sup> Iglesias, I., Isasi, L., Larburu, M., Martinez, V. and Molinete, B. (2008, September): *I2v communication driving assistance system: On-board traffic light assistant*. In: *Proceedings of the 2008 IEEE 68<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference*, pp.1-5, IEEE, doi: 10.1109/VETECS.2008.437.

<sup>210</sup> Weiss, C. (2011, October): V2X Communication in Europe-From research projects towards standardization and field testing of vehicle communication technology. *Computer Networks*, vol.55, no.14, pp.3103-3119. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.03.016>

<sup>211</sup> Tielert, T., Killat, M., Hartenstein, H., Luz, R., Hausberger, S. and Benz, T. (2010): The Impact of Traffic-Light-to-Vehicle Communication on Fuel Consumption and Emissions. In: *Proceedings of the Internet of Things 2010 Conference (IoT 2010)*, pp.1-8, November 2010, Tokyo, Japan, doi: 10.1109/IOT.2010.5678454.

του οχήματος<sup>213</sup>. Αυτά τα συστήματα έχει αποδειχθεί ότι λειτουργούν καλά με στατικά προγράμματα φωτεινών σηματοδοτών<sup>214</sup> και τώρα πλέον εξελίσσονται ώστε να μπορούν να καλύψουν και δυναμικά προγράμματα φωτεινών σηματοδοτών<sup>215</sup> διότι ένα μεγάλο μέρος αυτών σήμερα, στο εσωτερικό των πόλεων είναι «προσαρμοστικοί»<sup>216</sup> που σημαίνει ότι μπορούν να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους σε ελάχιστο χρόνο [76].

Τα συστήματα GLOSA βελτιώνουν την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας σύμφωνα με τα κάτωθι:

- α) Μείωση των χρόνων στάσης,
- β) βελτίωση της ρευστότητας της κίνησης<sup>217</sup>,
- γ) αύξηση της ασφάλειας λόγω της παροχής δεδομένων πρόβλεψης<sup>218</sup>,
- δ) μείωση του CO<sub>2</sub>, εκπομπών ρύπων, κατανάλωση καυσίμου<sup>219</sup> και
- ε) μείωση του συνολικού χρόνου αναμονής κατά τη διάρκεια του ταξιδιού<sup>220</sup>.

Αυτό το θέμα έχει εξεταστεί<sup>221</sup> στο γαλλικό δημόσιο έργο “Co-Drive” [77] μέσω λειτουργιών που αναπτύχθηκαν από τη Valeo με το όνομα Green Light Optimized Speed

---

<sup>212</sup> Alsabaan, N., Naik, K. and Khalifa, T. (2013, September): Optimization of Fuel Cost and Emissions Using V2V Communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.14, no.3, pp.1449-1461, doi: [10.1109/TITS.2013.2262175](https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2262175).

<sup>213</sup> Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M., and Rieck, D. (2011): Performance study of a green light optimized speed advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp.918-923. Istanbul, Turkey, July 04-08, 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5982524>

<sup>214</sup> Bodenheimer, R., Brauery, A., Eckhoffz, D., and German, R. (2015, January): Enabling GLOSA for Adaptive Traffic Lights. In *Proceedings of the IEEE 2014 Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp.167-174. IEEE, doi: [10.1109/VNC.2014.7013336](https://doi.org/10.1109/VNC.2014.7013336).

<sup>215</sup> Katsaros, K., Kernchen, P., Dianati, M., Rieck, R. and Zinoviou, C. (2011, November): Application of Vehicular Communications for Improving the Efficiency of Traffic in Urban Areas. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.11, no.12, pp.1657-1667.

<sup>216</sup> Dresner, K. and Stone, P. (2008): A multiagent approach to autonomous intersection management. *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol.31, pp.591-656, doi: [10.1613/jair2502](https://doi.org/10.1613/jair2502).

<sup>217</sup> Kesting, A., Treiber, M., Schonhof, M. and Helbing, D. (2008): Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transportation Research Part C*, vol.16, issue 6, pp.668-683. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.12.004>

<sup>218</sup> Suzuki, H. and Marumo, Y. (2020, June): Safety evaluation of green light optimal speed advisory (GLOSA) system in real-world signalized intersection. *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.32, no.3, pp.598-604, doi: [10.20965/jrm.2020.p0598](https://doi.org/10.20965/jrm.2020.p0598).

<sup>219</sup> Alsabaan, N., Naik, K., Khalifa, T. and Nayak, A. (2012): Optimization of Fuel Cost and Emissions with Vehicular Networks at Traffic Intersections. In: *Proceedings of the 2012 15th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp.613-619, doi: [10.1109/ITSC.2012.6338697](https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338697).

<sup>220</sup> Asadi, B. and Vahidi, A. (2010): Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.19, no.3, pp.707-714, doi: [10.1109/TCST.2010.2047860](https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2047860).

<sup>221</sup> Bradai B., Garnault A., Picron V., Gougeon P. (2016): A Green Light Optimal Speed Advisor for Reduced CO<sub>2</sub> Emissions. In: Langheim J. (eds.), *Energy Consumption and Autonomous Driving. Lecture Notes in Mobility*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19818-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19818-7_15)

Advisory (GLOSA) [78], η οποία ανέπτυξε και μελέτησε δύο σενάρια χρήσης, ένα πραγματικό και ένα προσομοιωμένο. Έλαβε χώρα κλιμάκωση σε αστική περιοχή<sup>222</sup>, με διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης σε οχήματα και υποδομές για την επικοινωνία οχημάτων<sup>223</sup> (βλ. Εικόνα 34). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών των δύο σεναρίων έδειξε ότι η προσομοίωση διαθέτει μεγάλη αξιοπιστία, πράγμα που επέτρεψε την κλιμάκωση των σεναρίων σε αστική περιοχή.

Για την ακρίβεια, το πραγματικό σενάριο έλαβε μέρος σε μια κυκλική διαδρομή με 2 φανάρια οδικής σήμανσης (όπως φαίνεται στην Εικόνα 34γ). Οι κύκλοι των φαναριών ήταν: κόκκινο 30 secs, πορτοκαλί 2 secs, πράσινο 25 secs. Επιπλέον, τα φανάρια απείχαν μεταξύ τους 1500 m και ήταν ασυγχρόνιστα. Στα φανάρια είχε τοποθετηθεί κατάλληλος εξοπλισμός<sup>224</sup> (Raspberry Pi computer, δρομολογητής WiFi συμβατός κατά το IEEE 802.11p<sup>225</sup> και κεραία). Ο εξοπλισμός μετέδιδε πληροφορίες για το φανάρι οδικής σήμανσης (ήτοι: ταυτότητα, ώρα, γεωγραφικές συντεταγμένες, τρέχουσα φάση και εναπομένον χρόνος αυτής, όπως και τη διάρκεια καθεμιάς εκ των τριών φάσεων) προς τα διερχόμενα οχήματα. Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε διέθετε εξοπλισμό V2X για να επικοινωνεί με τον εξοπλισμό των φαναριών και η διεπαφή με τον οδηγό ήταν μέσω μιας οθόνης όπως στην Εικόνα 34β και ενός smart-phone.

Ως προσομοιωτής (simulator) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα SUMO<sup>226</sup> (Simulator of Urban Mobility) version 0.22 [79]. Έγινε χρήση του TraCI<sup>227</sup> (Traffic Control Interface) [80] που επιτρέπει τον έλεγχο των προσομοιωμένων οχημάτων κατά την εκτέλεση του προσομοιωτή, οπότε μπόρεσε να προσομοιωθεί η λειτουργία του συστήματος GLOSA. Οι παράμετροι του προσομοιωμένου περιβάλλοντος ρυθμίστηκαν ώστε να προσομοιάζουν στο περιβάλλον του πραγματικού σεναρίου<sup>228</sup>, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34γ.

---

<sup>222</sup> Lebre, M.-A., Le Mouël, F., Ménard, E., Garnault, A., Bradai, B. and Picron, V. (2015, October): Real scenario and simulations on GLOSA traffic light system. In: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ITS World Congress*, Bordeaux, France, October 05-09, 2015. <https://arxiv.org/abs/1506.01965>

<sup>223</sup> Ahmane, M., Abbas-Turki, A., Perronet, F., Wu, J., El Moudni, A., Buisson, J. and Zeo, R. (2013): Modeling and controlling an isolated urban intersection based on cooperative vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.28, pp.44-62, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.11.004>

<sup>224</sup> Βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: Yousef, K.M., Al-Karaki, J.N. and Shatnawi, A.M. (2010, May): Intelligent traffic light flow control system using wireless sensors networks. *Journal of Information Science and Engineering*, vol.26, no.3, pp.753-768.

<sup>225</sup> Bieker, L., Krajzewicz, D., Röckl, M. and Capelle, H. (2010): Derivation of a fast, approximating 802.11p simulation model. In: *Proceedings of the 2010 Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST2010) Conference*, November 9-11, 2010, Kyoto, Japan.

<sup>226</sup> Krajzewicz, D., Behrisch, M., Bieker, L. and Erdmann, J. (2012): SUMO homepage. [Online]. Available at: <http://sumo.sourceforge.net/>

<sup>227</sup> Wegener, A., Piórkowski, M., Raya, M., Hellbrück, H., Fischer, S. and Hubaux, J.-P. (2008): TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators. In: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Communications and Networking Simulation Symposium (CNS)*, doi: 10.1145/1400713.1400740.

<sup>228</sup> Βλέπε επίσης: Krajzewicz, D., Bieker, L. and Erdmann, J. (2012): Preparing simulative evaluation of the GLOSA application. In: *Proceedings of the 19<sup>th</sup> ITS World Congress*, Vienna, Austria, October 22-26, 2012, pp.1-11.

Στην αρχή το σενάριο εκτελέστηκε με μόνο ένα αυτοκίνητο και ο βασικός στόχος ήταν η μέτρηση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων όσον αφορά στις εκπομπές CO<sub>2</sub> ήταν σημαντικά και παρόμοια, δηλαδή 11% μείωση στο προσομοιωμένο και 13% στο πραγματικό σενάριο. Η μικρή διαφορά είχε να κάνει με το προφίλ οδήγησης μεταξύ μηχανής και ανθρώπου και με το πόσο γρήγορα «εναρμονίζεται» ο καθένας με τις προτροπές του συστήματος. Η διαφορά πάντως αποδείχτηκε ελάχιστη, οπότε η προσομοίωση έδειξε να είναι αξιόπιστη για τη μελέτη αυτού του συστήματος.

Στη συνέχεια η προσομοίωση συνεχίστηκε με περισσότερα οχήματα στο δρόμο και με μεταβλητό ποσοστό εξοπλισμένων οχημάτων (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%) και διαφορετικό ποσοστό εξοπλισμένων φαναριών (δηλαδή: 0% να σχετίζεται με κανένα εξοπλισμένο φανάρι, 50% να περιλαμβάνει ένα εξοπλισμένο φανάρι και 100% να αφορά σε δύο εξοπλισμένα φανάρια).

Στην Εικόνα 35 φαίνεται το όφελος από την εφαρμογή GLOSA. Προέκυψε 10% μείωση στις εκπομπές CO<sub>2</sub> με 100% διείσδυση του συστήματος στην υποδομή και στα οχήματα. Επιπλέον προέκυψε ότι με 40% εξοπλισμένα οχήματα και 50% εξοπλισμένα φανάρια υπήρχε 5% μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> και 30% μείωση του χρόνου αναμονής. Παρατηρήθηκε επίσης ότι με 100% εξοπλισμένα οχήματα και φανάρια, ο χρόνος αναμονής έγινε πρακτικά ίσος με το μηδέν, δηλαδή τα οχήματα δεν σταματούσαν καθόλου.

Στη συνέχεια η προσομοίωση εκτελέστηκε για δύο σενάρια αστικής περιοχής. Ένα πρώτο τυπικό σενάριο με την ονομασία Manhattan Map (τοπολογία πίνακα 5x5 με 9 φανάρια ισαπέχοντα κατά 900 m και με 200 οχήματα σε τυχαίες θέσεις) και ένα με πραγματικό χάρτη μιας περιοχής στην Γαλλία (περιοχή του Bobigny). Οι προσομοιώσεις έγιναν και πάλι με διαβαθμισμένο ποσοστό εξοπλισμένων οχημάτων και φαναριών.

Το αποτέλεσμα στο πρώτο σενάριο (Manhattan Map) έδειξε ότι με βαθμό εξοπλισμού 100% σε οχήματα και φανάρια υπήρξε μείωση 10,5% των εκπομπών CO<sub>2</sub>, κέρδος 80% στον χρόνο αναμονής και όφελος 2,5% στον χρόνο ταξιδιού. Με 40% εξοπλισμό φαναριών και 50% οχημάτων παρατηρήθηκε 6% μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και 30% μείωση του χρόνου αναμονής. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα προέκυψαν ως σχετικά σταθερά, ακόμη και εάν η αστική διαμόρφωση ήταν διαφορετική. Επιπλέον, ακόμη και μια μερική διείσδυση του εξοπλισμού έδειξε τις μεγάλες δυνατότητες της εφαρμογής GLOSA.

Στο δεύτερο σενάριο (περιοχή του Bobigny) όπου χρησιμοποιήθηκε πραγματικός χάρτης εκτός από το διαβαθμισμένο ποσοστό εξοπλισμού οχημάτων και φαναριών, εκτελέστηκε και προσομοίωση με διαφορετικές πυκνότητες των οχημάτων.

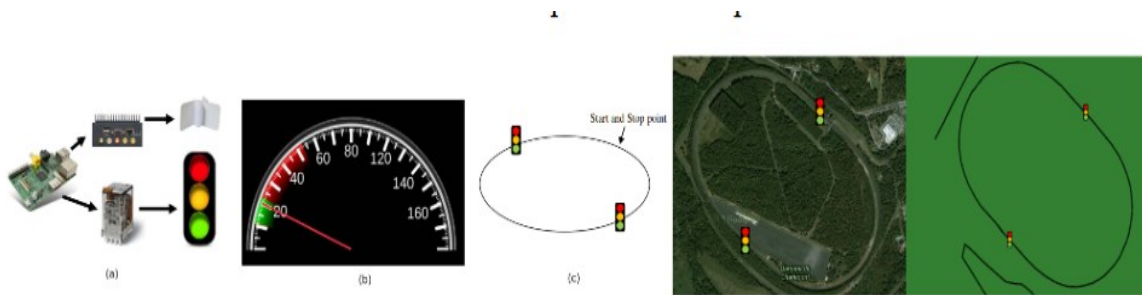
Ένα βασικό συμπέρασμα είναι ότι σε συνθήκες υψηλής πυκνότητας οχημάτων (κυκλοφοριακή συμφόρηση) δεν υπάρχει μείωση του χρόνου ταξιδιού, όπως έχει καταδειχθεί και από άλλες μελέτες [81].

Προέκυψε ότι η μείωση του χρόνου αναμονής αυξάνεται γρήγορα όσο αυξάνεται το ποσοστό των εξοπλισμένων οχημάτων και φαναριών, αλλά είναι πολύ μικρή (<2%) σε συνθήκες υψηλής πυκνότητας οχημάτων, ανεξάρτητα από το ποσοστό των εξοπλισμένων οχημάτων και φαναριών. Η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> δεν ήταν θετική αλλά φάνηκε ελαφρώς αρνητική σε περίπτωση χαμηλής πυκνότητας και χαμηλών

ποσοτών εξοπλισμού. Κατέστη θετική (1,88%) με 90% ποσοστό εξοπλισμένων οχημάτων και φαναριών. Αντίθετα η μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> αυξήθηκε σε περίπτωση υψηλής πυκνότητας οχημάτων σε ποσοστά 4,5%-10% για 70%-100% εξοπλισμένα οχήματα και για 50%-40% εξοπλισμένα φανάρια.

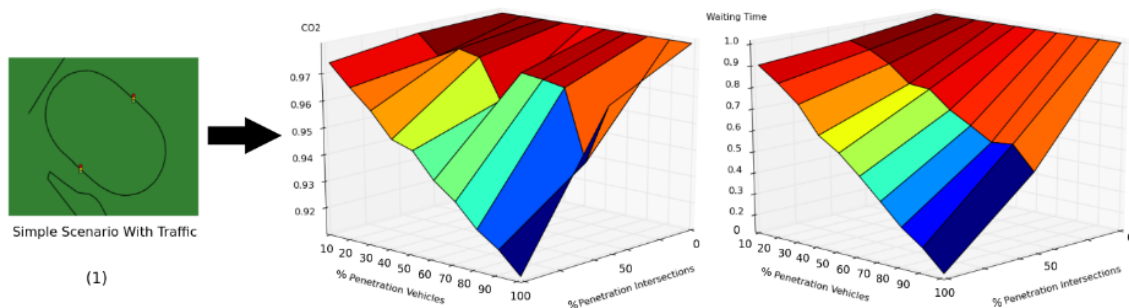
Συνοψίζοντας:

- Η εφαρμογή GLOSA μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, του χρόνου αναμονής και του χρόνου ταξιδιού τόσο σε πειραματικές όσο και σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας [77].
- Οι επιδόσεις της εφαρμογής GLOSA δεν εξαρτώνται από τη φυσική τοπολογία της αστικής περιοχής.
- Αν και η εφαρμογή GLOSA έχει φαινομενικά αρνητικό αντίκτυπο στα μη εξοπλισμένα οχήματα (γιατί πρέπει να υποστούν την «ασυνήθιστη» συμπεριφορά των εξοπλισμένων οχημάτων τα οποία επιβραδύνουν όταν πλησιάζουν σε διασταύρωση), τελικά και αυτά επωφελούνται από τη λειτουργία του αντίστοιχου συστήματος.
- Όταν το ποσοστό του εξοπλισμού των φαναριών και των οχημάτων φτάνει ή υπερβαίνει το 50%, τα αποτελέσματα του συστήματος GLOSA είναι σημαντικά σε όλα τα σενάρια αστικής περιοχής που προσομοιώθηκαν.



Εικόνα 34: Πραγματικά<sup>221</sup> σενάρια και εξομοιώσεις GLOSA από την Valeo<sup>229</sup>

(a) Σχέδιο εξοπλισμού φωτεινών σηματοδοτών, (b) GLOSA HMI και (c) Ρύθμιση φωτεινών σηματοδοτών στο δοκιμαστικό κομμάτι και στην προσομοίωση δοκιμής

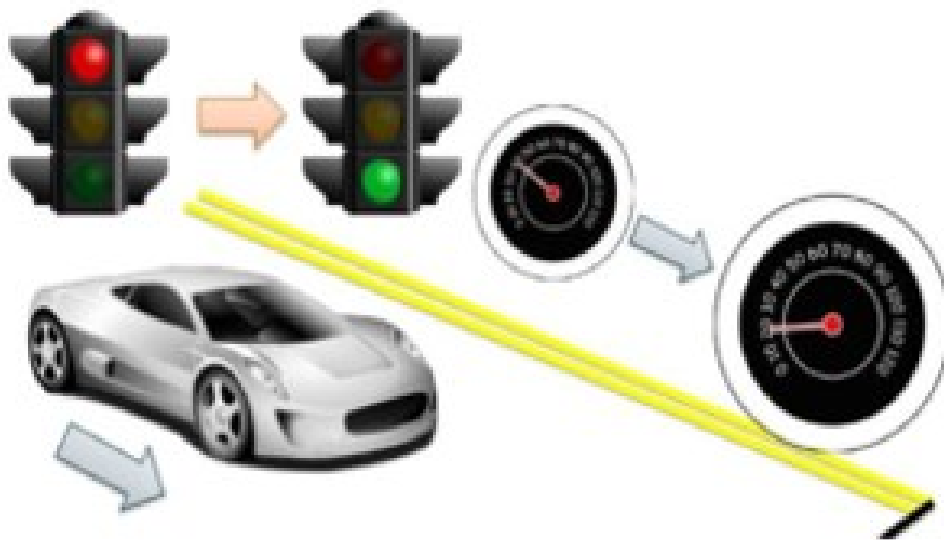


Εικόνα 35: Αποτελέσματα σε απλό σενάριο με κίνηση<sup>230</sup>

<sup>229</sup> Βλέπε επίσης: <https://www.valeo.com/en/comfort-driving-assistance-systems/>

Τα συστήματα GLOSA έχουν αξιολογηθεί ευρέως μέσω προσομοίωσης<sup>230</sup> και ενώ οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στην εκτίμηση των επιπτώσεων της εφαρμογής GLOSA όσον αφορά στις περιβαλλοντικές επιρροές<sup>231</sup>, ολοκληρωμένες προσομοιώσεις που λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική όλων των παραμέτρων δεν είναι συχνές στη διεθνή βιβλιογραφία<sup>232</sup>.

Συνοπτικά, πολυάριθμες μελέτες έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής GLOSA και παρόμοιων συστημάτων αλγορίθμων που βασίζονται σε επικοινωνία I2V ή/και V2V, των οποίων οι πράσινες φάσεις δεν μπορούν (εύκολα) να εντοπιστούν εκ των προτέρων λόγω τυχαίας διέλευσης οχήματος<sup>233</sup>. Οι περισσότερες μελέτες προσομοίωσης αναφέρουν θετικά αποτελέσματα ενώ απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την ανάπτυξη των συστημάτων GLOSA στον πραγματικό κόσμο [82]. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες προβαίνουν σε μια κρίσιμη υπόθεση που μπορεί να μην ισχύει σε πραγματικά σενάρια – δηλαδή υποθέτουν ότι οι χρονισμοί σήματος (διάρκεια και αρχή πράσινου και άλλα διαστήματα) είναι σταθεροί (σταθερού χρόνου).



Εικόνα 36: Εννοιολογική προσέγγιση της περίπτωσης χρήσης GLOSA [2]

<sup>230</sup> Pereira, A.M., Anany, H., Pribyl, O. and Prikryl, J. (2017): Automated Vehicles in Smart Urban Environment: A Review. In: *Proceedings of the 2017 Smart City Symposium (SCSP), Prague*, pp.1-8, doi: 10.1109/SCSP.2017.7973864.

<sup>231</sup> Lebre, M.-A., Le Mouël, F., Garnault, A., and Picron, V. (2015): Real scenario and simulations on GLOSA traffic light system for reduced CO2 emissions, waiting time and travel time. In: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ITS World Congress*, October 2015, Bordeaux. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.01965.pdf>

<sup>232</sup> Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Agapiou, G., Lazaridis, P. and Zaharis, Z. (2021): C-V2X Communications for the Support of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Use Case. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2/2021, pp.93-106. National Institute of Communications, Poland, doi: 10.26636/jtit.2021.152321.

<sup>233</sup> Stevanovic, A., Stevanovic, J. and Kergaye, C. (2013): Green Light Optimized Speed Advisory Systems: Impact of Signal Phasing Information Accuracy. *Journal of the Transportation Research Board*, vol.2390, pp.53-59.



Τα συστήματα GLOSA αποτελούν ένα ενδιαφέρον «πρώτο βήμα» στα συστήματα προηγμένης υποβοήθησης του οδηγού<sup>234</sup> (ADAS) τα οποία βασίζονται στην επικοινωνία των οχημάτων με την υποδομή (V2I), πριν τη χρήση των πληροφοριών από τα αυτόνομα οχήματα για το «χειρισμό» έξυπνων οδικών διασταυρώσεων<sup>235</sup>.

Όσον αφορά στο επιχειρηματικό μοντέλο του συστήματος GLOSA, αυτό στοχεύει να προσφέρει στους οδηγούς αυτοκινήτων μια βελτιστοποιημένη οδηγική εμπειρία μέσω των συμβουλών βελτιστοποίησης της ταχύτητας σε πραγματικό χρόνο<sup>236</sup>. Ένας πάροχος υπηρεσιών μπορεί να προσφέρει μια εφαρμογή λογισμικού (ή μια συσκευή ενσωματωμένη στο όχημα) στους οδηγούς των αυτοκινήτων, οι οποίοι με τη σειρά τους μπορούν να παρακολουθούν την ταχύτητα και τη θέση τους. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων του χρήστη (δηλαδή του οχήματος) και της κυκλοφοριακής κίνησης, ο χρήστης λαμβάνει τις απαιτούμενες, σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο, συμβουλές σχετικά με την (αναμενόμενη) κατάσταση των επόμενων φαναριών. Αυτό εν τέλει επιτρέπει στους χρήστες-οδηγούς των αυτοκινήτων να προσαρμόζουν την ταχύτητά τους ανάλογα, ώστε να φτάσουν στο επόμενο φανάρι όταν εκείνο θα είναι σε φάση πράσινο<sup>237</sup>.

Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα είναι εκείνο που αφορά στην εταιρία NeoGLS<sup>238</sup> η οποία προσφέρει Android εφαρμογή GLOSA για την περιοχή του Bordeaux (Γαλλία) η οποία εφαρμογή καλύπτει 589 διασταυρώσεις με 2.305 φανάρια. Η υπηρεσία GLOSA είναι αυτή τη στιγμή σε εφαρμογή στη μητρόπολη του Bordeaux, με τη μορφή εφαρμογής που προορίζεται για το ευρύ κοινό και διατίθεται δωρεάν σε smart-phone Android. Είναι άμεσα συνδεδεμένο με το σύστημα κεντρικής διαχείρισης των φωτεινών σηματοδοτών του Μπορντό Gertrude<sup>239</sup> ITS από το οποίο αντλεί την πληροφορία της κατάστασης αυτών.

---

<sup>234</sup> Kato, S., Hashimoto, N., Ogitsu, T. and Tsugawa, S. (2010): Driver Assistance Systems with Communication to Traffic Lights - Configuration of Assistance Systems by Receiving and Transmission and Field Experiments. *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.22, no.6, pp.737-744, doi: 10.20965/jrm.2010.p0737.

<sup>235</sup> Advanced driver-assistance systems: Τα προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού (ADAS) είναι ομάδες ηλεκτρονικών τεχνολογιών που βοηθούν τους οδηγούς στις λειτουργίες οδήγησης και στάθμευσης. Μέσω μιας ασφαλούς διεπαφής ανθρώπου-μηχανής, το ADAS αυξάνει την ασφάλεια του αυτοκινήτου και του δρόμου. Το ADAS χρησιμοποιεί αυτοματοποιημένη τεχνολογία, όπως αισθητήρες και κάμερες, για να ανιχνεύει κοντινά εμπόδια ή λάθη του οδηγού και να ανταποκρίνεται ανάλογα.

Βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: [https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_driver-assistance\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_driver-assistance_systems)

<sup>236</sup> Βλέπε επίσης: Nguyen, V., Kim, O.T.T., Dang, T.N., Moon, S.I. and Hong, C.S. (2016): An efficient and reliable green light optimal speed advisory system for autonomous cars. In: *Proceedings of the 2016 18<sup>th</sup> Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp.1-4, doi: 10.1109/APNOMS.2016.7737260.

<sup>237</sup> Suzuki, H. and Marumo, Y. (2019): Evaluating Green Light Optimum Speed Advisory (GLOSA) System in Traffic Flow with Information Distance Variations. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies (IHET 2019)*, pp.502-508, doi:10.1007/978-3-030-25629-678.

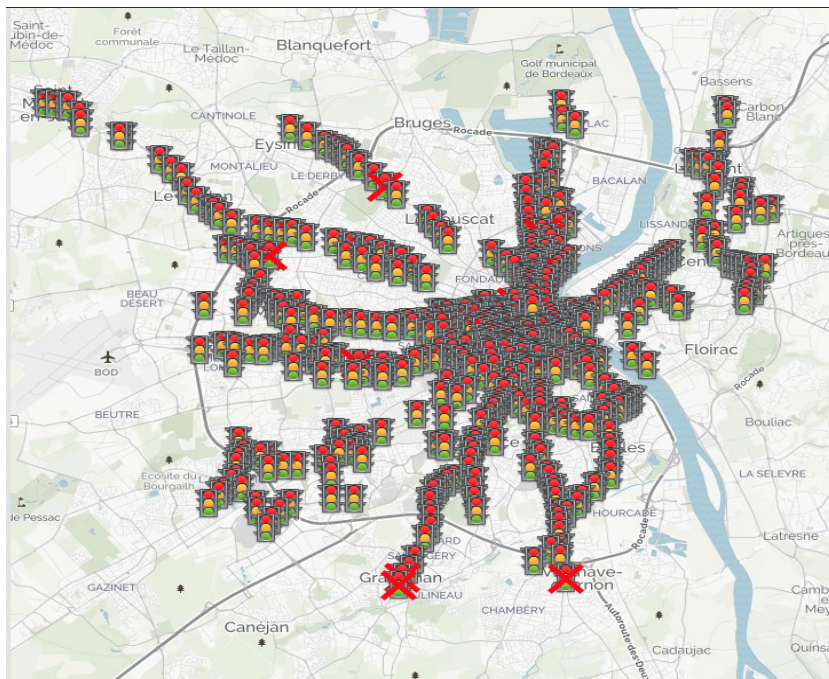
<sup>238</sup> Βλέπε: <https://www.neogls.com/en/produit/our-c-its-solutions/>

<sup>239</sup> Η Gertrude ανέπτυξε ένα αποτελεσματικό και μοναδικό έξυπνο σύστημα μεταφορών στην αγορά. Σε ένα συνδεδεμένο πλαίσιο πόλης, το σύστημα Gertrude ITS προσφέρει επεκτάσιμες λύσεις για το σχεδιασμό δυναμικής διαχείρισης των έξυπνων πόλεων. Η Gertrude ITS είναι μια λύση στην αγορά για

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X



Εικόνα 37: Εφαρμογή GLOSA της εταιρίας NeoGLS<sup>242</sup>



Εικόνα 38: Χάρτης κάλυψης GLOSA της περιοχής του Bordeaux<sup>240</sup>

τη βελτίωση της ρευστότητας στις διασταυρώσεις και για την προσφορά ενός δυναμικού συστήματος διαχείρισης πολυτροπικότητας (λεωφορεία, δημόσια μέσα μεταφοράς, ποδήλατα, πεζοί).

Για περισσότερα στοιχεία βλέπε: <http://www.gertrude.fr/>

<sup>240</sup> Βλέπε σχετικά: <https://www.neogls.com/en/innovation/c-the-difference/>.

Σήμερα, τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με μια σειρά από αισθητήρες και συστήματα υποστήριξης του οδηγού. Η κυψελοειδής επικοινωνία<sup>241</sup> έχει συμβάλλει στη βελτίωση της ασφάλειας και της οδικής άνεσης, μέσω των εφαρμογών που προσφέρει. Πολλές από τις περιπτώσεις χρήσης που περιγράφονται στις προδιαγραφές ETSI ITS<sup>242</sup> έχουν ήδη εφαρμοστεί, χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες συνδέσεις κυψελοειδούς δικτύου. Για παράδειγμα, τα παραπάνω αφορούν σε λειτουργίες όπως οι προειδοποιήσεις για αργά κινούμενα ή ακινητοποιημένα οχήματα, για έργα στο δρόμο, για καιρικές συνθήκες, για λοιπούς οδικούς κινδύνους, για μετάδοση της σήμανσης και για τα όρια ταχύτητας στο όχημα.

Η τεχνολογία των συνδεδεμένων οχημάτων παρέχει ένα αμφίδρομο περιβάλλον ασύρματης επικοινωνίας που επιτρέπει τις επικοινωνίες από όχημα σε όχημα και από όχημα σε υποδομή, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία εφαρμογών κινητικότητας και ασφάλειας.

Τα συστήματα GLOSA μπορούν να εξασφαλίζουν συνεχή ροή οχημάτων εάν συντονίζονται πολλά φανάρια οδικής σήμανσης. Είναι επίσης χρήσιμο τα οχήματα έκτακτης ανάγκης να ζητούν δικαίωμα διέλευσης, εάν υπάρχουν φανάρια ικανά να επικοινωνήσουν με τα οχήματα. Για να φτάσουν στο μέγιστο δυναμικό τους τα συστήματα GLOSA, είναι απαραίτητο να μπορούν να λειτουργήσουν σωστά (δηλαδή να κάνουν σωστή πρόβλεψη) με όλους τους διαφορετικούς τύπους οδικών φαναριών (περιλαμβανομένων και των «προσαρμοζόμενων» φαναριών, στα οποία η διάρκεια κύκλου και οι φάσεις μπορούν να αλλάζουν πολύ συχνά όντας δυναμικά προσαρμοζόμενα στις συνθήκες κυκλοφορίας). Οι περισσότερες δημοσιεύσεις<sup>243</sup> αναφέρουν θετικά αποτελέσματα, κυρίως για την κατανάλωση καυσίμου και τον χρόνο ταξιδιού ενώ το μέγεθος των επιπτώσεων που αναφέρονται ποικίλει σημαντικά μεταξύ των αξιολογήσεων. Οι δημοσιεύσεις<sup>244</sup> επικεντρώνονται κυρίως στο εξοπλισμένο όχημα, αφήνοντας πρόσθετο πεδίο για περαιτέρω συζήτηση στις έρευνες για τις κοινωνικές επιπτώσεις, για παράδειγμα σχετικά με το πώς η ροή της κυκλοφορίας και με το πώς η διάταξη των δρόμων και η «ένταση» της κυκλοφορίας επηρεάζουν τη συνολική ροή της κυκλοφορίας<sup>245</sup>. Προς τούτο χρειάζεται η κατανόηση της συμπεριφοράς του οδηγού και του τρόπου με τον οποίο συνολικά επηρεάζεται<sup>246, 247, 248</sup>.

---

<sup>241</sup> Βλέπε: <https://www.etsi.org/technologies/5g>.

<sup>242</sup> European Telecommunications Standards Institute ETSI: ETSI TR 103 562 V2.1.1 (2019-12): “*Intelligent Transport System (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2*”. ETSI, Sophia-Antipolis, France.

<sup>243</sup> Lebre, M.-A., Le Mouël, F., Garnault, A., and Picron, V. (2015): Real scenario and simulations on GLOSA traffic light system for reduced CO<sub>2</sub> emissions, waiting time and travel time. In: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ITS World Congress*, October 2015, Bordeaux. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.01965.pdf>

<sup>244</sup> Mellegård, N., and Reichenberg, F. (2020): The Day 1 C-ITS Application Green Light Optimal Speed Advisory - A Mapping Study. *Transportation Research Procedia*, vol.49, pp.170-182. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.015>

<sup>245</sup> Serebinski, M., Dorronsoro, B. and Khadraoui, D. (2013): Comparison of Green Light Optimal Speed Advisory approaches. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pp.2187-2192, IEEE, doi: 10.1109/ITSC.2013.6728552.

<sup>246</sup> Rittger, L. (2015): Driving Behaviour and Driver Assistance at Traffic Light Intersections. Julius-Maximilians Universität Würzburg, Germany. <https://d-nb.info/111636737/34>

Το σύστημα GLOSA απαιτεί μια αποτύπωση της τοπολογίας των διασταυρώσεων (συμπεριλαμβανομένων των γεωγραφικών συντεταγμένων των εισερχομένων και εξερχομένων λωρίδων) που μεταδίδεται ως μήνυμα MAP<sup>249</sup> V2X I2V. Αυτό χρησιμοποιείται από τα οχήματα που λαμβάνουν το μήνυμα για τον υπολογισμό της συνάφειας των ληφθέντων πληροφοριών με τη δική τους θέση [83]. Οι δυναμικές πληροφορίες μεταδίδονται χρησιμοποιώντας το μήνυμα φάσης και χρονισμού σήμανσης SPaT<sup>250</sup> V2X I2V το οποίο περιέχει την ώρα αλλαγής των φαναριών και συμβουλές ταχύτητας που ισχύουν για την ομάδα των εισερχόμενων λωρίδων [84].

Υπάρχουν πολλές προκλήσεις για την υλοποίηση της εφαρμογής GLOSA. Πρώτον, απαιτεί τυποποιημένη επικοινωνιακή υποδομή (π.χ. μικρή εμβέλεια, όπως ETSI ITS-G5, κυψελοειδή επικοινωνία όπως 5G<sup>251</sup> ή/και υβριδική προσέγγιση) και πρωτόκολλα (π.χ.

---

<sup>247</sup> Yang, B., Zheng, P., Kaizuka, T. and Nakano, K. (2018): Analysis of Driver Behaviors while Using In-Vehicle Traffic Light with Partial Deployment of V2I Communication. In: *Proceedings of the 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp.19-24, IEEE, doi: 10.1109/IVS.2018.8500424.

<sup>248</sup> Yang, B., Zheng, R.C., Yin, Y.D., Yamabe, S. and Nakano, K. (2016): Analysis of influence on driver behaviour while using in-vehicle traffic lights with application of head-up display. *IET Intelligent Transportation Systems*, vol.10, no.5, pp.347-353, doi: 10.1049/iet-its.2015.0179.

<sup>249</sup> Το μήνυμα χάρτη (MAP) είναι ένα μήνυμα I2V που χρησιμοποιείται από το RSI για να μεταφέρει πολλούς τύπους γεωγραφικών οδικών πληροφοριών. Αυτή τη στιγμή, το MAP χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μιας ή περισσότερων πληροφοριών γεωμετρίας των λωρίδων της διασταύρωσης μέσα σε ένα μόνο μήνυμα. Το περιεχόμενο του μηνύματος περιλαμβάνει στοιχεία όπως σύνθετες περιγραφές διασταυρώσεων, περιγραφές οδικών τμημάτων, περιγράμματα καμπυλών υψηλής ταχύτητας (χρησιμοποιούνται σε μηνύματα ασφαλείας καμπυλών) και τμήματα οδοστρώματος (χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές ασφάλειας). Τα περιεχόμενα αυτού του μηνύματος καθορίζουν τις λεπτομέρειες των συστημάτων ευρητηρίασης που με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται από άλλα μηνύματα για τη συσχέτιση πρόσθετων πληροφοριών σχετικά με συμβάντα σε συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες στο οδόστρωμα.

<sup>250</sup> Το SPaT, ή Signal Phasing and Timing, περιγράφει μια σειρά μηνυμάτων που αποτελούν μέρος αυτού που είναι κοινώς γνωστό ως "Cooperative Intelligent Transport Systems" ή "CITS" (προφέρεται ως Cee-ITS) και είναι μια σειρά διεθνών προτύπων διαθέσιμων σε όλες τις οδικές αρχές και τους κατασκευαστές οχημάτων. Το SPaT είναι ένα μήνυμα I2V που χρησιμοποιείται κυρίως για την επικοινωνία της κατάστασης της οδικής διασταύρωσης με οχήματα που πλησιάζουν σε αυτή τη διασταύρωση. Συνήθως περιέχει δυναμικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση μιας σηματοδοτημένης διασταύρωσης. Ένα μήνυμα SPaT περιγράφει την τρέχουσα φάση σε μια σηματοδοτημένη διασταύρωση, μαζί με τον υπολειπόμενο χρόνο της φάσης, για κάθε λωρίδα της διασταύρωσης. Μπορεί να περιέχει την κατάσταση του φαναριού οδικής σήμανσης, μελλοντικές προβλέψεις κατάστασης, συμβουλές ταχύτητας, πληροφορίες κατάστασης ουράς αναμονής στο φανάρι και επίσης εάν είναι ενεργό ένα αίτημα προτεραιότητας. Μαζί με το μήνυμα MAP (το οποίο περιγράφει μια πλήρη γεωμετρική διάταξη μιας διασταύρωσης) ο δέκτης αυτού του μηνύματος μπορεί να καθορίσει την κατάσταση της φάσης του σήματος στο φανάρι και τότε θα συμβεί η επόμενη αναμενόμενη φάση. Ακριβή μηνύματα SPaT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός προφίλ ταχύτητας για όχημα που μειώνει την κατανάλωση καυσίμου καθώς πλησιάζει ή αφήνει μια διασταύρωση [28].

<sup>251</sup> Βλέπε σχετικά: Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Agapiou, G., Lazaridis, P. and Zaharis, Z. (2021): C-V2X Communications for the Support of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Use Case. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2/2021, pp.93-106. National Institute of Communications, Poland, doi: 10.26636/jtit.2021.152321.

SPAT και MAP). Δεύτερον, υπάρχουν προκλήσεις για την on-board λειτουργικότητα, όπως: το πώς να χειρίζεται με τρόπο αξιόπιστο τις πιθανώς ανακριβείς προβλέψεις time-to-green και time-to-red για τα δυναμικά προσαρμοζόμενα φανάρια (εκείνα δηλαδή που προσαρμόζονται στην τρέχουσα κυκλοφορία και στις κινήσεις των πεζών), το πώς να προβλέψει τη διαδρομή ώστε να είναι σε θέση να σχεδιάσει τη βέλτιστη ταχύτητα σε πολλά τμήματα του δρόμου και το πώς τελικά επηρεάζεται η ασφάλεια των χρηστών του δρόμου.

Ο εφαρμοζόμενος αλγόριθμος ενός συστήματος GLOSA μειώνει τον αριθμό των στάσεων στα φανάρια ρύθμισης οδικής κυκλοφορίας και μειώνει την καθυστέρηση όπως και το καύσιμο κατανάλωσης, προτείνοντας την ενδεικνυόμενη ταχύτητα που βασίζεται σε πληροφορίες ελέγχου της φωτεινής σηματοδότησης και στην τρέχουσα θέση του οχήματος<sup>252, 253</sup>. Το σύστημα GLOSA υπολογίζει τις ενδεικνυόμενες ταχύτητες με βάση την απόσταση μεταξύ των οχημάτων που πλησιάζουν στο φανάρι οδικής σήμανσης και των σημάτων κυκλοφορίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την τρέχουσα κατάσταση των σημάτων κυκλοφορίας και το εάν ένα όχημα πρέπει να σταματήσει ή να περάσει από την επόμενη διασταύρωση. Ως εκ τούτου, το σύστημα GLOSA βελτιώνει την κινητικότητα και την συνολική απόδοση της κυκλοφορίας στις οδικές αρτηρίες, ενθαρρύνοντας την αδιάλειπτη ροή κυκλοφορίας<sup>254</sup>.

Κατά τον προσδιορισμό των ενδεικνυόμενων ταχυτήτων, το σύστημα GLOSA χρησιμοποιεί το όριο ταχύτητας του δρόμου ως «ανώτερο όριο» ενώ το «κάτω όριο» έχει οριστεί σε μια χαμηλή ταχύτητα (π.χ. 5 χλμ./ώρα). Από το σχεδιασμό του, το σύστημα GLOSA προορίζεται να μειώσει τον αριθμό των στάσεων και να βελτιώσει τη ροή της κυκλοφορίας σε μεγάλους δρόμους. Ο αντίκτυπος του συστήματος GLOSA στους παράδρομους θα μπορούσε να έχει δύο κύρια στοιχεία: τη μειωμένη κινητικότητα (αυξημένο χρόνο αναμονής των οχημάτων στους δευτερεύοντες δρόμους) και τη μειωμένη ασφάλεια (τα μικρότερα χρονικά περιθώρια διέλευσης μπορούν να προκαλέσουν κάποιες πιο επικίνδυνες κινήσεις των οδηγών). Η εφαρμογή του συστήματος GLOSA παρέχει το πλεονέκτημα της έγκαιρης και ακριβούς πληροφόρησης σχετικά με τους κύκλους των φαναριών και πληροφορίες θέσης μέσω επικοινωνίας υποδομής-οχήματος (I2V), και επιπλέον παρέχει στους οδηγούς συμβουλές ταχύτητας καθοδηγώντας τους με πιο σταθερή ταχύτητα και με λιγότερο χρόνο αναμονής στα φανάρια.

---

<sup>252</sup> Faye, S., Chaudet, C. and Demeure, I. (2012): A distributed algorithm for multiple intersections adaptive traffic lights control using a wireless sensor networks. In: *Proceedings of the IEEE 2012 Conference on Intelligence Transportation Systems (ITS-2012)*, pp.13-18, doi: 10.1109/ITSC.2012.6338671.

<sup>253</sup> Faye, S., Chaudet, C. and Demeure, I. (2013): Influence of radio communications on multiple intersection control by a wireless sensor network. In: *Proceedings of the IEEE 13<sup>th</sup> International Conference on ITS Telecommunications*, pp.307-312, IEEE Computer Society, doi: 10.1109/ITST.2013.6685564.

<sup>254</sup> Sharara, M., Ibrahim, M. and Chalhoub, G. (2019): Impact of Network Performance on GLOSA. In: *Proceedings of the 2019 16<sup>th</sup> IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp.1-6, doi: 10.1109/CCNC.2019.8651787.

Οι κύριες προκλήσεις για την επίτευξη αυτού περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση της κυκλοφορίας των οχημάτων, των επικοινωνιών μεταξύ φαναριών και οχημάτων και τέλος τη συμπεριφορά του οδηγού. Έχει πραγματοποιηθεί εξειδικευμένη έρευνα για κάθε έναν από αυτούς τους τομείς.

Οι δύο κύριες εφαρμογές είναι οι βοηθοί Green-Wave-Assistant και Deceleration-Assistant. Η εφαρμογή Green-Wave-Assistant δείχνει πληροφορίες που επιτρέπουν την διέλευση με πράσινο φανάρι στην επόμενη διασταύρωση. Έτσι, μπορούν να αποφευχθούν περιττές διαδικασίες στάσης και επιτάχυνσης. Η εφαρμογή Deceleration-Assistant ενημερώνει τον οδηγό σχετικά με το γεγονός ότι δεν μπορεί να φτάσει με πράσινο φανάρι στην επόμενη διασταύρωση, επομένως ο οδηγός μπορεί να μεριμνήσει για την αποτροπή περιττών φρεναρισμάτων και/ή επιταχύνσεων. Με τη βοήθεια αυτών των δύο εφαρμογών, ο οδηγός μπορεί να «προσαρμόσει» την οδηγική του συμπεριφορά σύμφωνα με τις πληροφορίες που λαμβάνει και επομένως η αποτελεσματικότητα και η άνεση οδήγησης μπορεί να επιδέχονται σημαντικές βελτιώσεις.



*Εικόνα 39: Υλοποίηση του GLOSA UI από την Audi (όταν είναι πράσινο δείχνει την ενδεικνυόμενη ταχύτητα ώστε να γίνει η διέλευση, όταν είναι κόκκινο δείχνει τον χρόνο που υπολείπεται για την αλλαγή φάσης)<sup>255</sup>*

Το σύστημα GLOSA αποφέρει ουσιαστικά καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας της οδικής υποδομής και μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση των οχημάτων και των εκπομπών καυσαερίων. Κατά συνέπεια, επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα ζωής, η οποία είναι ο κύριος στόχος των έξυπνων πόλεων. Σχετικά έργα έχουν αποδείξει ότι η πλήρης χρησιμοποίηση συνδεδεμένων συμβατικών οχημάτων διαχειριζόμενα από την τεχνική εφαρμογών GLOSA έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου αναμονής κατά 66%, σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα χωρίς συνδεσιμότητα GLOSA [85].

Το σύστημα GLOSA μπορεί να εφαρμοστεί είτε μονοτμηματικά είτε για πολλαπλά τμήματα. Οι μονοτμηματικές προσεγγίσεις GLOSA, θεωρούν τα φανάρια ανεξάρτητα και παρέχουν στα οχήματα τη βέλτιστη ταχύτητα για το κάθε τμήμα προς το πλησιέστερο φανάρι. Στην πολυτμηματική προσέγγιση, για τη συμβουλή βέλτιστης ταχύτητας λαμβάνονται υπόψη όλα τα φανάρια στη διαδρομή του οχήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ταχύτητας εκτελείται με τη χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου<sup>256</sup>. Υποθέτουμε ότι ένα όχημα έχει πρόσβαση σε όλη την κυκλοφορία που

<sup>255</sup> Βλέπε σχετικά: <https://www.audi.com/en/company/sustainability/core-topics/products-and-services/smart-city.html>

<sup>256</sup> Βλέπε σχετικά: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF\\_%CE%91%CE%BB%CE%B3%CF%8C%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF_%CE%91%CE%BB%CE%B3%CF%8C%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9)

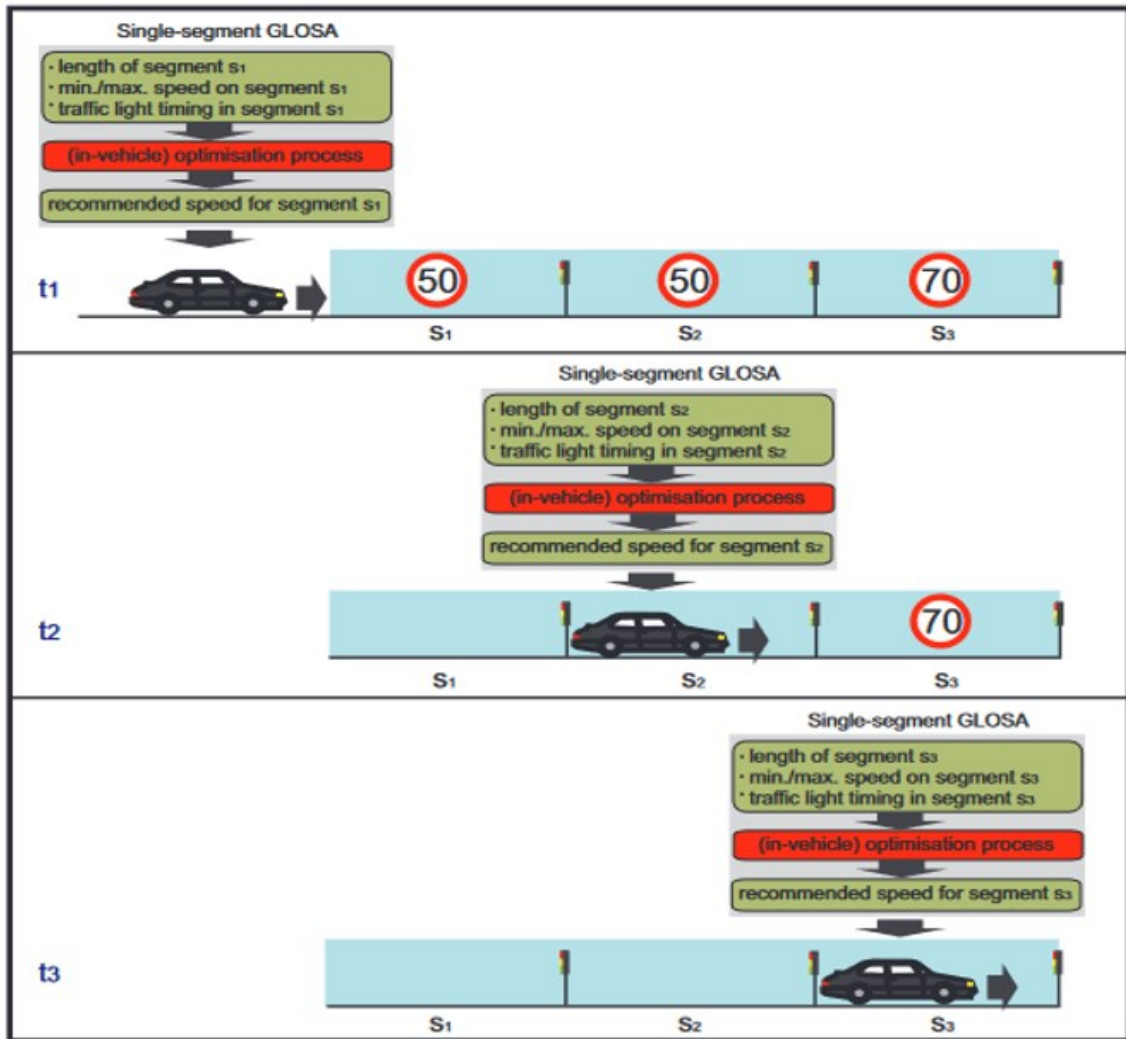
θα συναντήσει στη διαδρομή του. Η διαδρομή αποτελείται από τμήματα που χωρίζονται με φανάρια.

Το multi-segment GLOSA<sup>257</sup> παρέχει σε έναν οδηγό συμβουλές ταχύτητας για το κάθε επιμέρους τμήμα σύμφωνα με επιλεγμένες προτιμήσεις όπως η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ταξιδιού ή η κατανάλωση καυσίμων. Στην προσέγγιση του μεμονωμένου τμήματος, η ενδεικνυόμενη ταχύτητα υπολογίζεται για το τμήμα που προηγείται μιας διασταύρωσης. Η συμβουλευτική υπολογίζεται μόλις ένα όχημα εισέλθει στο αντίστοιχο τμήμα. Στην προσέγγιση multi-segment, η οποία λαμβάνει υπόψη πολλά σήματα σε μια ακολουθία στη διαδρομή ενός οχήματος [86], ένα όχημα υπολογίζει ένα σύνολο βέλτιστων ταχυτήτων (μια ενδεικνυόμενη ταχύτητα για κάθε τμήμα) πριν ακόμη εισέλθει στο πρώτο τμήμα [10].

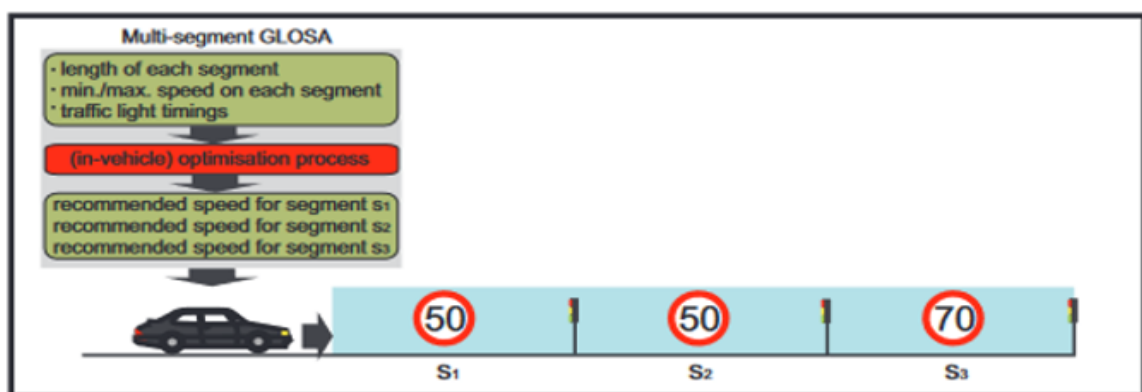
---

<sup>257</sup> Seredynski, M., Mazurczyk, W. and Khadraoui, D. (2013): Multi-Segment Green Light Optimal Speed Advisory. In: *Proceedings of the 2013 IEEE 27<sup>th</sup> International conference on Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW)*, pp.1-8, IEEE, doi: 10.1109/IPDPSW.2013.157.





Εικόνα 40: Προσέγγιση ενός τμήματος [82]



Εικόνα 41: Προσέγγιση πολλαπλών τμημάτων [82]

Στην προσέγγιση ενός τμήματος (Εικόνα 40) ένα όχημα λαμβάνει πληροφορίες του τμήματος από το πλησιέστερο φανάρι και υπολογίζει τη βέλτιστη ταχύτητα προσέγγισης σε αυτό.

Στην προσέγγιση πολλαπλών τμημάτων (Εικόνα 41) ένα όχημα λαμβάνει πληροφορίες πολλών τμημάτων και υπολογίζει τη βέλτιστη ταχύτητα για κάθε ένα από αυτά πριν να εισαχθεί στο πρώτο τμήμα.

## 6.2. Η Εφαρμογή GLOSA στο Ερευνητικό Πρόγραμμα 5G-DRIVE

Ένας από τους κύριους στόχους του έργου 5G-DRIVE<sup>258</sup> είναι η ανάπτυξη βασικών τεχνολογιών 5G σε υπηρεσίες κλινών δοκιμής V2X και στη συνέχεια η επίδειξη υπηρεσιών IoV χρησιμοποιώντας επικοινωνίες V2I και V2V. Τα οφέλη του 5G σε σχέση με τις άλλες επιλογές επικοινωνίας όπως το ITS G5<sup>259</sup> πρόκειται να εκτιμηθούν για τις υπάρχουσες περιπτώσεις χρήσης σχετικά με εφαρμογές GLOSA και έξυπνων διασταυρώσεων<sup>260</sup>. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις αυτοματοποιημένες προκλήσεις οδήγησης<sup>261, 262</sup>.

Οι ψηφιακές επικοινωνίες έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες και εισάγονται όλο και περισσότερο στον κλάδο των μεταφορών. Ενώ τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS) αφορούν σε ψηφιακές τεχνολογίες που παρέχουν ευφυΐα στην υποδομή του δρόμου ή στα οχήματα, τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (C-ITS) δίνουν έμφαση στην επικοινωνία αυτών των συστημάτων, είτε για την περίπτωση επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων ή για την επικοινωνία οχήματος με την υποδομή ή/και με οποιοδήποτε άλλο C-ITS σύστημα<sup>263</sup>.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα πρότυπα για τα ITS αναπτύσσονται και τηρούνται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τυποποίησης (ETSI) μέσω της Τεχνικής Επιτροπής TC ITS<sup>264</sup>. Τα πιο σημαντικά πρότυπα διαλειτουργικότητας εκδίδονται ως Ευρωπαϊκές Οδηγίες<sup>265</sup>. Το 2014 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αποφάσισε να αναλάβει ενεργητική θέση στην εξέλιξη του τομέα των C-ITS και ανέπτυξε μια πλατφόρμα (C-ITS Deployment Platform) για την πλήρωση του σκοπού αυτού<sup>266</sup>. Η εν λόγω πλατφόρμα<sup>267</sup>, δια του σχεδιασμού της εξασφαλίζει ένα συνεργατικό πλαίσιο μεταξύ των εθνικών Αρχών, όλων των ενδιαφερομένων μερών και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής ώστε να αναπτυχθεί μια κοινή αντίληψη για τα την ανάπτυξη των συστημάτων C-ITS στην Ευρώπη [87]. Στο πλαίσιο των

---

<sup>258</sup> 5G-DRIVE project: “5G HarmoniseD Research and Trials for Service Evolution between EU and China”, Grant Agreement No.814956. <https://5g-drive.eu/about-5g-drive/>

<sup>259</sup> Lin, L., and Misener, J.A. (2015): Message sets for vehicular communications. In: Campolo, C., Molinaro, A., and Scopingo, R. (Eds.), Vehicular ad hoc Networks, pp.123-163. Springer.

<sup>260</sup> Βλέπε: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>261</sup> Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Vasilaki, E., et al. (2021, February): 5G-DRIVE Program, Deliverable 2.3: “Final Report of Architecture and Use Case Implementation”. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>262</sup> Ferragut, J., Blockpoel, R., Chen, T., Chochliouros, I.P., Dradamanis, A., et al. (2019, April): 5G-DRIVE Program, Deliverable 2.2: “Joint Architecture, Use Cases and Spectrum Plan”. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>263</sup> Βλέπε επίσης: <https://etsi.eu/briefing-cooperative-intelligent-transport-systems-c-its/>

<sup>264</sup> Βλέπε επίσης: <https://www.etsi.org/technologies/automotive-intelligent-transport>

<sup>265</sup> Βλέπε επίσης: <https://www.car-2-car.org/about-c-its/>

<sup>266</sup> Βλέπε επίσης: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/wp29grf/GRRF-81-30e.pdf>

<sup>267</sup> Βλέπε επίσης: [https://transport.ec.europa.eu/index\\_en](https://transport.ec.europa.eu/index_en)

εργασιών της πλατφόρμας C-ITS έγινε μια κατάταξη σε κατηγορίες των προτεινόμενων υπηρεσιών, ώστε να καθορισθούν οι προτεραιότητες και επομένως η χρηματοδότηση και υλοποίηση αυτών με βάση την προτεραιότητά τους. Έτσι οι υπηρεσίες κατηγοριοποιήθηκαν σε Day-1, Day-2 και Day-3 [88].

Οι υπηρεσίες της κατηγορίας Day-1 που χαρακτηρίζονται σαν «ώριμες τεχνολογικά» και λαμβάνουν την μέγιστη προτεραιότητα επικεντρώνονται στην ανταλλαγή πληροφοριών που ενισχύουν την προνοητική οδήγηση<sup>268</sup>. Οι υπηρεσίες της κατηγορίας Day-2 δίνουν έμφαση στην ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με τη συνεργατική αντίληψη του χώρου και στην προστασία, ακόμη και των πεζών χωρίς εξοπλισμό. Στην κατηγορία Day 3+ ανήκουν περισσότερο εξελιγμένες υπηρεσίες, όπως ανταλλαγή της προτιθέμενης τροχιάς κίνησης και υποστήριξη διαπραγματεύσεων και συνεργασιών που «ανοίγουν το δρόμο» προς την αυτοματοποιημένη οδήγηση χωρίς ατυχήματα<sup>269</sup>. Πιο συγκεκριμένα στην κατηγορία Day-1 οι υπηρεσίες διακρίνονται σε ειδοποιήσεις περί επικίνδυνης τοποθεσίας (αργό ή σταματημένο όχημα, κυκλοφοριακή συμφόρηση, έργα στο δρόμο, δυσμενείς καιρικές συνθήκες κ.ά.) και σε υπηρεσίες σήμανσης (οδική σήμανση, όρια ταχύτητας, παραβίαση οδικού κανόνα, σήμα προτεραιότητας για συγκεκριμένες κατηγορίες οχημάτων, GLOSA) [89].

Η εφαρμογή GLOSA είναι μια Day-1<sup>270,271</sup> υπηρεσία σήμανσης C-ITS<sup>272</sup>, με στόχο την ενημέρωση των τελικών χρηστών του δρόμου, για την ταχύτητα που χρειάζεται να διατηρήσουν (εντός των νόμιμων ορίων) για να φτάσουν στο επόμενο φανάρι όταν αυτό βρίσκεται σε κατάσταση «πράσινο».

Η εφαρμογή GLOSA παρέχει στους οδηγούς που πλησιάζουν στα φανάρια συμβουλές για την ταχύτητα και πληροφορίες σχετικά με τις φάσεις του φωτεινού σηματοδότη (φαναριού σήμανσης), με βάση τις οποίες τα οχήματα μπορούν είτε να επιταχύνουν για να διασχίσουν τη διασταύρωση είτε να επιβραδύνουν για να περιμένουν λιγότερο για την επόμενη κατάσταση «πράσινο». Αυτή η περίπτωση χρήσης οδηγεί σε μειωμένο αριθμό στάσεων σε φανάρια κατάστασης (κόκκινο) και σε ταχύτερη επανεκκίνηση όταν το φανάρι ανάψει σε «πράσινο» [90].

Επειδή ο στόχος της εφαρμογής του GLOSA είναι να αποφεύγονται τα συχνά σταματήματα-ξεκινήματα και η βελτίωση στους χρόνους διέλευσης από τις επιλεγμένες διασταυρώσεις, θα πρέπει το επίπεδο της κυκλοφοριακής συμφόρησης στις διασταυρώσεις αυτές να είναι χαμηλό ή μέσο.

---

<sup>268</sup> Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης: [https://ec.europa.eu/inea/sites/default/files/1\\_inea\\_cef\\_transport\\_info\\_day\\_its\\_2016\\_call\\_161021.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/default/files/1_inea_cef_transport_info_day_its_2016_call_161021.pdf) (slide 6).

<sup>269</sup> Βλέπε επίσης: <https://www.car-2-car.org/about-c-its/>.

<sup>270</sup> Βλέπε επίσης: <https://www.etsi.org/technologies/automotive-intelligent-transport>.

<sup>271</sup> Mellgård, N., and Reichenberg, F. (2020): The Day 1 C-ITS Application Green Light Optimal Speed Advisory - A Mapping Study. *Transportation Research Procedia*, vol.49, pp.170-182. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.015>.

<sup>272</sup> Day-1" C-ITS services recommended by the "C-ITS platform".

Παρόλο που οι λειτουργίες διεπαφής χρήστη (UI) είναι προκαθορισμένες από τον κατασκευαστή της on-board μονάδας που διαθέτει το όχημα, οι ειδοποιήσεις GLOSA που παρέχονται συνήθως στους τελικούς χρήστες είναι π.χ. της παρακάτω μορφής:

- «Το επερχόμενο φανάρι θα αλλάξει κατάσταση σε 20 δευτερόλεπτα (αντίστροφη μέτρηση)».
- «Διατηρήστε την ταχύτητα στα 35 km/h για να φτάσετε στο επόμενο φανάρι σε κατάσταση «πράσινο»».
- «Σύμφωνα με τα ισχύοντα νόμιμα όρια ταχύτητας σε αυτόν τον τομέα, θα φτάσετε στο επερχόμενο φανάρι σε κατάσταση «κόκκινο»».

Το σύστημα GLOSA χρησιμοποιεί χάρτη των διασταυρώσεων που τυγχάνει χρήσης από τα εμπλεκόμενα οχήματα για τον υπολογισμό της συνάφειας των ληφθέντων πληροφοριών, σε σχέση με τη θέση των οχημάτων. Προκειμένου να αξιολογηθεί μια δοκιμαστική περίπτωση χρήσης, μπορούν να συλλεχθούν οι ακόλουθες παράμετροι/δεδομένα:

- α) Ταχύτητα του οχήματος.
- β) Επιτάχυνση/επιβράδυνση του οχήματος.
- γ) Ισχύς φρεναρίσματος, στιγμή φρεναρίσματος.
- δ) Χρόνος μεταξύ της λήψης του μηνύματος C-ITS και της άφιξης στη διασταύρωση.
- ε) Θέση στο χάρτη.
- στ) Αρχείο καταγραφής δεδομένων μηνυμάτων C-ITS (περιεχόμενο, χρονισμός, θέση λήψης κλπ.).
- ζ) Αρχείο καταγραφής δεδομένων του ITS σταθμού του οχήματος και του HMI (Human-Machine Interface).
- η) Κατανάλωση καυσίμου.

Αυτά τα δεδομένα μπορεί να βοηθήσουν στην εκτίμηση του πώς τελικά δύναται να επηρεάζεται η ασφάλεια, η αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας και το περιβάλλον από τη συγκεκριμένη υπηρεσία C-ITS η οποία εξυπηρετεί το σύστημα GLOSA. Επιπλέον, αυτά μπορεί να παρέχουν πληροφορίες για απάντηση σε διάφορες ερωτήσεις που αφορούν, π.χ.:

- α) Στην άμεση -ή μη- αλλαγή ταχύτητας μετά τη λήψη των μηνυμάτων,
- β) στη συμμόρφωση της ταχύτητας του οδηγού με την προτεινόμενη ταχύτητα,
- γ) στην ώρα απόκρισης του οδηγού αφού το φανάρι γίνει «πράσινο» και
- δ) στον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν οι στιγμιαίες διακυμάνσεις ταχύτητας.

Σύμφωνα με τις ληφθείσες πληροφορίες από υπάρχουσες αναφορές, ο οδηγός μπορεί να επιταχύνει για να φτάσει πριν από την κατάσταση του σηματοδότη σε «κόκκινο» ή να επιβραδύνει για να περιμένει λιγότερο χρόνο για την κατάσταση σε «πράσινο». Ένας ενδεχόμενος απότομος ελιγμός μπορεί να διαταράξει την ροή κυκλοφορίας. Η μεγαλύτερη – κατά το δυνατό – συμμόρφωση με τις προτάσεις ρύθμισης ταχύτητας οδηγεί σε λιγότερα οχήματα που περιμένουν να διασχίσουν τη διασταύρωση, σε μείωση των αριθμών επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, σε μείωση του μήκους της ουράς αναμονής των οχημάτων και σε βελτίωση της απόδοσης της διασταύρωσης. Επιπλέον, γνωρίζοντας τότε το φως του σηματοδότη θα γίνει «πράσινο» οδηγεί σε ταχύτερη

επανεκκίνηση των οχημάτων και σε γρηγορότερη επιτάχυνση, επηρεάζοντας τη ροή της κίνησης στη διασταύρωση.

Με βάση τις προηγούμενες προσεγγίσεις, μπορούν δυνητικά να υπολογιστούν οι ακόλουθοι βασικοί δείκτες απόδοσης στα πεδία δοκιμής:

- α) Η προσαρμογή της ταχύτητας (διαφορά μεταξύ της μέσης ταχύτητας του οχήματος και του ορίου ταχύτητας) από τη λήψη του μηνύματος C-ITS μέχρι τη γραμμή στάσης ή μέχρι τη θέση του φωτεινού σηματοδότη.
- β) Η τυπική απόκλιση της ταχύτητας.
- γ) Οι στιγμιαίες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις.
- δ) Το ποσοστό των οχημάτων δοκιμών<sup>273</sup> που μπορούν να διασχίσουν τη διασταύρωση χωρίς διακοπή (με και χωρίς το σύστημα GLOSA). Αυτή η αξιολόγηση μπορεί να έχει πλεονεκτήματα εάν συνδυαστεί με δεδομένα της συμφόρησης στα φανάρια (π.χ. από μαγνητικούς βρόχους ή άλλους αισθητήρες).
- ε) Ο χρόνος μεταξύ της στιγμής που θα ανάψει το πράσινο φανάρι και της αναχώρησης του οχήματος δοκιμής (εάν είναι το πρώτο όχημα που θα κινηθεί, τότε αυτό είναι το πρώτο όχημα που σταμάτησε στο φανάρι). Αυτή η αξιολόγηση μπορεί να δώσει επιπλέον πλεονεκτήματα εάν συνδυαστεί με τη θέση στάσης στην λωρίδα ώστε να γνωρίζουμε το πρώτο όχημα σε αυτήν.
- στ) Ο χρόνος / καθυστέρηση του ταξιδιού (που σπαταλήθηκε στην διέλευση διασταυρώσεων).
- ζ) Ο χρόνος / μέση ταχύτητα από τη λήψη του μηνύματος C-ITS μέχρι το φανάρι.
- η) Η κατανάλωση καυσίμου.
- θ) Ο θόρυβος.

Στην περίπτωση χρήσης του συστήματος GLOSA, μια παρόδια μονάδα RSU που βρίσκεται σε ένα φανάρι οδικής σήμανσης (και η οποία έχει πρόσβαση στην πληροφορία της κατάστασης του φαναριού), εκπέμπει τις πληροφορίες χρονισμού σχετικά με τις καταστάσεις «κόκκινο», «πορτοκαλί» και «πράσινο» μέσω μηνυμάτων «φάσης σήμανσης και χρονισμού» (SPaT). Τα γειτονικά οχήματα μπορούν να λάβουν αυτά τα μηνύματα και να τα επεξεργαστούν τοπικά μαζί με τα δικά τους δεδομένα θέσης, ταχύτητας και κατεύθυνσης (μεταξύ άλλων). Με αυτό τον τρόπο, οι ενσωματωμένες μονάδες V2X μπορούν να ειδοποιήσουν τους οδηγούς για τη βέλτιστη ταχύτητα ώστε να φτάσουν στο επερχόμενο φανάρι σε κατάσταση «πράσινο» ή, εναλλακτικά, να γνωρίζουν ότι το φανάρι θα μεταβεί σε κατάσταση «κόκκινο».

Οι δυναμικές πληροφορίες διαδίδονται χρησιμοποιώντας το Signal Phase and Timing (SPaT) V2X I2V και περιέχουν τον χρόνο αλλαγής των καταστάσεων των φαναριών καθώς και πληροφορίες ενδεικνυόμενης ταχύτητας που ισχύουν για την ομάδα των εισερχομένων λωρίδων, ενώ οι στατικές πληροφορίες της διασταύρωσης

---

<sup>273</sup> Τα οχήματα δοκιμών είναι εξοπλισμένα οχήματα με συστήματα GLOSA (υπολογιστής με ενσωματωμένη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας) τα οποία δεν εισάγονται στην πραγματική κυκλοφορία, αλλά χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή δοκιμών υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

κοινοποιούνται με το σήμα MAP<sup>274</sup>, το οποίο περιέχει μια πλήρη γεωμετρική διάταξη αυτής.

Τα μηνύματα MAP και SPaT είναι ήδη τυποποιημένα<sup>275</sup>. Γνωρίζοντας το πώς θα αποκωδικοποιηθεί το περιεχόμενο του μηνύματος SPaT στην πλευρά λήψης είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την περίπτωση των Συνδεδεμένων Αυτόνομων Οχημάτων (CAVs). Στην πραγματικότητα, η αυτοματοποιημένη συμπεριφορά των CAVs κατά την προσέγγιση σε μια συνεργατική διασταύρωση (Cooperative Intersection - CI) θα εξαρτώνται από τις πληροφορίες που τους κοινοποιούνται με αυτό το μήνυμα.

Με βάση τη σωστή ερμηνεία του περιεχόμενου του SPaT και μαζί με άλλες περιβαλλοντικές πληροφορίες που επιτυγχάνονται μέσω των αισθητήρων τους, τα CAVs θα αποφασίσουν εάν θα «προσαρμόσουν» την ταχύτητα στην προτεινόμενη ταχύτητα ή θα προετοιμαστούν για στάση [84].

Μια επίδειξη για το GLOSA μπορεί να είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 42.

Το λεπτομερές πλαίσιο για το GLOSA, το σχέδιο δοκιμής και η απόδοση των διαδικασιών δοκιμών έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς στο πλαίσιο του προγράμματος 5G-DRIVE [91].

---

<sup>274</sup> Το μήνυμα χάρτη (MAP) είναι ένα μήνυμα I2V που χρησιμοποιείται από το RSI για να μεταφέρει πολλούς τύπους γεωγραφικών οδικών πληροφοριών. Αυτή τη στιγμή, το MAP χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μιας ή περισσότερων πληροφοριών γεωμετρίας λωρίδων διασταύρωσης μέσα σε ένα μόνο μήνυμα. Το περιεχόμενο του μηνύματος περιλαμβάνει στοιχεία όπως σύνθετες περιγραφές διασταυρώσεων, περιγραφές οδικών τμημάτων, περιγράμματα καμπυλών υψηλής ταχύτητας (χρησιμοποιούνται σε μηνύματα ασφαλείας καμπυλών) και τμήματα οδοστρώματος (χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές ασφάλειας). Τα περιεχόμενα αυτού του μηνύματος καθορίζουν τις λεπτομέρειες των συστημάτων ευρητήριασης που με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται από άλλα μηνύματα για τη συσχέτιση πρόσθετων πληροφοριών σχετικά με συμβάντα σε συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες στο οδόστρωμα.

<sup>275</sup> Society of Automotive Engineers (SAE) (03/2016): *SAE J2735\_201603, Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*. Available at: [https://www.sae.org/standards/content/j2735\\_201603/](https://www.sae.org/standards/content/j2735_201603/)

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X



Εικόνα 42: Επίδειξη LTE-V2X GLOSA από China Mobile, Huawei και ASTRI (ΕΕ-Κίνα Joint Kick-Off, WuXi (Κίνα), Νοέμβριος 2018 [91])

### 6.3. Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs)

Καθώς το πρόγραμμα 5G-DRIVE στοχεύει να συγκρίνει τα οφέλη του 5G μεταξύ της Ευρωπαϊκής Ένωσης και Κίνας, έχουν σχεδιαστεί κοινά σενάρια δοκιμών. Ορίζονται κοινοί Βασικοί Δείκτες Επιδόσεων (Key Performance Indicators - KPIs) για τη μέτρηση παραμέτρων και τη σύγκριση αποτελεσμάτων<sup>276</sup>.

Οι κινέζικοι KPIs είναι πιο «εξαντλητικοί» καθώς δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στη βελτιστοποίηση δικτύου ενώ η ευρωπαϊκή προσέγγιση εστιάζεται σε εφαρμογές οδήγησης [92].

Λόγω του μικρού όγκου πληροφοριών που μεταδίδονται στο GLOSA (δεδομένα χρονισμού σήματος, κατάστασης φωτεινού σηματοδότη), οι KPIs, όπως ο ρυθμός δεδομένων που μεταδίδονται και λαμβάνονται από τον χρήστη, δεν αποτελούν κρίσιμο παράγοντα στο πλαίσιο της εκάστοτε περίπτωσης χρήσης.

Αντίθετα, οι πιο σημαντικοί δείκτες απόδοσης επιπέδου-υπηρεσίας για το GLOSA είναι:

- **Packet Error Rate - PER (Ρυθμός Ελέγχου Σφαλμάτων):** Αναλογία πακέτων που δεν ελήφθησαν επιτυχώς στην OBU, έναντι του συνολικού αριθμού των πακέτων που απεστάλησαν από την RSU (σε ποσοστό).
- **Latency (Καθυστέρηση):** Η συμβολή του ασύρματου δικτύου στο συνολικό χρόνο που περνάει, μετρούμενη από τη στιγμή που η RSU στέλνει ένα πακέτο έως τη στιγμή που η OBU το λαμβάνει (σε ms).

Για τους σκοπούς της διεξαγωγής των δοκιμών GLOSA, ο φορέας JRC (Joint Research Center of the European Commission<sup>277</sup>) έχει αναπτύξει στην Ispra της Ιταλίας μια κλίνη δοκιμών<sup>278</sup> (test-bed) με κατάλληλη οδική υποδομή. Η RSU βρίσκεται στη διασταύρωση δύο προαστιακών δρόμων 420 m και 220 m αντίστοιχα, σε ύψος περίπου 10 m.

Επιπλέον, η RSU είναι συνδεδεμένη με την εσωτερική υποδομή δικτύου του JRC για να επιτρέπεται η απομακρυσμένη ρύθμιση, διαχείριση και παρακολούθηση της κυκλοφορίας. Η RSU «τρέχει» λειτουργικό σύστημα Automotive Grade Linux, επιτρέποντας έτσι την εκτέλεση των προσαρμοσμένων εφαρμογών χρήστη (όπως για παράδειγμα ένα εικονικό φανάρι για την υπηρεσία GLOSA).

Αυτή η ρύθμιση περιγράφεται στην Εικόνα 43 και στην ITS-G5 RSU που αναπτύσσεται στο Test-bed της JRC στην Ispra (Εικόνα 44).

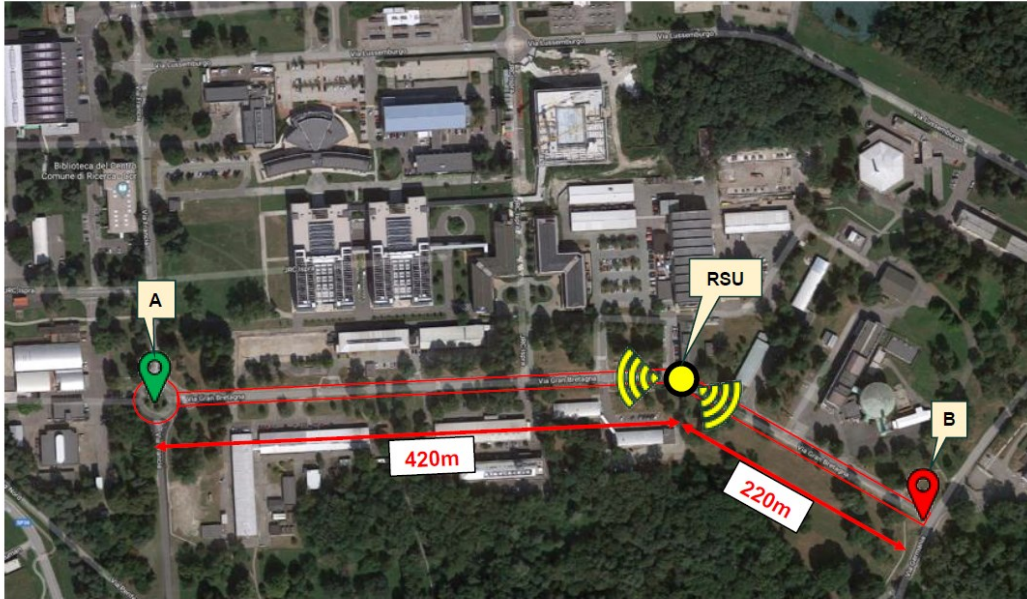
---

<sup>276</sup> Fischer, F., Kutila, M., Lankinen, M., Pöyhönen, A., Blockpoel, R. and Ferragut, F. (2019, April): 5G-DRIVE Program, Deliverable 4.1: “V2X Development and Test Plan”. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>277</sup> Βλέπε επίσης: <https://show-project.eu/the-consortium/joint-research-centre/>

<sup>278</sup> Βλέπε επίσης: <https://ec.europa.eu/jrc/en/about/jrc-site/ispra>





Εικόνα 43: Τοποθεσία του RSU που παρέχει την υπηρεσία GLOSA στο test-bed της JRC στην Ispra (Ιταλία) [92]



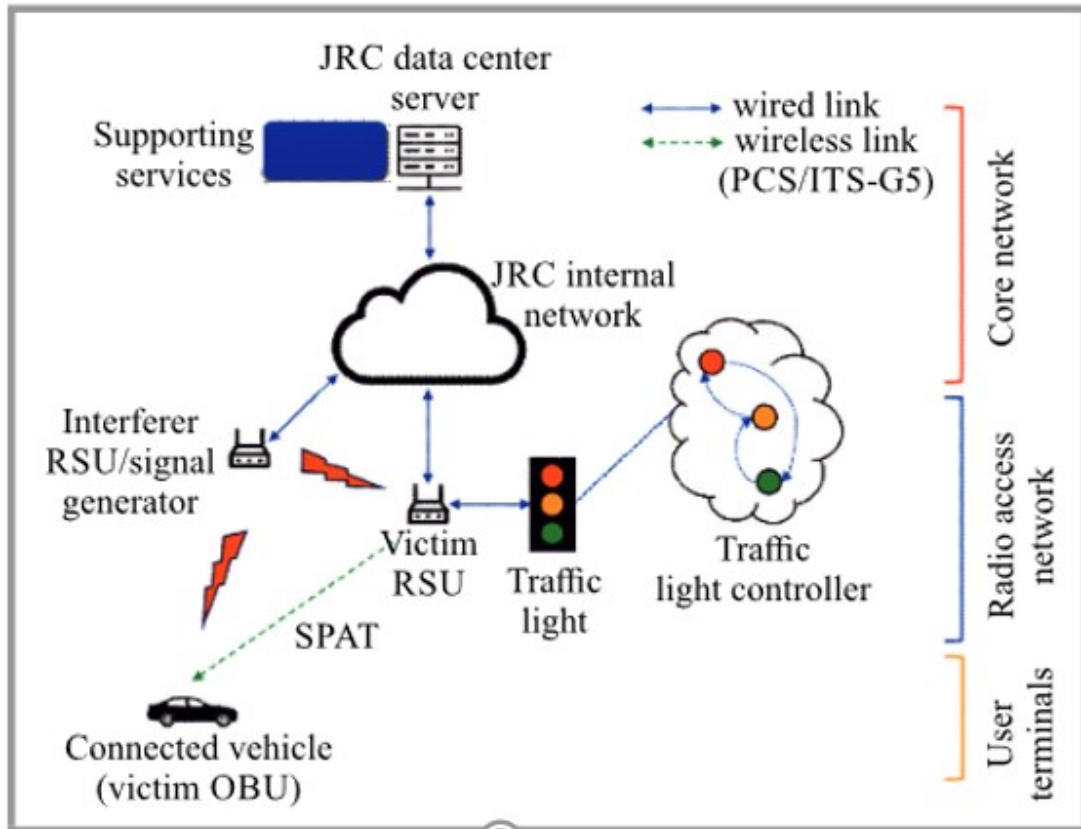
Εικόνα 44: ITS-G5 RSU που αναπτύσσεται στο Test-bed της JRC στην Ispra [92]

Η ρύθμιση GLOSA που περιγράφεται παραπάνω επεκτείνεται δυνητικά με την ανάπτυξη μιας μονάδας LTE-V2X που βρίσκεται μαζί με το ITS-G5 RSU. Η μονάδα LTE-V2X είναι επίσης συνδεδεμένη στο εσωτερικό δίκτυο του φορέα JRC για απομακρυσμένη ρύθμιση, διαχείριση και σκοπούς παρακολούθησης της κυκλοφορίας. Στο πλαίσιο της δοκιμής GLOSA, οι δύο τεχνολογίες δοκιμάζονται διακριτά (είτε η μία είτε η άλλη) ώστε να αποφευχθούν πιθανές παρεμβολές μεταξύ τους [93].

Η οδική υποδομή C-ITS συμπληρώνεται από δύο OBUs (On-Board Units) ένα ITS-G5 και ένα LTE-V2X, που τοποθετούνται σε ένα δοκιμαστικό όχημα για τη διεξαγωγή των δοκιμών GLOSA. Αυτές οι OBUs συνδέονται σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (laptop) όπου εκτελούνται πειραματικές ρυθμίσεις και παρακολούθηση της κυκλοφορίας [94]. Στην Εικόνα 45, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική που προτείνεται για τη φάση δοκιμών.

Τα βασικά στοιχεία της συγκεκριμένης περίπτωσης χρήσης είναι:

- Ένα φυσικό/εικονικό φανάρι μαζί με τον ελεγκτήρα (controller) για να ενορχηστρώσει τις μεταβάσεις μεταξύ των φάσεων «κόκκινο», «πορτοκαλί» και «πράσινο».
- Μια LTE-V2X RSU εγκατεστημένη στο φανάρι. Η RSU θα εκπέμπει περιοδικά τη φάση και το χρονισμό του φωτεινού σηματοδότη με μηνύματα (SPAT) (π.χ. κάθε 100 ms) σε όλα τα οχήματα που πλησιάζουν.
- Δύο OBUs (μια ITS-G5 και μια LTE-V2X) εγκατεστημένα στα οχήματα δοκιμής. Οι OBUs θα κάνουν λήψη και επεξεργασία των μηνυμάτων SPAT τοπικά, για να υπολογίσουν τις σχετικές πληροφορίες GLOSA (όπως π.χ. τον χρόνο που απομένει μέχρι τη μετάβαση στην επόμενη φάση φαναριού, τη βέλτιστη ταχύτητα για να φτάσει το όχημα στο φανάρι σε φάση «πράσινο», κλπ.). Μόλις υπολογιστούν, οι πληροφορίες GLOSA θα μεταδοθούν σε laptop (ή σε συσκευή διεπαφής χρήστη UI) όπου θα κοινοποιηθούν, τόσο οπτικά όσο και ακουστικά, στον οδηγό.
- Εσωτερικές επικοινωνίες δικτύου του φορέα JRC που θα παρέχουν συνδεσιμότητα μεταξύ των RSUs και των διαφόρων υποστηρικτικών υπηρεσιών που εκτελούνται στο κέντρο δεδομένων (π.χ. ο ελεγκτής του φαναριού, ο διακομιστής καταγραφής συμβάντων κλπ.).
- Φυσικοί/εικονικοί εξυπηρετητές στο κέντρο δεδομένων του JRC που εκτελούν τις προαναφερθείσες υποστηρικτικές υπηρεσίες.



Εικόνα 45: Αρχιτεκτονική GLOSA στο πλαίσιο δοκιμών επιδόσεων του ερευνητικού προγράμματος 5G-DRIVE<sup>279</sup>

<sup>279</sup> Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Vasilaki, E., et al. (2021): 5G-DRIVE Program, Deliverable 2.3: "Final Report of Architecture and Use Case Implementation". <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>,

## 7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΥΠΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ

### 7.1. Περιγραφή του Συστήματος

Οι διασταυρώσεις είναι εξαιρετικά σημαντικές για το οδικό δίκτυο αλλά αποτελούν συνήθως τα πιο επικίνδυνα τμήματά του, με αποτέλεσμα να είναι μια από τις κύριες αιτίες τροχαίων ατυχημάτων. Με βάση διάφορα στατιστικά δεδομένα ή/και πληροφορίες από συναφείς μελέτες<sup>280,281</sup>, εξαιρετικά σημαντικό ποσοστό των σοβαρών ατυχημάτων (θανατηφόρων ή με τραυματισμό) που συμβαίνουν στις Ηνωμένες Πολιτείες σχετίζονται με τις οδικές διασταυρώσεις. Όμως και τα ατυχήματα κοντά σε διασταυρώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης (κοινώς «μποτιλιαρίσματα») που με τη σειρά τους συνεπάγονται απώλεια χρόνου και χρημάτων για τους οδηγούς αλλά και αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Αναφέρεται επίσης ότι περίπου το 96% των ατυχημάτων που σχετίζονται με διασταυρώσεις είχαν να κάνουν με λάθος του οδηγού όπως είναι π.χ. η έλλειψη προσοχής, η εσφαλμένη αντίληψη για τις ενέργειες των υπολοίπων οδηγών και οι στροφές με έλλειψη ορατότητας<sup>282, 283, 284, 285</sup> [95].

Οι κίνδυνοι στις διασταυρώσεις προέρχονται πρωτίστως από:

- Την αλληλεπίδραση/διάδραση μεταξύ πεζών, ποδηλάτων και οχημάτων,
- την κίνηση των οχημάτων χωρίς σαφή διαγράμμιση των λωρίδων κυκλοφορίας,
- περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι εύκολα κατανοητό ποιος εκ των εμπλεκομένων έχει τελικά προτεραιότητα,
- προσέγγιση οχημάτων εκτός του οπτικού πεδίου των υπολοίπων χρηστών,
- εμπόδια στην κίνηση των οχημάτων,
- παράνομες κινήσεις.

Οι προκλήσεις από αυτούς τους κινδύνους δεν μπορούν να ξεπεραστούν πλήρως με ανασχεδιασμό των δρόμων, όπως γίνεται με σχέδια τύπου “road diet”<sup>286</sup> και “vision

---

<sup>280</sup> Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation (2021, August): *Intersection Safety*. Available at: <https://highways.dot.gov/research/research-programs/safety/intersection-safety>

<sup>281</sup> Choi, E.-H. (2010/09): *Crash Factors in Intersection-Related Crashes: An On-Scene Perspective*. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Available at: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/811366>

<sup>282</sup> National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation (2015, February): *Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey*. Available at: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812115>

<sup>283</sup> Smith System (2019, February): *What Drivers Should Know to Avoid Crashes*. Available at: <https://blog.drivedifferent.com/blog/what-drivers-should-know-to-avoid-intersection-crashes>

<sup>284</sup> Atlanta Personal Injury Law Group (2022): *Top Causes for Crashes in Intersections*. Available at: <https://atlinjurylawgroup.com/blog/top-causes-for-crashes-in-intersections/>

<sup>285</sup> Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation (2022): *About Intersection Safety*. Available at: <https://safety.fhwa.dot.gov/intersection/about/>

<sup>286</sup> Noland, R.B., Gao, D., Gonzales, E.J., & Brown, C. (2015, December): *Costs and benefits of a road diet conversion. Case Studies on Transport Policy*, vol.3, issue 4, pp.449-458. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2015.09.002>

zero”<sup>287</sup> αλλά ούτε και με τη χρήση των αυτόνομων οχημάτων, παρά τους πολλούς αισθητήρες που μπορεί τα οχήματα να διαθέτουν και τη συνεχή και αδιάλειπτη επιτήρηση αυτών.

Στις πλείστες εκ των περιπτώσεων, τα ατυχήματα μπορεί να συμβούν καθώς οι εμπλεκόμενοι σε αυτά οδηγοί, ποδηλάτες και πεζοί δεν διαθέτουν την απαιτούμενη πληροφόρηση, ώστε να αποφύγουν τη λήψη μιας λανθασμένης απόφασης.

Εντούτοις, οι πληροφορίες που «λείπουν» μπορούν να υπολογιστούν και να μεταδοθούν από μια «έξυπνη διασταύρωση», έτσι ώστε να ενισχυθεί η ασφάλεια.

Οι πληροφορίες αυτές είναι, ενδεικτικά:

- Τρέχουσα πλήρης φάση της φωτεινής σήμανσης της διασταύρωσης.
- Εκτίμηση χρόνου για αλλαγή της φάσης της φωτεινής σήμανσης.
- Κατάληψη «τυφλών ζωνών» του οδηγού ή του αυτόνομου οχήματος από άλλον χρήστη της διασταύρωσης.
- Ανίχνευση παραβιάσεων κόκκινου σηματοδότη.

Η διαχείριση των διασταυρώσεων είναι από τα πιο δύσκολα προβλήματα του οδικού δικτύου τόσο για τη διατήρηση της ασφάλειας όσο και για την εξομάλυνση της ροής κυκλοφορίας. Αν και οι διασταυρώσεις καταλαμβάνουν ένα σχετικά μικρό μέρος ολόκληρου του οδικού συστήματος, αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος των τροχαίων ατυχημάτων, όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Στο εγγύς μέλλον, με την εξέλιξη των τεχνολογιών επικοινωνιών και πληροφορικής, οι διασταυρώσεις θα έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν τη φωτεινή σήμανση όπως και την ταχύτητα των (αυτόνομων ή/και άλλων) οχημάτων που προσεγγίζουν σε αυτές.

Οι διασταυρώσεις αποτελούν επίσης τα συνήθη σημεία συμφόρησης της κυκλοφορίας και επομένως η εφαρμογή ευφυών συστημάτων μπορεί να συνεισφέρει στην αποτελεσματική διαχείριση της ροής κυκλοφορίας χωρίς την κατασκευή νέων δρόμων ή/και τη διεύρυνση των υφιστάμενων (πράγμα που συχνά είναι πρακτικά αδύνατο). Τέτοια ευφυή συστήματα μπορεί να υποστηρίζονται από μηχανική μάθηση - machine learning (ML)<sup>288,289</sup>, ασαφή λογική - fuzzy logic (FL)<sup>290</sup>, πολλαπλούς πράκτορες - multi agents<sup>291</sup> όπως και από τη διασύνδεση οχήματος-υποδομής (V2I) όπως συμβαίνει στα συστήματα GLOSA.

---

<sup>287</sup> Kim, E., Muennig, P., & Rosen, Z. (2017): Vision zero: a toolkit for road safety in the modern era. In *Injury Epidemiology*, vol.4, issue 1, pp.1-9. <https://doi.org/10.1186/s40621-016-0098-z>

<sup>288</sup> Alqudah, N., & Yaseen, Q. (2020): Machine Learning for Traffic Analysis: A Review. *Procedia Computer Science*, vol.170, pp.911-916. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.111>

<sup>289</sup> Boukerche, A., & Wang, J. (2020, November): Machine Learning-based traffic prediction models for Intelligent Transportation Systems. *Computer Networks*, vol.181, no.9. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107530>

<sup>290</sup> Mohanaselvi, S., & Shanpriya, B. (2019): Application of fuzzy logic to control traffic signals. *AIP Conference Proceedings*, 2112, pp.1-9. <https://doi.org/10.1063/1.5112230>

<sup>291</sup> Xu, M., An, K., Vu, L. H., Ye, Z., Feng, J., & Chen, E. (2019): Optimizing multi-agent based urban traffic signal control system. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, vol.23, issue 4, pp.357-369. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1501273>

Η διαχείριση των διασταυρώσεων με τη φωτεινή σηματοδότηση είναι μεν αποτελεσματική αλλά δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τη συνεχώς αυξανόμενη κυκλοφορία και δεν αξιοποιεί πλήρως τις νέες δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία. Η σύγχρονη προσέγγιση καθιστά δυνατή μια μορφή «συνεταιριστικής» διαχείρισης της διασταύρωσης<sup>292</sup>, όπου οι χρήστες αυτής, η υποδομή και τα κέντρα ελέγχου της κυκλοφορίας μπορούν να επικοινωνούν και να συντονίζουν την κυκλοφορία, με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα<sup>293</sup>. Σημαντικές τεχνικές και λύσεις για τις συνεταιριστικές διασταυρώσεις έχουν προταθεί τόσο για τις περιπτώσεις σηματοδοτημένων όσο και για μη σηματοδοτημένων διασταυρώσεων<sup>294</sup>. Σε αυτό το θεματικό πεδίο εφαρμογών, έχουν επίσης προταθεί διάφορες μέθοδοι συνεργασίας, συμπεριλαμβανομένων των χρονοθυρίδων - time slots<sup>295</sup> και της δέσμευσης χώρου, του σχεδιασμού τροχιάς (trajectory planning) και των εικονικών φαναριών ρύθμισης κυκλοφορίας (virtual traffic lights)<sup>296,297</sup>.

Μια διασταύρωση θα μπορούσε να είναι σηματοδοτημένη – ή όχι – και η ροή της κυκλοφορίας να ρυθμίζεται με επικοινωνία τύπου V2V ή/και V2I. Στο πλαίσιο αυτό έχουν προταθεί διάφορες λύσεις για τα αυτόνομα οχήματα όπως είναι π.χ. οι περιπτώσεις που αφορούν σε προσαρμοστικό έλεγχο πορείας - adaptive cruise control (ACC)<sup>298</sup>, σε συνεργατικό προσαρμοστικό έλεγχο πορείας - cooperative adaptive cruise control (CACC)<sup>299</sup>, σε συστήματα λήψης αποφάσεων και ελέγχου<sup>300</sup> καθώς και σε

---

<sup>292</sup> Chouhan, A.P., and Banda, G. (2018, September): Autonomous intersection management: A heuristic approach. *IEEE Access*, vol.6, pp.53287-53295, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2871337.

<sup>293</sup> Hausknecht, M., Chiu Au, T., and Stone, P. (2011, September): *Autonomous intersection management: multi intersection optimization*. In: *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4581-4586. IEEE, San Francisco, CA, September 25-30, 2011, doi: 10.1109/IROS.2011.6094668.

<sup>294</sup> Namazi, F., Li, J., and Lu, C. (2019, July): Intelligent Intersection Management Systems Considering Autonomous Vehicles: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, vol.7, pp.91946-91965, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927412.

<sup>295</sup> Chen, L., & Englund, C. (2016). Cooperative Intersection Management: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.17, no.2, pp.570-586. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2471812>

<sup>296</sup> Βλέπε: Clement, S.J., Taylor, M.A., and Yue, W.L. (2004): Simple platoon advancement: a model of automated vehicle movement at signalised intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.12, no.3, pp.293-320, doi: 10.1016/j.trc.2004.07.012

<sup>297</sup> Parent, M. (2013, June): *Automated Vehicles: Autonomous or Connected?* In: *Proceedings of the 2013 IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management*, pp.2-2. IEEE Computer Society, Milan, Italy, June 03-06, 2013, doi: 10.1109/MDM.2013.105.

<sup>298</sup> Xiao, L., and Gao, F. (2010, April): A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems. *Vehicle Systems Dynamics*, vol.48, issue 10, pp.1167-1192. doi:10.1080/00423110903365910

<sup>299</sup> Dey, K.C., Yan, L., Wang, X., Wang, Y., Shen, H., Chowdhury, M., Yu, L., Qiu, C., and Soundararaj, V. (2016, February): A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC). *IEEE Transactions on Intelligent Transportation systems*, vol.17, no.2, pp.491-509, doi:10.1109/TITS.2015.2483063.

<sup>300</sup> Veres, S.M., Molnar, L., Lincoln, N.K., and Morice, C.P. (2011, March): Autonomous vehicle control systems - A review of decision making. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol.225, no.3, pp.155-195, doi: 10.1177/2041304110394727

επικοινωνία μεταξύ των αυτόνομων οχημάτων και των υπολοίπων χρηστών για τη ρύθμιση της κυκλοφορίας<sup>301</sup>.

Είναι κρίσιμο το να καταγράφονται και να παρακολουθούνται δείκτες απόδοσης σε μια διασταύρωση, για να προσδιορίζεται το πόσο καλά αυτή λειτουργεί και πόσο εν τέλει εξυπηρετεί το κοινό. Η επανεξέταση και ενημέρωση του χρονισμού και όλων των πτυχών λειτουργίας μιας διασταύρωσης συνιστούν εξαιρετικά σημαντικές δράσεις, ειδικά όταν συμβαίνουν αλλαγές στον όγκο της κυκλοφοριακής κίνησης την οποία εξυπηρετεί η συγκεκριμένη οδική διασταύρωση ή/και στη χρήση του παρακείμενου χώρου.

Σε αντίθεση με τους δρόμους όπου υπάρχει ξεκάθαρη διαγράμμιση των λωρίδων κυκλοφορίας, οι διασταυρώσεις δεν μπορούν να διαθέτουν λωρίδες αποκλειστικής κυκλοφορίας κάποιων χρηστών ή κινήσεων. Οι τροχιές πεζών, ποδηλάτων και οχημάτων επικαλύπτονται μερικώς – ή ολικώς – δημιουργώντας «ζώνες διένεξης» και πιθανότητα ζώνες ατυχήματος. Έτσι η προοπτική της αποφυγής ατυχημάτων<sup>302</sup> απαιτεί το να διαχωρίζονται οι κινήσεις των διαφορετικών χρηστών μιας διασταύρωσης στο χρόνο ή/και στον χώρο.

Στα παρεμβατικά συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης, οι συγκρούσεις μεταξύ δύο οχημάτων μπορούν να αποφευχθούν πρωτίστως με τον έλεγχο της ταχύτητάς τους και ποτέ με τον έλεγχο του τιμονιού<sup>303,304</sup>. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένα σύγχρονο όχημα θα διαθέτει:

- Αισθητήρες για την κατάστασή του (ήτοι ακριβής θέση, κατεύθυνση κίνησης, ταχύτητα, επιτάχυνση, ροπή φρένου και θέση του πεντάλ),
- δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα οχήματα (V2V),
- δυνατότητα αυτόματης ενεργοποίησης του γκαζιού και του φρένου.

Μπορούμε ακόμη να θεωρήσουμε ότι το σύστημα αποφυγής σύγκρουσης είναι ενεργοποιημένο πολύ πριν τα οχήματα πλησιάσουν στη διασταύρωση, αποτρέποντας

---

<sup>301</sup> Li, L., Wen, D., and Yao, D. (2014, February): A survey of traffic control with vehicular communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.15, no.1, pp.425-432, doi: 10.1109/TITS.2013.2277737.

<sup>302</sup> Hafner, M. Cunningham, D., Caminiti, L., and Del Vecchio, D. (2013, September): Cooperative collision avoidance at intersections: Algorithms and experiments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.14, no.3, pp.1162-1175, doi: 10.1109/TITS.2013.2252901.

<sup>303</sup> Colombo, A., and Del Vecchio, D. (2012, April): *Efficient algorithms for collision avoidance at intersections*. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, pp.145-154. <https://doi.org/10.1145/2185632.2185656>

<sup>304</sup> European Telecommunications Standards Institute (ETSI): TS 101 539-2 V1.1.1 (2018-06): *“Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW); Application Requirements Specification”*. ETSI, Sophia-Antipolis, France. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101500\\_101599/10153902/01.01.01\\_60/ts\\_10153902v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10153902/01.01.01_60/ts_10153902v010101p.pdf)

έτσι εύλογα τη διαμόρφωση καταστάσεων που οδηγούν σε αναπόφευκτη σύγκρουση<sup>305, 306</sup>.

### 7.1.1. Φάση της Φωτεινής Σηματοδότησης

Επειδή σχεδόν ποτέ δεν μπορεί να υπάρξει πλήρης διαχωρισμός των τροχιών των χρηστών της διασταύρωσης, ο κίνδυνος συγκρούσεων παραμένει [95].

Η φωτεινή σηματοδότηση παρέχει σημαντική προφύλαξη γιατί δεν παρέχεται ταυτόχρονα το δικαίωμα κίνησης σε δύο αντικρουόμενες κινήσεις, αλλά πολύ συχνά και για λόγους αποδοτικότητας της διασταύρωσης η χρήση της γίνεται με αρκετούς «συμβιβασμούς». Έτσι, για παράδειγμα ένας οδηγός που προτίθεται να εκτελέσει μια αριστερή στροφή βλέπει από το φανάρι ότι επιτρέπεται μεν η κίνησή του αλλά δεν μπορεί να γνωρίζει εάν ταυτόχρονα δίνεται το δικαίωμα χρήσης μέρους της τροχιάς του στα οχήματα ή ποδήλατα που εκτελούν δεξιά στροφή ή ακόμη και σε πεζούς. Το σήμα δηλαδή που βλέπει ο οδηγός, δεν περιέχει την ολική πληροφορία για τη φάση των επιτρεπτών κινήσεων στην διασταύρωση.

Από την άλλη μεριά, και ένας πεζός ή ποδηλάτης ο οποίος εκτελεί μια κίνηση, μπορεί να αγνοεί μια επιτρεπόμενη κίνηση οχήματος που διασταυρώνεται με τη δική του πορεία.

Αυτή η αβεβαιότητα σχετικά με τα δικαιώματα διέλευσης μπορεί να εξαλειφθεί από μια ευφυή διασταύρωση η οποία θα παρέχει επαρκείς πληροφορίες σχετικά με τη φάση της, δηλαδή με όλες τις επιτρεπόμενες κινήσεις εντός αυτής.

Ένας άλλος εν δυνάμει κίνδυνος προέρχεται από το γεγονός ότι πολλές φορές οι χρήστες της διασταύρωσης προβλέπουν την αλλαγή της φάσης της και εκτελούν κινήσεις βασιζόμενες σε αυτή τους την εκτίμηση.

Στην πράξη, η υποδομή της διασταύρωσης μπορεί να μεταδώσει με ακρίβεια πληροφορίες για την τρέχουσα φάση σηματοδότησής της αλλά και για την επερχόμενη αλλαγή της (μήνυμα SPaT<sup>307</sup> - Signal Phase and Timing) και έτσι να εξαλειφθεί η αβεβαιότητα σχετικά με τα δικαιώματα διέλευσης.

---

<sup>305</sup> Azimi, S., Bhatia, G., Rajkumar, R., and Mudalige, P. (2011): Vehicular networks for collision avoidance at intersections. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, vol.4, no.1, pp.406-416, doi: 10.4271/2011-01-0573.

<sup>306</sup> Azimi, R., Bhatia, G., Rajkumar, R., and Mudalige, P. (2012, April): Intersection management using vehicular networks. *SAE Tech. Papers 2012-01-0292*. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0292>.

<sup>307</sup> Το SPaT, ή Signal Phasing and Timing, περιγράφει μια σειρά μηνυμάτων που αποτελούν μέρος αυτού που είναι κοινώς γνωστό ως "Cooperative Intelligent Transport Systems" ή "CITS" (προφέρεται ως Cee-ITS) και είναι μια σειρά διεθνών προτύπων διαθέσιμων σε όλες τις οδικές αρχές και τους κατασκευαστές οχημάτων. Το SPaT είναι ένα μήνυμα I2V που χρησιμοποιείται κυρίως για την επικοινωνία της κατάστασης της οδικής διασταύρωσης με οχήματα που πλησιάζουν σε αυτή τη διασταύρωση. Συνήθως περιέχει δυναμικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση μιας σηματοδοτημένης διασταύρωσης. Ένα μήνυμα SPaT περιγράφει την τρέχουσα φάση σε μια σηματοδοτημένη διασταύρωση, μαζί με τον υπολειπόμενο χρόνο της φάσης, για κάθε λωρίδα της διασταύρωσης. Μπορεί να περιέχει την κατάσταση του φαναριού οδικής σήμανσης, μελλοντικές προβλέψεις κατάστασης, συμβουλές ταχύτητας, πληροφορίες κατάστασης ουράς αναμονής στο φανάρι και ειρίσης εάν είναι ενεργό ένα αίτημα προτεραιότητας. Μαζί με το μήνυμα MAP (το οποίο περιγράφει μια πλήρη γεωμετρική διάταξη μιας διασταύρωσης) ο δέκτης αυτού του μηνύματος μπορεί να καθορίσει την κατάσταση της φάσης του σήματος στο φανάρι και τότε θα συμβεί η επόμενη



### 7.1.2. Τυφλές Ζώνες

Ακόμη όμως και όταν ο οδηγός – ή/και ο ποδηλάτης ή/και ο πεζός ή/και το αυτόνομο όχημα – γνωρίζει την πλήρη φάση της διασταύρωσης, η γνώση για την πραγματική κατάσταση μπορεί να περιορίζεται από την απόκρυψη κρίσιμης πληροφορίας λόγω των εμποδίων που εισάγει η φυσική παρουσία των υπολοίπων – πιθανώς εμπλεκόμενων – χρηστών [95].

Όταν ο χρήστης (η ένα αυτόνομο όχημα - AV) προσεγγίζει σε μια διασταύρωση και δεν μπορεί να δει πλήρως μια τυφλή ζώνη τότε ή θα οδηγήσει επιφυλακτικά με αργή ταχύτητα (πράγμα που εισάγει άσκοπες καθυστερήσεις εάν δεν υπάρχει χρήστης στην ζώνη σύγκρουσης) ή θα οδηγήσει με κανονική ταχύτητα διακινδυνεύοντας ωστόσο μια πιθανή σύγκρουση, εάν τελικά η τυφλή ζώνη είναι κατειλημμένη<sup>308</sup>.

Η έξυπνη διασταύρωση μπορεί να διαθέτει κατάλληλους αισθητήρες κατάληψης των τυφλών ζωνών και να μεταδίδει την απαραίτητη πληροφορία στους χρήστες ώστε να λυθεί το προαναφερθέν δίλλημα<sup>309</sup>.

Γενικά, οι διασταυρώσεις συνιστούν «πρόκληση» τόσο για τους χρήστες αστικών οδών όσο και για τους σχεδιαστές των αυτόνομων οχημάτων.

Μια ευφυής διασταύρωση μπορεί να εκπέμψει δύο κρίσιμα μηνύματα πληροφοριών, ως κάτωθι:

- Ένα μήνυμα SPaT I2V που έχει τυποποιηθεί από την SAE και προσφέρει ολική πληροφορία περί της φάσης της φωτεινής σηματοδότησης (σε αντίθεση με τη μερική γνώση που μπορεί να έχει ένας χρήστης ή ένα AV) και μια εκτίμηση χρόνου για την αλλαγή αυτής. Η πληροφορία αυτή, μαζί με ό,τι μπορεί να δει ο χρήστης ή/και να αντιληφθεί το AV, μπορεί να εξαλείψει την πλειονότητα των συγκρούσεων.
- Ένα μήνυμα που πληροφορεί τα AVs για τις τυφλές ζώνες τους και για το ποιες από αυτές είναι κατειλημμένες από άλλον χρήστη.

Ο υπολογισμός των μηνυμάτων SPaT απαιτεί σε πραγματικό χρόνο (real-time – RT) πρόσβαση στην πληροφορία φάσης της φωτεινής σηματοδότησης της διασταύρωσης. Ο υπολογισμός της κατάληψης των τυφλών ζωνών απαιτεί RT ανίχνευση από αισθητήρες κάποιων καθορισμένων περιοχών της διασταύρωσης.

---

αναμενόμενη φάση. Ακριβή μηνύματα τύπου SPaT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός προφίλ ταχύτητας για όχημα που μειώνει την κατανάλωση καυσίμου καθώς αυτό πλησιάζει ή αφήνει μια διασταύρωση [28].

<sup>308</sup> Medury, A., Yu, M., Grembek, O., Kurzhanskiy, A.A., Flores, C., and Varaiya, P. (2017, November): The disengagement dilemma of automated vehicles. In: *Proceedings of the ITS World Congress 2017*, pp.1-18. Montreal, Canada, October 29 - November 02, 2017.

<sup>309</sup> Rios-Torres, J., and Malikopoulos, A.A. (2017, May): A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.18, no.5, pp.1066-1077, doi: 10.1109/TITS.2016.2600504.

Με αυτά τα δύο μηνύματα μπορούν να επιλυθούν όλες οι πιθανές διενέξεις εντός της διασταύρωσης.

### 7.1.3. Παράνομη Κίνηση

Τέλος, και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει αντικρουόμενη κίνηση, μια σύγκρουση είναι δυνατόν να συμβεί λόγω της παράνομης κίνησης κάποιου άλλου χρήστη (π.χ. παραβίαση ερυθρού σηματοδότη από όχημα ή πεζό) [95].

Και αυτή η περίπτωση θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων (π.χ. κάμερα ερυθρού φωτός)<sup>310</sup> και την έγκαιρη ειδοποίηση των υπολοίπων χρηστών.

### 7.1.4. Περιπτώσεις Διλήμματος

Ανεξάρτητα από όσα συστήματα μπορεί να διαθέτει ένα όχημα, χωρίς την υποβοήθηση από την υποδομή πάντα υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο οδηγός – ή/και το AV – δεν μπορεί να εξάγει συμπέρασμα για την πραγματική κατάσταση που επικρατεί στη διασταύρωση.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται και αναλύονται τέτοιες περιπτώσεις<sup>311</sup> [96]:



Εικόνα 46: Περιπτώσεις διλήμματος [96]

<sup>310</sup> Βλέπε: Muralidharan, A., Coogan, S., Flores, C., and Varaiya, P. (2016, July): Management of intersections with multi-modal high-resolution data. *Transportation Research, Part C*, vol.68, pp.101-112, doi: 10.1016/j.trc.2016.02.017

<sup>311</sup> Medury, A., Yu, M., Grembek, O., Kurzhanskiy, A.A., Flores, C., and Varaiya, P. (2017): The disengagement dilemma of automated vehicles. In: *Proceedings of the ITS World Congress 2017*, pp.1-18. Montreal, Canada, October 29 - November 02, 2017.

1. RTOR (right turn on red) σύγκυση και περιορισμένη ορατότητα: Το RTOR όχημα (κόκκινο επάνω αριστερά) δεν μπορεί να συμπεράνει εάν το απέναντί του όχημα έχει το δικαίωμα να στρίψει.
2. Το όχημα στρίβει δεξιά με πράσινο αλλά ταυτόχρονα ένας πεζός διασχίζει τη διάβαση. Ο οδηγός αργεί να αντιδράσει μέχρι να καταλάβει την κατεύθυνση κίνησης, την ταχύτητα και γενικά όλα τα στοιχεία κίνησης του πεζού.
3. Δύο αυτοκίνητα προσεγγίζουν τη διασταύρωση με πράσινο. Το όχημα που ακολουθεί δεν ξέρει πότε θα ανάψει κίτρινο, οπότε και μπορεί να φρενάρει απότομα το προπορευόμενο.
4. Το όχημα στρίβει αριστερά με πράσινο αλλά οι αισθητήρες του δεν καλύπτουν σε εύρος το απαραίτητο πεδίο, ώστε να αντιληφθεί το όχημα που στρίβει δεξιά και έχει και αυτό δικαίωμα σε RTOR κίνηση.
5. Δύο οχήματα προσεγγίζουν τη διασταύρωση και ένας πεζός βρίσκεται στη διάβαση. Το όχημα που προτίθεται να στρίψει αριστερά έχει κόκκινο και σταματάει αλλά έτσι εμποδίζει την ορατότητα αυτού που μπορεί να στρίψει δεξιά (RTOR) με αποτέλεσμα αυτό να μην «βλέπει» τον πεζό (ή το δίκυκλο).
6. Παραβίαση ερυθρού σηματοδότη

#### 7.1.5. Σύστημα Intersection Collision Warning (ICW)

Το σύστημα Intersection Collision Warning (ICW)<sup>312</sup> (σύστημα Προειδοποίησης Σύγκρουσης σε Διασταύρωση) είναι ένα σύστημα που ειδοποιεί τους οδηγούς για πιθανό κίνδυνο όταν πλησιάζουν σε διασταύρωση. Αυτό το πετυχαίνει μεταδίδοντας αξιόπιστες και έγκαιρες προειδοποιήσεις σε άλλα οχήματα που πλησιάζουν στη διασταύρωση και επομένως δύναται να αποτρέπει πιθανές συγκρούσεις.

Τα πρώτα σχετικά αποτελέσματα μελετών έδειξαν ότι τα συστήματα προειδοποίησης σύγκρουσης θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά τα θανατηφόρα ατυχήματα και τις υλικές ζημιές<sup>313, 314, 315</sup>.

Όταν πολλά οχήματα προσεγγίζουν μια διασταύρωση περίπου στην ίδια στιγμή, το ICW θα μπορούσε να βοηθήσει στην αποφυγή πιθανών συγκρούσεων εάν οι οδηγοί γνωρίζουν τις πληροφορίες όλων των οχημάτων που βρίσκονται στην περιοχή, συμπεριλαμβανομένων των θέσεων, της ταχύτητας και των κατευθύνσεων κίνησής τους.

---

<sup>312</sup> Penney, T. (1999): *Intersection Collision Warning System*. US Patent App. 11/714,572, 703.

<sup>313</sup> Cicchino, J.B. (2017): Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates. *Accident Analysis & Prevention*, vol.99, part A, pp.142-152. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.11.009>

<sup>314</sup> Benson, A.J., Tefft, B.C., Svancara, A.M., & Horrey, W.J. (2018): Potential Reductions in Crashes, Injuries, and Deaths from Large-Scale Deployment of Advanced Driver Assistance Systems (Research Brief). *AAA Foundation for Traffic Safety*.

<sup>315</sup> Basma, F., & Refai. H. (2009, December): Collision Avoidance System at Intersections. The University of Oklahoma. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/239585310>

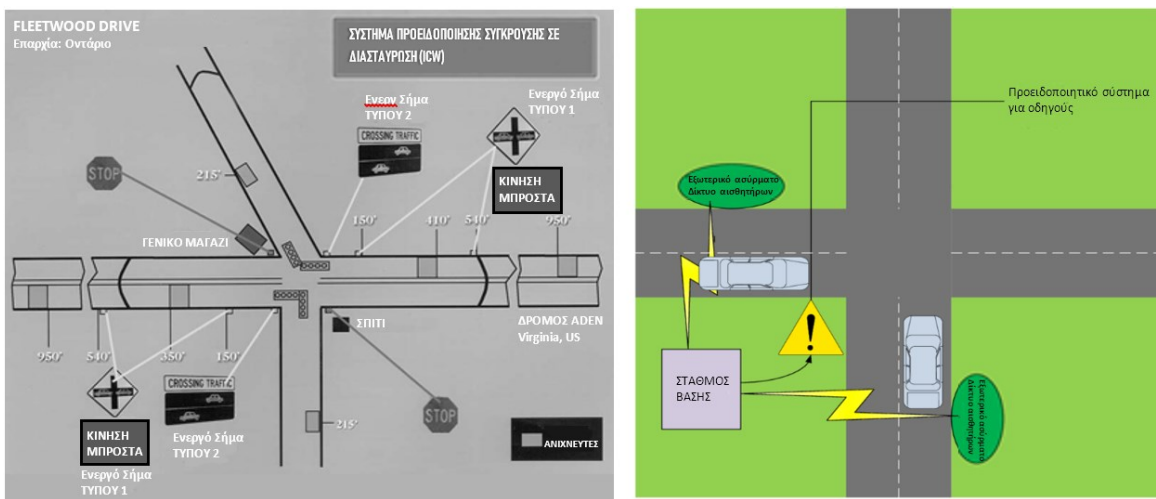
## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

Με βάση τις πληροφορίες θέσης, κατεύθυνσης κίνησης και ταχύτητας, ένα τέτοιο σύστημα υπολογίζει τον χρόνο που θα μπορούσε να συμβεί μια επικείμενη σύγκρουση και προειδοποιεί τους οδηγούς ώστε να λάβουν τα αναγκαία αποτρεπτικά μέτρα.

Στην Εικόνα 47α παρουσιάζεται μια αρχική υλοποίηση του συστήματος σύμφωνα με την οποία στη διασταύρωση δύο δρόμων, ενός κύριου (Aden) και ενός δευτερεύοντος (Fleetwood Drive), εγκαταστάθηκαν ανιχνευτές κίνησης κατά μήκος του κύριου δρόμου οι οποίοι μετρούσαν την ταχύτητα των εισερχομένων οχημάτων και κατά μήκος του δευτερεύοντος δρόμου οι οποίοι ανίχνευαν την ύπαρξη οχημάτων που περίμεναν για να διασχίσουν τον κύριο δρόμο.

Ένας υπολογιστής (ελεγκτής) της διασταύρωσης που δεχόταν τα δεδομένα των ανιχνευτών, υπολόγιζε και έδινε έξοδο σε ενεργές πινακίδες σήμανσης. Στον μεν κύριο δρόμο οι πινακίδες προειδοποιούσαν για την ύπαρξη των οχημάτων που ανέμεναν στον δευτερεύοντα εμφανίζοντας ένα αυτοκίνητο να αναβοσβήνει και ένα μήνυμα “Traffic Ahead” («Κίνηση Εμπρός»), ενώ στον δευτερεύοντα δρόμο οι πινακίδες εμφάνιζαν ένα παρόμοιο σύμβολο με μήνυμα “Crossing Traffic” («Διασταυρούμενη Κίνηση»).

Η υλοποίηση αυτή στόχευε να αυξήσει την ασφάλεια των διασταυρώσεων χωρίς φωτεινή σηματοδότηση, οι οποίες ρυθμίζονται μόνο από πινακίδες τύπου “STOP”.



Εικόνα 47: Intersection Collision Warning (ICW) System<sup>316, 315</sup>

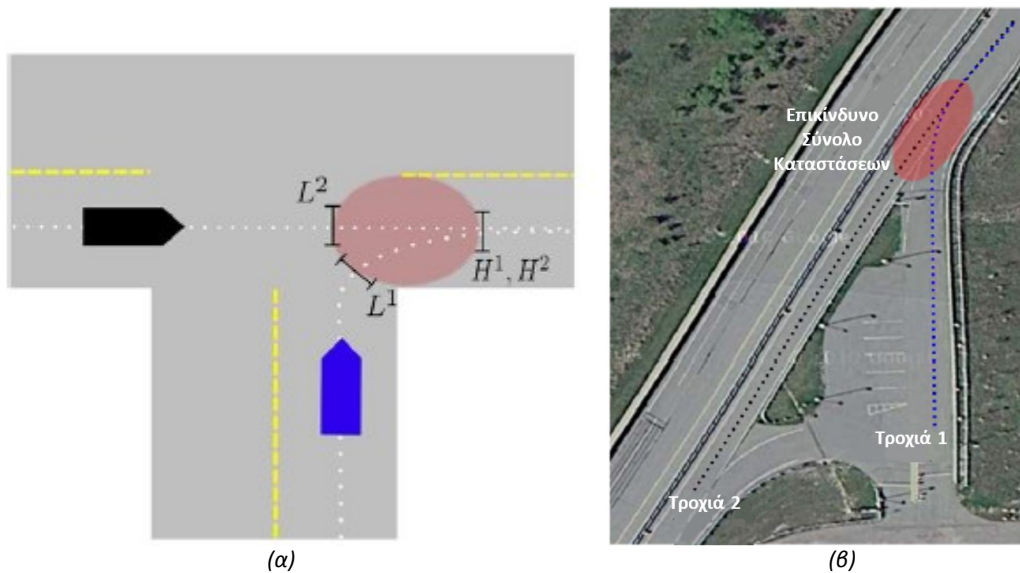
Στην Εικόνα 47β παρουσιάζεται ένα σύγχρονο ICW σύστημα το οποίο και πάλι χρησιμοποιεί ανιχνευτές για να εντοπίσει την ύπαρξη οχημάτων που προσεγγίζουν την διασταύρωση από διαφορετικούς δρόμους και, αφού λάβει υπόψη του την τροχιά και την ταχύτητα κάθε οχήματος, υπολογίζει την πιθανότητα σύγκρουσης και χρησιμοποιεί I2V επικοινωνία ώστε να προειδοποιήσει τους οδηγούς ή τα αυτόνομα οχήματα.

Μια από τις προσεγγίσεις που έχουν υλοποιηθεί για να επιλυθεί το πρόβλημα της αποφυγής σύγκρουσης, είναι με τον εκ των προτέρων υπολογισμό του συνόλου των

<sup>316</sup> Penney, T. (1999): *Intersection Collision Warning System*. Federal Highway Administration U.S. DoT. FHWA-RD-99-103. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/99103/index.cfm>

καταστάσεων (θέσεων – ταχυτήτων)<sup>317</sup> που οδηγούν σε σύγκρουση και τη σύνταξη χάρτη που θα περιορίζει την είσοδο στη διασταύρωση, όταν αυτή οδηγεί σε μια από τις καταστάσεις που εκτιμώνται ως «επικίνδυνες» [97].

Αν και η προσέγγιση αυτή είναι θεωρητικά ελκυστική επειδή διασφαλίζει την ασφάλεια «από την κατασκευή» και εφαρμόζει παρακάμψεις μόνο όταν είναι απαραίτητο, η πρακτική εφαρμογή της περιορίζεται από την πολυπλοκότητα του υπολογισμού του συνόλου των επικίνδυνων καταστάσεων<sup>318</sup>.



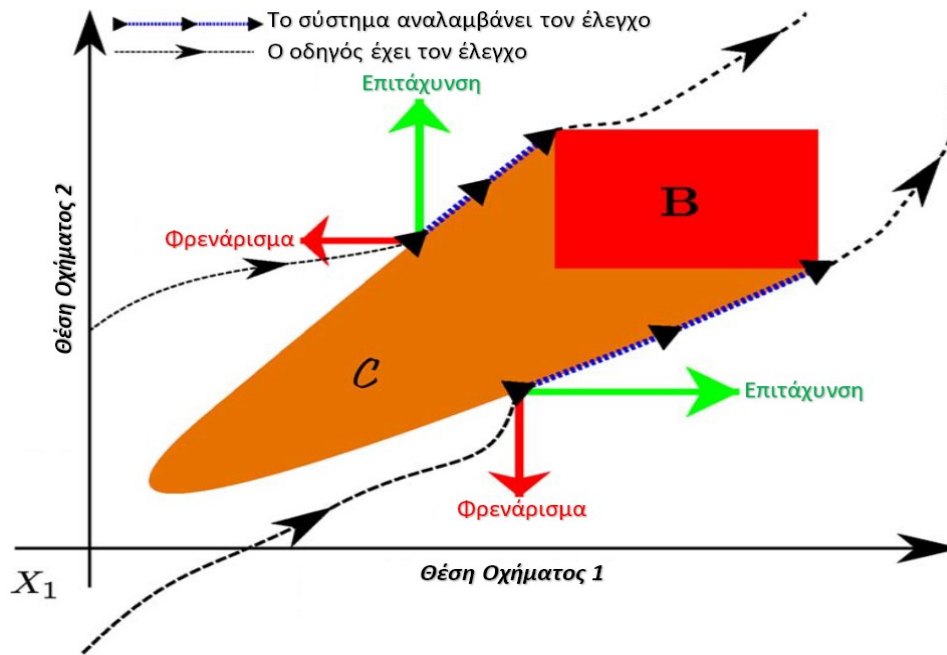
Εικόνα 48: Επίλυση προβλήματος αποφυγής σύγκρουσης [97]  
(α) Θεωρητική προσέγγιση, (β) πραγματικό σενάριο

Στην Εικόνα 48(α) εμφανίζεται η θεωρητική προσέγγιση στο πρόβλημα, ενώ στην Εικόνα 48(β) εμφανίζεται το πρόβλημα σε πραγματικό σενάριο σε μια διασταύρωση [97].

Στην Εικόνα 49 φαίνεται τμήμα του χάρτη θέσεων για συγκεκριμένες ταχύτητες των οχημάτων. Οι τροχιές των οχημάτων δεν επιτρέπεται να εισέλθουν στην πορτοκαλί περιοχή και, εάν αυτές «αγγίξουν» το όριο αυτής της περιοχής, τότε αναλόγως από το ποια τροχιά θα το «αγγίξει» θα εφαρμοστεί στο ένα όχημα μέγιστο φρενάρισμα και στο άλλο μέγιστη επιτάχυνση, ώστε να κρατηθούν εκτός της περιοχής [97].

<sup>317</sup> Hafner, M.R., Cunningham, D., Caminiti, L., & del Vecchio, D. (2013, September): Cooperative collision avoidance at intersections: Algorithms and experiments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.14, no.3, pp.1162-1175. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2252901>

<sup>318</sup> Misener, J., Barnes, M. Chan, C.-Y., Cody, D., Dickey, S., Goodsell, R., Gordon, T., Kim, Z.W., et al. (2010, April): Cooperative Intersection Collision Avoidance System (CICAS): Signalized Left Turn Assist and Traffic Signal Adaptation. California PATH Research Report. *UCB-ITS-PRR-2010-20*. Available at: <https://trid.trb.org/view/919887>



Εικόνα 49: Διάγραμμα επίλυσης (Τμήμα χάρτη όπου εμφανίζεται η απαγορευτική περιοχή) [97]

## 7.2. Σχεδίαση Έξυπνης Διασταύρωσης με την Προσέγγιση των Τεσσάρων (4) Βημάτων

Προκειμένου να καταστεί μια διασταύρωση ασφαλέστερη με τη χρήση ενός πληροφοριακού συστήματος I2V, προτείνεται μια προσέγγιση τεσσάρων βημάτων<sup>319</sup> [98]:

- **Βήμα 1:** Οι τροχιές των χρηστών (αυτοκίνητα, ποδήλατα, πεζοί) ομαδοποιούνται σε οδεύσεις (guideways) που αντιστοιχούν στις δυνατές κινήσεις τους.
- **Βήμα 2:** Εντοπίζονται οι ζώνες διένεξης ως τα σημεία τομής (κοινές περιοχές), δύο τουλάχιστον οδεύσεων.
- **Βήμα 3:** Υπολογίζεται εάν μια προσχεδιασμένη κίνηση μπορεί να εκτελεστεί με ασφαλή τρόπο, σύμφωνα με την πληροφορία που έχει στην κατοχή του ο χρήστης. Η πληροφορία συνίσταται στο τι επακριβώς «αντλούν» οι αισθητήρες του από τους υπόλοιπους χρήστες της διασταύρωσης και από το σήμα SPaT της διασταύρωσης. Αυτό είναι το πιο σημαντικό βήμα της προσέγγισης διότι εδώ προλαμβάνονται οι περισσότερες συγκρούσεις. Αυτό που δεν καλύπτεται, εντούτοις, είναι οι «τυφλές ζώνες».
- **Βήμα 4:** Οι αισθητήρες που διαθέτει η διασταύρωση αντιλαμβάνονται την ύπαρξη άλλων χρηστών στις «τυφλές ζώνες» και συνεπώς η διασταύρωση ενημερώνει κατάλληλα τους χρήστες.

<sup>319</sup> Grembek, O., Kurzhanskiy, A., Medury, A., Varaiya, P., & Yu, M. (2019, May): Making intersections safer with I2V communication. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.102, pp.396-410. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.017>

Τα βήματα (1) και (2) εκτελούνται απογραμμικά (offline) ενώ τα βήματα (3) και (4) απαιτούν πληροφορία σε πραγματικό χρόνο.

Η έξυπνη διασταύρωση υλοποιεί τα 4 βήματα, σύμφωνα με την ακόλουθη περιγραφή:

- Διατίθεται χάρτης με τις οδεύσεις, τις κινήσεις, τις ζώνες διένεξης και τις τυφλές ζώνες και επίσης διατίθενται αισθητήρες που ανιχνεύουν την κατάληψη των τυφλών ζωνών.
- Ο χάρτης δημιουργείται offline και μπορεί να μεταφορτωθεί (download) από τα συνδεδεμένα οχήματα και από άλλους χρήστες.
- Η έξυπνη διασταύρωση υπολογίζει και εκπέμπει σε πραγματικό χρόνο τα μηνύματα SPaT και τα μηνύματα κατάληψης των τυφλών ζωνών<sup>320</sup> [99].
- Η έξυπνη διασταύρωση μπορεί να ανιχνεύει την παραβίαση ερυθρού σηματοδότη χρησιμοποιώντας μια κάμερα η οποία ενεργοποιείται αυτόματα με την ανίχνευση οχήματος που κατευθύνεται προς τη διασταύρωση με υψηλή ταχύτητα κατά τη διάρκεια κόκκινου σήματος<sup>321</sup>, όπως φαίνεται στην Εικόνα 50.



Εικόνα 50: Ανίχνευση παραβίασης ερυθρού σηματοδότη [100]

## 7.2.1. Παράδειγμα Σχεδίασης Έξυπνης Διασταύρωσης

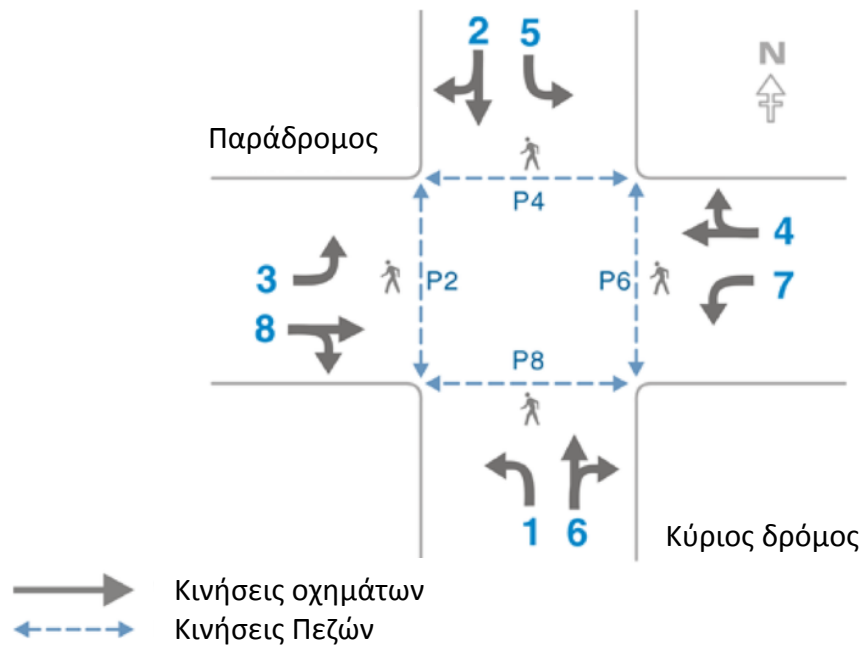
### 7.2.1.1. Κωδικοποίηση Φάσεων

Σε μια τυπική διασταύρωση δύο δρόμων, ένα όχημα εισερχόμενο στη διασταύρωση μπορεί να στρίψει αριστερά ή να στρίψει δεξιά ή να πάει ευθεία. Συνολικά δηλαδή για τις 4 εισόδους έχουμε 12 πιθανές κινήσεις (φάσεις). Από τις 12 φάσεις, οι 4 που αντιστοιχούν στις δεξιές στροφές πάντα επιτρέπονται. Οι υπόλοιπες 8 κωδικοποιούνται ως Φ1, ..., Φ8.

Τα δίκυκλα κινούνται όπως τα οχήματα και έχουν τις ίδιες φάσεις.

<sup>320</sup> Ibrahim, S., Kalathil, D., Sanchez, R. O., & Varaiya, P. (2019, July): Estimating Phase Duration for SPaT Messages. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.20, no.7., pp.2668-2676. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873150>

<sup>321</sup> Kim, J.-H., & Kim, J. (2020, December): A Study on 5G-based AR/VR Technology. *Journal of Digital Art Engineering and Multimedia*, vol.7, no.4, pp.383-394. <https://doi.org/10.29056/jdaem.2020.12.08>



Εικόνα 51: Κωδικοποίηση φάσεων μιας τυπικής διασταύρωσης [98]

Οι πεζοί χρησιμοποιούν τις διαβάσεις και οι κινήσεις τους κωδικοποιούνται σαν P2, P4, P6 και P8 όπου ο αριθμός δείχνει την παραλληλία στην κίνηση με την αντίστοιχη φάση των οχημάτων (π.χ. Φ2 με P2).

Με την παραδοχή αυτή, οι φάσεις P<sub>x</sub> επιτρέπονται ταυτόχρονα με την αντίστοιχη Φ<sub>x</sub>.

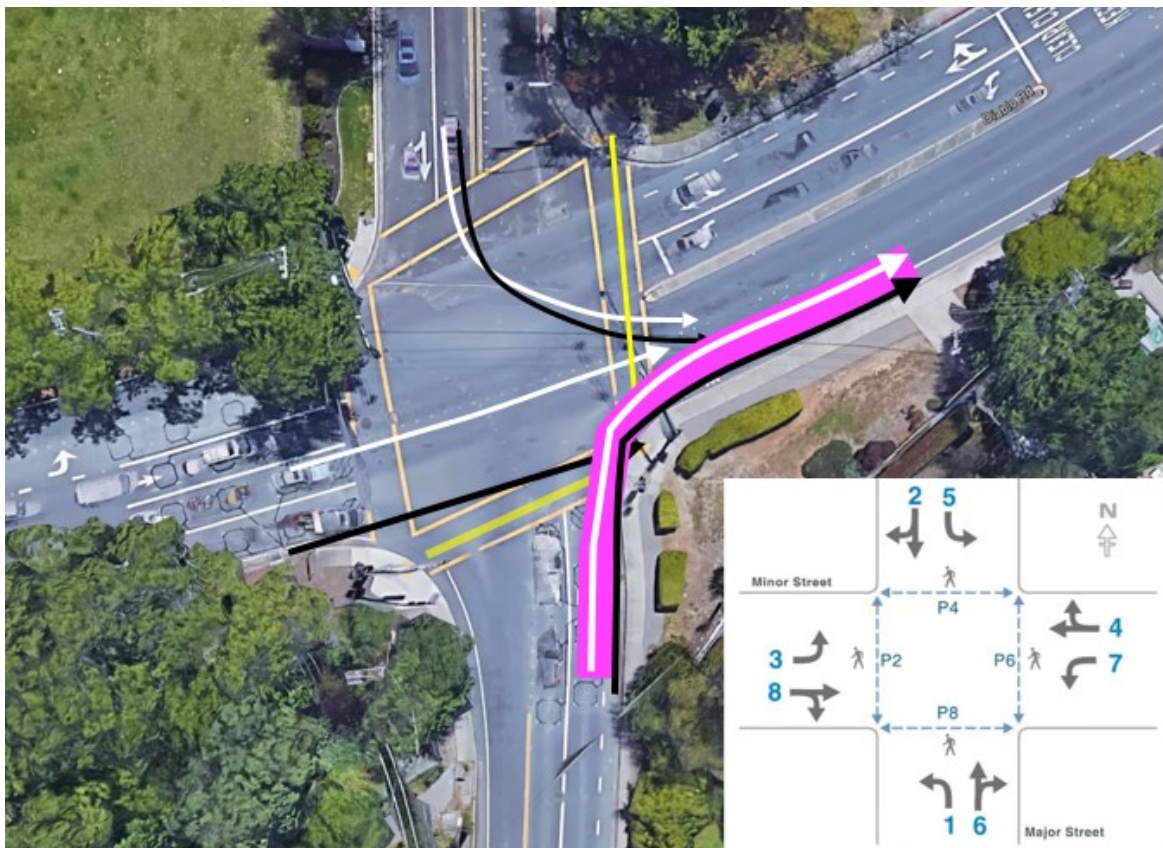


### 7.2.1.2. Βήμα 1: Κατασκευή Οδεύσεων

Σαν «όδευση» ορίζουμε τον χώρο τον οποίο μπορεί να καταλάβει ένα όχημα για να εκτελέσει μια κίνηση. Είναι δηλαδή το σύνολο των πιθανών τροχιών στις οποίες μπορεί να κινηθεί.

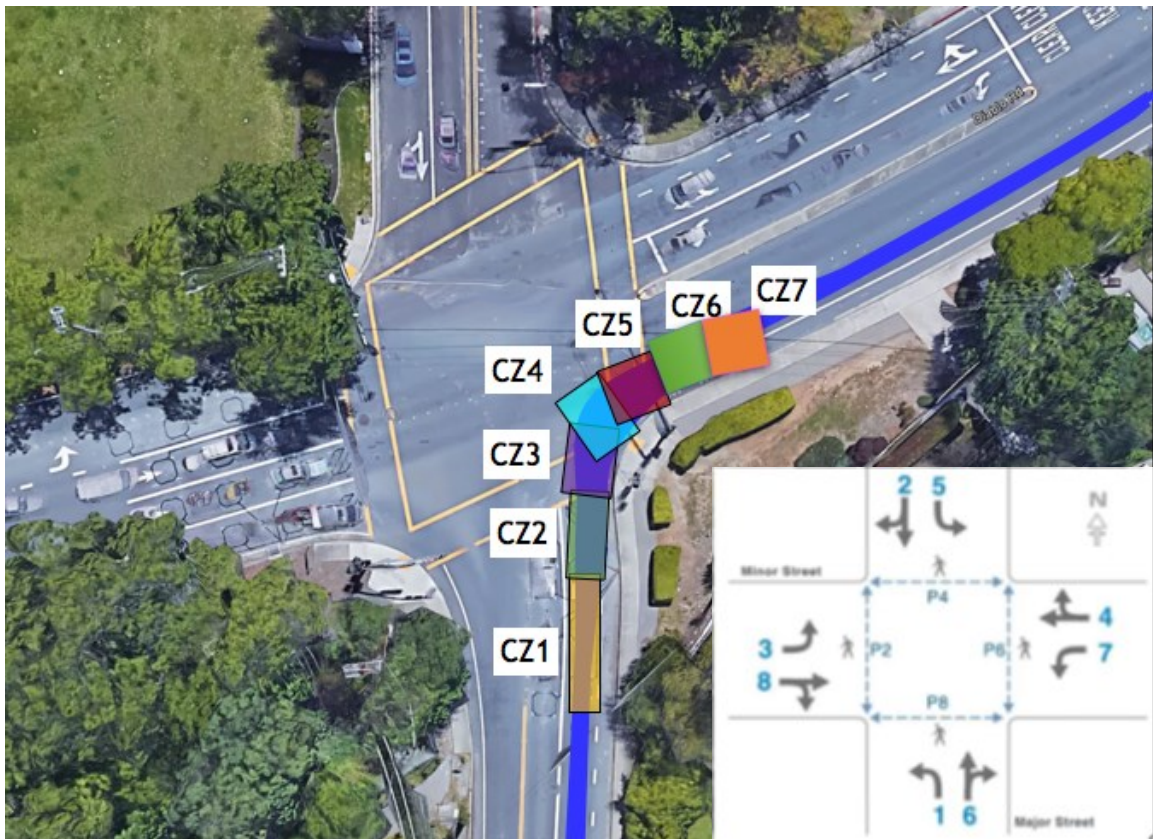
Στο παραπάνω σχήμα, επικεντρωνόμαστε στο όχημα που ανεβαίνει από το κάτω μέρος του σχήματος και πρόκειται να στρίψει δεξιά. Με λευκή γραμμή φαίνεται η τροχιά που θα ακολουθήσει ενώ με ροζ η όδευση. Η όδευση υπολογίζεται μαθηματικά ή εμπειρικά από GPS και κάμερες.

Στο σχήμα φαίνονται και άλλες 2 τροχιές οχημάτων (άσπρες), 3 δίκυκλων (μαύρες) και 2 πεζών (κίτρινες).



Εικόνα 52: Υπολογισμός οδεύσεων [98]

### 7.2.1.3. Βήμα 2: Προσδιορισμός Ζωνών διένεξης



Εικόνα 53: Υπολογισμός ζωνών διένεξης [98]

Στο παραπάνω σχήμα υπολογίζονται για την εν λόγω όδευση, οι ζώνες διένεξης.

Ζώνες διένεξης είναι οι περιοχές της όδευσης οι οποίες διασταυρώνονται με τις οδεύσεις άλλων πιθανών κινήσεων της διασταύρωσης.

Στο σχήμα οι ζώνες φαίνονται ξεχωριστές για να βοηθήσουν στην κατανόηση, αλλά στην πραγματικότητα επικαλύπτονται. Έτσι, έχουμε τις εξής ζώνες διένεξης:

- CZ1 Διένεξη με το ποδήλατο από κάτω
- CZ2 Διένεξη με πεζούς στην κάτω διάβαση (P8);
- CZ3 Διένεξη με όχημα που διέρχεται από αριστερά (Φ8);
- CZ4 Διένεξη με ποδήλατο που διέρχεται από αριστερά (Φ8);
- CZ5 Διένεξη με ποδήλατο που στρίβει αριστερά από πάνω (Φ5);
- CZ6 Διένεξη με όχημα που στρίβει αριστερά από πάνω (Φ5);
- CZ7 Διένεξη με πεζό στην δεξιά διάβαση (P6).

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι ζώνες έχουν υπολογισθεί από πριν, κάνοντας χρήση χαρτών και οδεύσεων.

#### **7.2.1.4. Βήμα 3: Επίλυση Διενέξεων**

Στο παράδειγμά μας η επίλυση των 7 διενέξεων γίνεται σε 3 υπο-βήματα.

Επίλυση διένεξης σημαίνει ότι το όχημα μπορεί να συμπεράνει εάν άλλος χρήστης πρόκειται να καταλάβει μια ζώνη κατά το ίδιο χρονικό διάστημα με αυτό, πράγμα που θα σήμαινε σύγκρουση.

Εάν το όχημα – ή γενικά ο χρήστης – αντιληφθεί κατάληψη ζώνης, τότε θα ακολουθήσει μια διαδικασία αποφυγής σύγκρουσης<sup>322</sup> (δηλαδή είτε θα επιβραδύνει είτε θα επιταχύνει, διατηρώντας όμως πάντα σταθερή την τροχιά) [101].

##### **7.2.1.4.1. Βήμα 3.1: Χρήση Φωτεινού Σηματοδότη**

Χρησιμοποιώντας την πληροφορία του φωτεινού σηματοδότη, κάποιες από τις 7 διενέξεις μπορούν να επιλυθούν βασιζόμενοι στο γεγονός ότι δύο κινήσεις που οδηγούν σε σύγκρουση δεν μπορεί να έχουν ταυτόχρονα πράσινη ένδειξη.

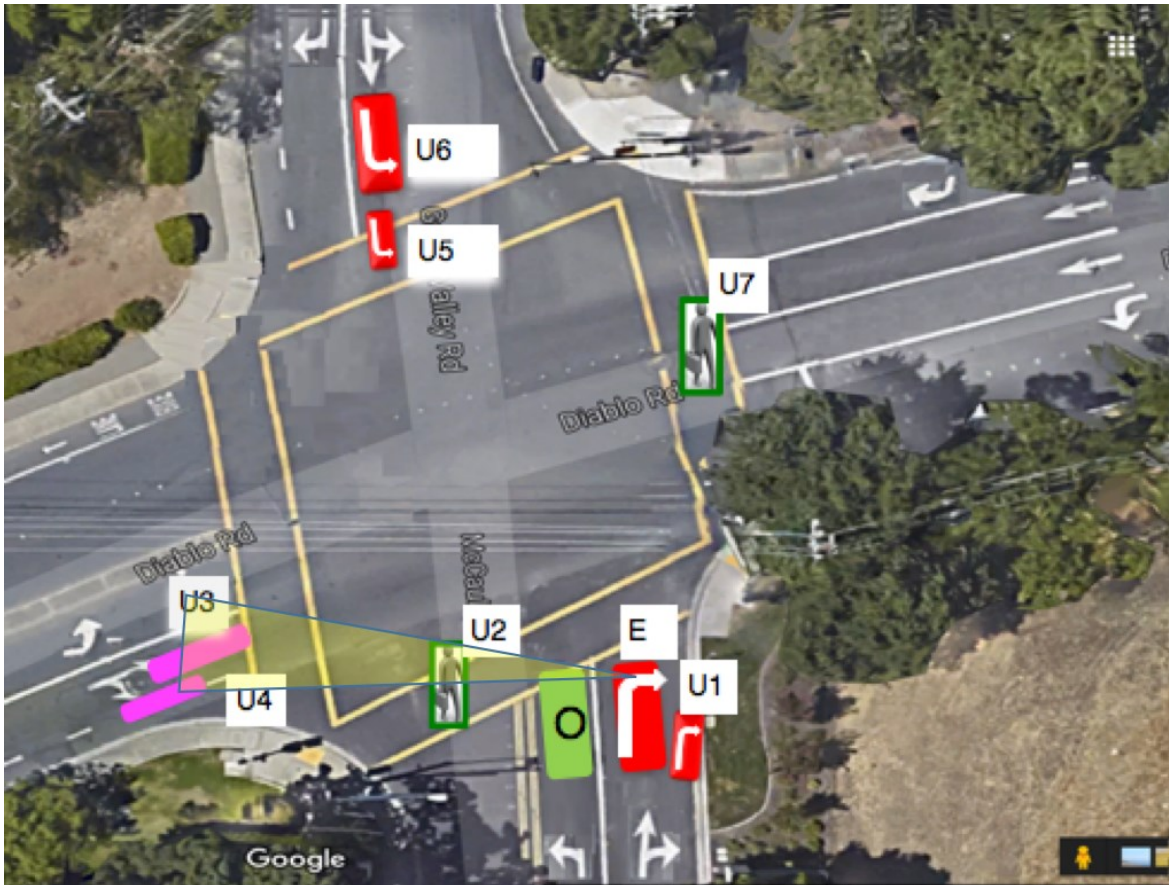
Επειδή η ένδειξη του σηματοδότη που βρίσκεται στην πορεία του εν λόγω οχήματος (E) μπορεί να είναι Κόκκινη ή Πράσινη η κίνηση είναι είτε RTOR (Right Turn On Red) είτε RTOG (Right Turn On Green).

- Εάν είναι RTOR: Οι φάσεις Φ6 και Φ1 έχουν κόκκινο όπως και η Ρ6. Οπότε η CZ7 δεν μπορεί να συμβεί, αλλά οι υπόλοιπες παραμένουν.
- Εάν είναι RTOG: Οι φάσεις Φ6 και Ρ6 έχουν πράσινο ενώ η Φ8 και Π8 κόκκινο.

Οπότε οι CZ2, CZ3 και CZ4 δεν μπορούν να συμβούν, αλλά οι υπόλοιπες παραμένουν.

---

<sup>322</sup> Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M., & Chandramouli, D. (2019, September): 5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology beyond 3GPP Release 15. *IEEE Access*, vol.7, pp.127639-127651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938>



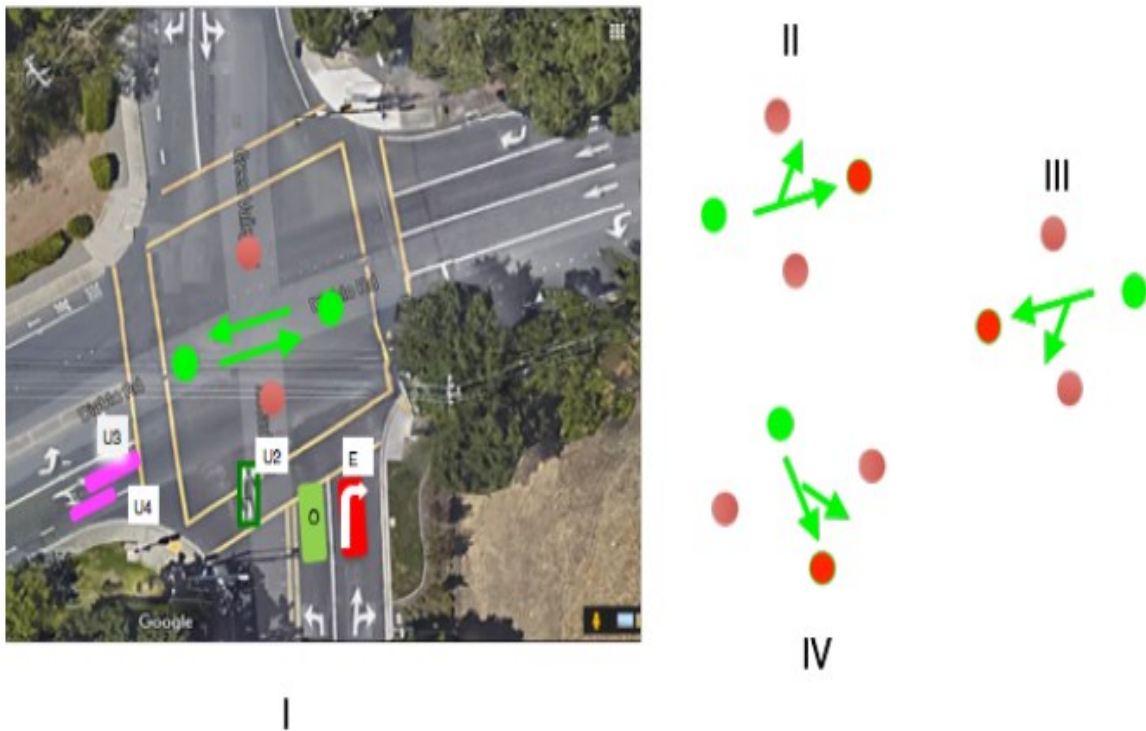
Εικόνα 54: Απεικόνιση χρηστών της διασταύρωσης και επικείμενων κινήσεων [98]

#### 7.2.1.4.2. Βήμα 3.2: Χρήση της Εικόνας της Διασταύρωσης

Το όχημα πρέπει να αποφασίσει από την εικόνα της διασταύρωσης σχετικά με το ποιες από τις υπόλοιπες διενέξεις μπορούν να επιλυθούν.

- Ε είναι το όχημα που θα κάνει δεξιά στροφή, ενώ U1, ..., U7 είναι άλλοι χρήστες, των οποίων η κίνηση έρχεται σε διένεξη με αυτήν του Ε.
- Τα U3, U6 είναι οχήματα, τα U1, U4 και U5 είναι ποδήλατα και οι U2, U7 είναι πεζοί.
- Το Ο είναι όχημα σταματημένο στην αριστερή λωρίδα και εμποδίζει το Ε να δει τα U2, U3, U4.
- Το Ε μπορεί να δει καθαρά τα U1, U5, U6 και U7, οπότε επιλύει τις CZ1, CZ5, CZ6, CZ7.
- Λόγω του Ο, οι CZ2, CZ3 και CZ4 παραμένουν.
- Εάν είναι RTOR: Τότε οι CZ2, CZ3, CZ4 παραμένουν.
- Εάν είναι RTOG: Τότε όλες οι διενέξεις έχουν επιλυθεί γιατί τα U2, U3, U4 δεν μπορούν να κινηθούν, οπότε το Ε εκτελεί με ασφάλεια τη δεξιά στροφή.

### 7.2.1.4.3. Βήμα 3.3: Χρήση Σήματος SPaT



Εικόνα 55: Επίλυση διενέξεων με τη χρήση του σήματος SPaT [98]

Το σήμα SPaT εκπέμπεται κάθε 100ms και περιέχει την πληροφορία των φωτεινών σηματοδοτών, όπως και τον χρόνο που θα αλλάξουν κατάσταση<sup>323</sup>.

- Εάν είμαστε στην περίπτωση RTOR και δεν μπορούν να επιλυθούν οι CZ2, CZ3, CZ4 λόγω του O, τότε το E βλέπει κόκκινο σηματοδότη αλλά δεν γνωρίζει ποια από τις 4 διαμορφώσεις είναι ενεργή. Την πληροφορία αυτή την μαθαίνει από το SPaT.
- Στις διαμορφώσεις I και II τα U2, U3, U4 μπορούν να κινηθούν, οπότε οι διενέξεις παραμένουν.
- Στη διαμόρφωση III μόνο το U2 μπορεί να κινηθεί, οπότε παραμένει μόνο η CZ2.
- Στη διαμόρφωση IV τα U2, U3 και U4 δεν μπορούν να κινηθούν, οπότε όλες οι διενέξεις επιλύονται και το E μπορεί να εκτελέσει τη δεξιά στροφή.
- Επειδή το σήμα SPaT περιέχει και τον χρόνο αλλαγής της φάσης της σηματοδότησης, το AV μπορεί να αποφασίσει να περιμένει έως ότου το φανάρι γίνει πράσινο και επομένως η κίνηση γίνει RTOG.
- Τα περισσότερα AVs προγραμματίζονται να αποφεύγουν τις RTOR στροφές<sup>324</sup>.

<sup>323</sup> Ibrahim, S., Kalathil, D., Sanchez, R.O., & Varaiya, P. (2019, July): Estimating Phase Duration for SPaT Messages. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.20, no.7, pp.2668-2676. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873150>

<sup>324</sup> Ackerman, E. (2017, March): How Drive.ai Is Mastering Autonomous Driving With Deep Learning. *IEEE Spectrum*. Available at: <https://spectrum.ieee.org/how-driveai-is-mastering-autonomous-driving-with-deep-learning>

- Τα αυτόνομα οχήματα έχουν πρόβλημα με τις μη προστατευμένες αριστερές στροφές (LTOR)<sup>325</sup>.

#### 7.2.1.5. Βήμα 4: Εντοπισμός Εμποδίων στις Τυφλές Ζώνες

Αυτό το βήμα απαιτείται όταν δεν έχουν επιλυθεί όλες οι διενέξεις και το όχημα αποφασίζει να εκτελέσει RTOG. Διακρίνονται τα ακόλουθα:

- Έστω διαμόρφωση I, οπότε για να συνεχίσει το κινούμενο όχημα του ενδιαφέροντός μας, θα πρέπει η διασταύρωση να το ενημερώσει ότι τα U2, U3, U4 δεν θα μετακινηθούν αντίστοιχα στις CZ2, CZ3, CZ4, πριν από το E.
- Τυφλή Ζώνη (“Blind Zone”) ορίζεται το τμήμα της όδευσης από το οποίο ο U<sub>i</sub> μπορεί να φτάσει στο CZ<sub>i</sub> σε χρόνο t, όπου t είναι ο χρόνος που θα κάνει το E για να διασχίσει την πιο απομακρυσμένη ζώνη διένεξης (CZ4).
- Η υποδομή θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται εάν οι τυφλές ζώνες καταλαμβάνονται από τους χρήστες U2, U3, U4.
- Εφόσον γίνεται αντιληπτή η απουσία αυτών των χρηστών, εκπέμπεται ένα μήνυμα Intersection Collision Avoidance (ICA). Εάν το όχημα E λάβει ένα τέτοιο μήνυμα, τότε εκτελεί τη στροφή. Στην αντίθετη περίπτωση, το όχημα περιμένει τον σηματοδότη να γίνει πράσινος.

#### 7.2.2. Παράδειγμα Σχεδίασης Έξυπνης Διασταύρωσης

Εδώ γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας αυτόματου υπολογισμού οδεύσεων, ζωνών διένεξης και τυφλών ζωνών<sup>326</sup>.

- Εισάγουμε έναν χάρτη από την βάση του OpenStreetMap. Ο χάρτης περιέχει τις λωρίδες κυκλοφορίας της διασταύρωσης.
- Από αυτές δημιουργούνται οι κεντρικές γραμμές των οδεύσεων και τοποθετούνται σε χάρτη Google Maps, όπως φαίνεται στην Εικόνα 56.
- Οι οδεύσεις προκύπτουν διαπλατώνοντας τις κεντρικές γραμμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 57.
- Οι διαφορετικές οδεύσεις παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα.
- Έχουν δημιουργηθεί οδεύσεις για ποδήλατα, πεζούς και τραμ.
- Εμφανίζονται οι ζώνες διένεξης που είναι στη διασταύρωση δύο οδεύσεων και μια τυφλή ζώνη (με μαύρο χρώμα).

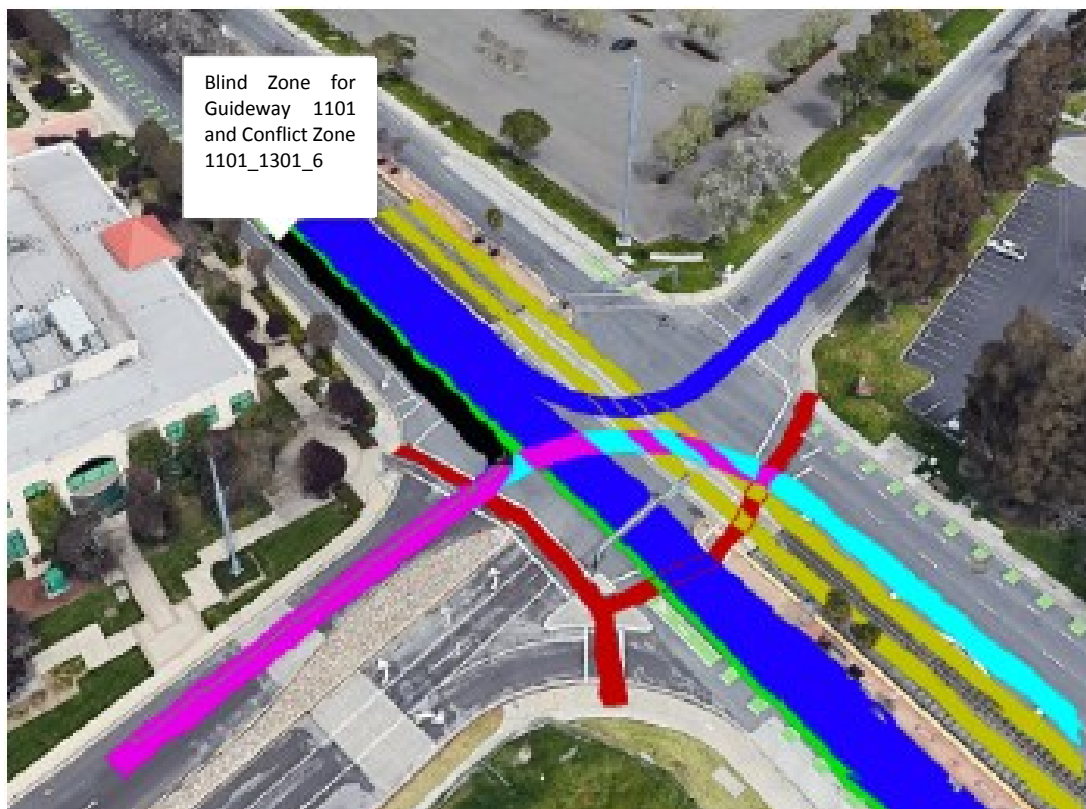
---

<sup>325</sup> Felton, R. (2018, August): *Google’s self-driving cars have trouble with basic driving tasks: Report*. Available at: <https://jalopnik.com/googles-self-driving-cars-have-trouble-with-basic-drivi-1828653280>.

<sup>326</sup> Muralidharan, A., Coogan, S., Flores, C., & Varaiya, P. (2016, July): Management of intersections with multi-modal high-resolution data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.68, pp.101-112. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.017>

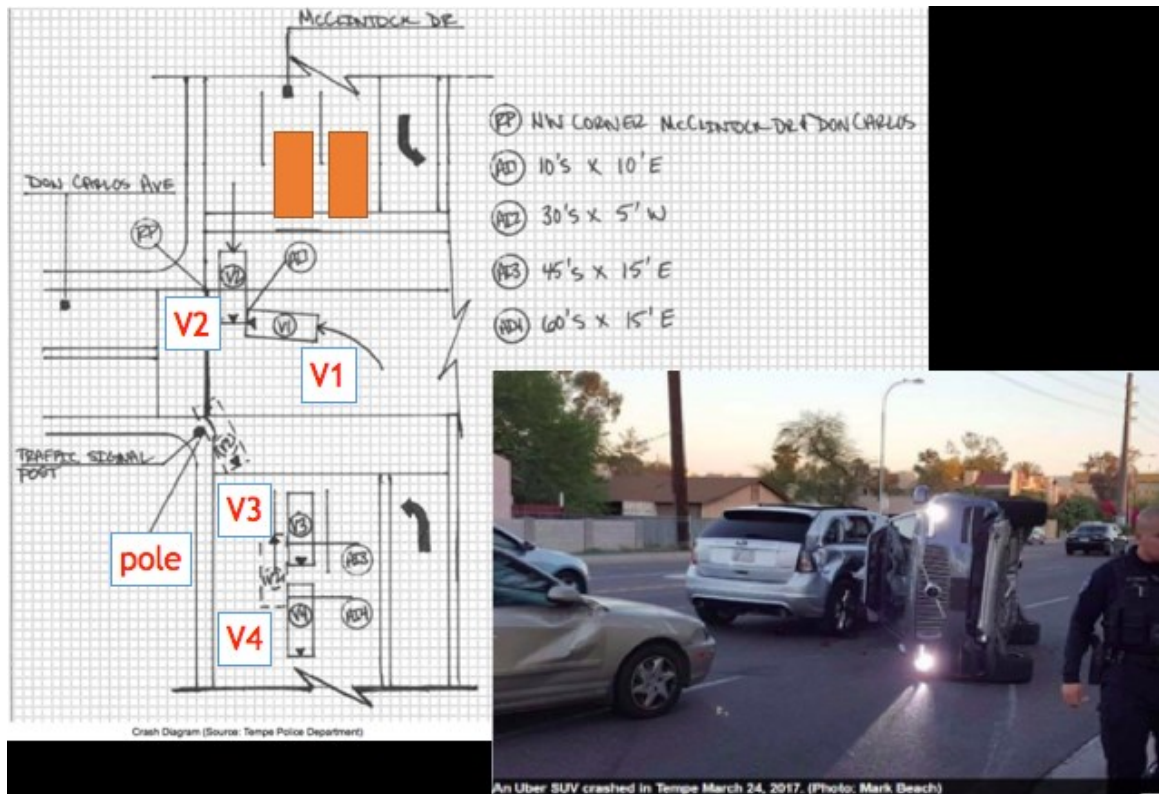


Εικόνα 56: Υπολογισμός κεντρικών γραμμών οδεύσεων [98]



Εικόνα 57: Υπολογισμός οδεύσεων με διαπλάτυνση των κεντρικών γραμμών [98]

### 7.2.3. Ανάλυση Πραγματικού Ατυχήματος



Εικόνα 58: Καταγραφή του ατυχήματος από την τροχαία<sup>327</sup>.

Το ατύχημα που περιγράφεται στη συνέχεια συνέβη την 24<sup>η</sup> Μαρτίου 2017 στη διασταύρωση των δρόμων S. McClintock Dr και E. Don Carlos Ave στην πόλη Τέμπε της πολιτείας Αριζόνα των ΗΠΑ.

Η αρχική πρόσκρουση ήταν μεταξύ δύο οχημάτων. Το πρώτο όχημα (V1) ήταν Honda CRV και το δεύτερο (V2) ήταν αυτόνομο Volvo SUV της Uber.

Στην Εικόνα 58 φαίνεται το έντυπο καταγραφής του συμβάντος από την αρμόδια τροχαία. Στη φωτογραφία, στο κάτω δεξί μέρος φαίνεται το V2 στο τέλος του περιστατικού. Χρονικά το συμβάν εξελίχθηκε ως εξής:

- Το όχημα V1 μπήκε στη διασταύρωση με πράσινο, επιχειρώντας αριστερή στροφή.
- Το όχημα V2 (αυτόνομο UBER) μπήκε με κίτρινο και επιχείρησε να διασχίσει τη διασταύρωση κινούμενο με 38 mph (με το όριο ταχύτητας να είναι 40 mph).
- Επήλθε σύγκρουση του V1 με το V2, μετά την οποία το V2 προσέκρουσε σε έναν στύλο στα πλάγια και στη συνέχεια προσέκρουσε στα V3 και V4, τα οποία ήταν σταματημένα στην 2η λωρίδα.

Πιθανές αιτίες για το ατύχημα:

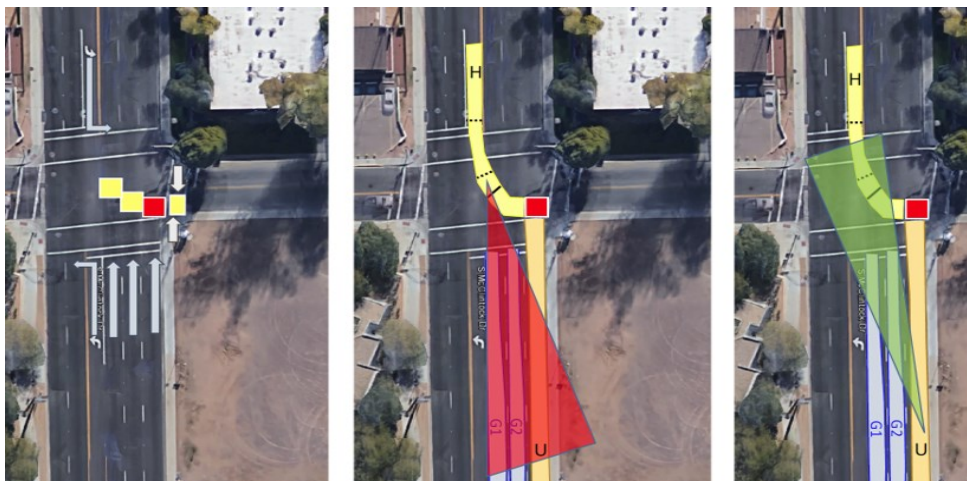
<sup>327</sup> EETimes (2017, March): *Police Report Untangles Uber Crash Mystery*. Available at: <https://www.eetimes.com/police-report-untangles-uber-crash-mystery/>



- (1) Το V2 δεν γνώριζε ότι επιτρέπεται η κίνηση του V1.
  - (2) Το V2 δεν μπορούσε να προβλέψει την αλλαγή σε κίτρινο.
  - (3) Το V2 δεν υπολόγισε ότι τα σταματημένα οχήματα στις διπλανές του λωρίδες (πορτοκαλί χρώμα) το εμπόδιζαν να αντιληφθεί την ύπαρξη του V1, πριν φτάσει σε απόσταση 3 m από την διασταύρωση.
  - (4) Το V1 δεν υπολόγισε ότι τα ίδια οχήματα το εμπόδιζαν να δει σε απόσταση μεγαλύτερη των 3 m στην λωρίδα 3, ενώ το V2 βρισκόταν σε απόσταση 15 m, κινούμενο με ταχύτητα 40 mph.
- Οι αιτίες (1) και (2) θα μπορούσαν να προληφθούν με τη μετάδοση του σήματος SPaT<sup>328</sup> [99].
  - Η αιτία (3) θα μπορούσε να προληφθεί με τον υπολογισμό της «τυφλής ζώνης» που δημιουργούσαν τα πορτοκαλί οχήματα, μαζί με ένα σήμα ICA (Intersection Collision Avoidance) από την υποδομή.
  - Η αιτία (4) είναι η δυσκολότερη να αναιρεθεί αλλά και σε αυτήν την περίπτωση το σήμα ICA<sup>329</sup> θα μπορούσε να προλάβει τη σύγκρουση [102].

Σημαντική παρατήρηση: Και οι τέσσερις αιτίες της σύγκρουσης οφείλονται στην απόφαση που θα πρέπει να ληφθεί με ελλιπή στοιχεία και είναι είτε «οπτιμιστική» (όδευση με κανονική ταχύτητα και διακινδύνευση ενός ατυχήματος) είτε «πεσιμιστική» (όδευση με αργή ταχύτητα ή στάση για την αποφυγή οποιουδήποτε ατυχήματος)<sup>330</sup>.

#### 7.2.4. Πρόληψη του Ατυχήματος



Εικόνα 59: Πρόληψη του ατυχήματος από μία έξυπνη διασταύρωση [98]

<sup>328</sup> Ibrahim, S., Kalathil, D., Sanchez, R. O., & Varaiya, P. (2019): Estimating Phase Duration for SPaT Messages. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.20, no.7, pp.2668–2676. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873150>

<sup>329</sup> Misener, J., Barnes, M., Chan, C.-Y., Cody, D., Dickey, S., Goodsell, R., Gordon, T., Kim, Z.W., et al. (2010, April): Cooperative Intersection Collision Avoidance System (CICAS): Signalized Left Turn Assist and Traffic Signal Adaptation. California PATH Research Report. UCB-ITS-PRR-2010-20.

<sup>330</sup> Medury, A., Yu, M., Grembek, O., Kurzhanskiy, A.A., Flores, C., and Varaiya, P. (2017): The disengagement dilemma of automated vehicles. In: *Proceedings of the 2017 ITS World Congress*, Montreal, Canada, 2017.

Εδώ θα δούμε το πώς μια έξυπνη διασταύρωση θα βοηθούσε στην αποτροπή ενός ατυχήματος.

**Στην Εικόνα 59 αριστερά** φαίνονται οι κινήσεις πέντε αυτοκινήτων και ενός πεζού που διασχίζει τη διάβαση δεξιά.

Η αριστερή στροφή του πάνω οχήματος διασχίζει 4 ζώνες διένεξης που φαίνονται με τετράγωνα. Η 3η ζώνη η οποία φαίνεται με κόκκινο χρώμα, είναι η ζώνη διένεξης με το όχημα κάτω δεξιά που κινείται ευθεία και με το οποίο έγινε η σύγκρουση.

Οι οδεύσεις των από κάτω προς τα πάνω κινούμενων οχημάτων ονομάζονται G1, G2, U ενώ του πάνω ονομάζεται ως H.

Η διασταύρωση του U με το H είναι η κόκκινη ζώνη διένεξης.

**Στην Εικόνα 59 στη μέση** φαίνεται ότι τα οχήματα στις G1 και G2 διακόπτουν το τρίγωνο του οπτικού πεδίου του H, το οποίο μπορεί να δει έως 50 ft εντός του U.

Έτσι η απόσταση εντός του U για 150 ft είναι ουσιαστικά μια «τυφλή ζώνη» για το H. Ο υπολογισμός αυτός στηρίζεται στο ότι το H μπορεί να σταματήσει σε 3 sec όπου το U θα έχει διανύσει 150 ft.

Ένας αισθητήρας τοποθετημένος στα 200 ft εντός του U θα ανίχνευε το διερχόμενο όχημα, οπότε η διασταύρωση θα εξέπεμπε σχετικό μήνυμα και το H θα σταματούσε. Αν το H δεν ήταν συνδεδεμένο θα έπρεπε το U να αποφύγει τη σύγκρουση.

**Στην Εικόνα 59 δεξιά** φαίνεται ότι τα σταματημένα οχήματα στις G1, G2 διακόπτουν το οπτικό πεδίο του U (πράσινο χρώμα). Έτσι το τμήμα από την μπάρα αναμονής έως την έξοδο της διασταύρωσης είναι ουσιαστικά μια «τυφλή ζώνη» για το U.

Το σήμα SPaT της διασταύρωσης θα ειδοποιούσε το U ότι σε λίγα δευτερόλεπτα το φανάρι θα γινόταν κίτρινο και συνεπώς το όχημα λαμβάνοντας υπόψη ότι έχει μειωμένο οπτικό πεδίο θα επιβράδυνε, θα αντιλαμβανόταν εγκαίρως το H και θα σταματούσε<sup>331</sup>.

Θα μπορούσε ακόμη, με τη χρήση δύο αισθητήρων διέλευσης στη γραμμή αναμονής και στο τέλος της αριστερής στροφής (του πάνω δρόμου) να γίνει αντιληπτό το εάν δεν υπήρχε κατάληψη από όχημα H και το U να εκτελούσε την στροφή. Στο σενάριό μας αυτό δεν ισχύει.

---

<sup>331</sup> Grembek, O., Kurzhanskiy, A., Medury, A., Varaiya, P., & Yu, M. (2019, May): Making intersections safer with I2V communication. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.102, pp.396-410. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.017>

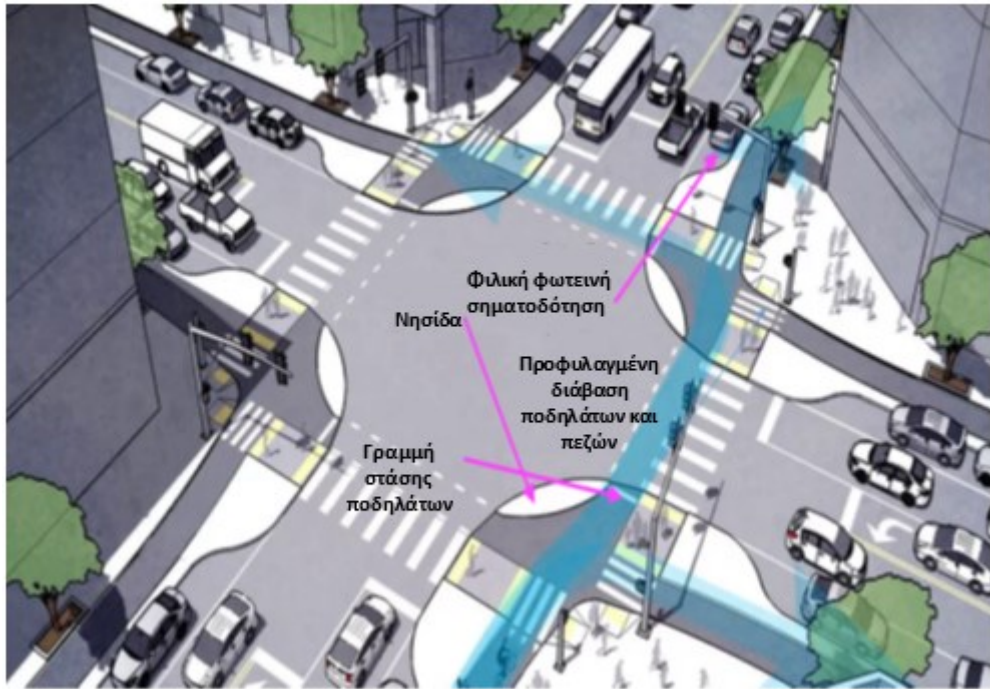
### 7.3. Προστατευμένη Διασταύρωση Ποδηλάτων

Προστατευμένη διασταύρωση ποδηλάτων είναι αυτή στην οποία έχουν γίνει φυσικές τροποποιήσεις για να διευκολύνουν κυρίως τους ποδηλάτες (αλλά παράλληλα ωφελούνται και οι πεζοί) και τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι [103]:

1. Εισαγωγή νησίδων για να κάνουν απότομη τη δεξιά στροφή των οχημάτων, ώστε να τα αναγκάσουν να επιβραδύνουν στα 10-20 Km/h κατά την εκτέλεσή της<sup>332</sup>.
2. Ειδικές λωρίδες διέλευσης της διασταύρωσης για ποδήλατα και παράλληλα για πεζούς, οι οποίες βρίσκονται στα μετόπισθεν αυτής. Ιδανικά θα πρέπει η εσοχή της διάβασης των ποδηλάτων (η οποία είναι η προκεχωρημένη εκ των δύο) να απέχει 5m – 6m από τη στροφή, ώστε τα οχήματα που εκτελούν δεξιά στροφή να την έχουν ολοκληρώσει και εάν αντιληφθούν την παρουσία ποδηλάτου (ή πεζού) να προλάβουν να σταματήσουν εγκαίρως.
3. Προωθημένη γραμμή στάσης για τα ποδήλατα, αρκετά μπροστά από αυτή των οχημάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη ορατότητα των ποδηλάτων από τα οχήματα που προτίθενται να στρίψουν.
4. Ειδική φωτεινή σήμανση ενεργοποιούμενη από τους ποδηλάτες. Η φωτεινή σήμανση μπορεί να είναι περισσότερο φιλική στους ποδηλάτες επιτρέποντας την ταυτόχρονη κίνησή τους σε όλες τις κατευθύνσεις της διασταύρωσης.
5. Προπορευόμενο χρονικά πράσινο σήμα για τα ποδήλατα και τους πεζούς. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται καλύτερη ορατότητα τους κατά την δεξιά στροφή των οχημάτων.
6. Περιορισμοί στις στροφές των οχημάτων, ενώ επιτρέπονται όλες για τα ποδήλατα.

---

<sup>332</sup> Deliali, K., Christofa, E., & Knodler, M. (2021, September): The role of protected intersections in improving bicycle safety and driver right-turning behavior. *Accident Analysis and Prevention*, vol.159, pp.106295-106298, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106295>



Εικόνα 60: Αναπαράσταση<sup>333</sup> προστατευμένης διασταύρωσης ποδηλάτων [103]

Η έξυπνη διασταύρωση μπορεί να λειτουργήσει ως μια περιορισμένη μεν αλλά ευέλικτη προστατευμένη διασταύρωση ποδηλάτων.

Η απλούστερη μέθοδος επικοινωνίας της υποδομής με τους πεζούς και τους ποδηλάτες είναι μέσω του κινητού τους τηλεφώνου με τη χρήση κατάλληλης εφαρμογής. Μπορούν, δηλαδή, αυτοί να διαθέτουν εφαρμογές στα κινητά τους που πληροφορούν την υποδομή για τη θέση και την κατεύθυνσή τους.

Η υποδομή θα προσάρμοζε κατάλληλα τη σηματοδότηση και με τα σήματα SPaTs θα μπορούσαν να αποστέλλονται ειδοποιήσεις στους ποδηλάτες για να επιταχύνουν ή για να επιβραδύνουν, με σκοπό την αποφυγή άσκοπης στάσης στα οδικά φανάρια.

Η έξυπνη διασταύρωση θα επέστρεφε πληροφορίες ή/και θα χρησιμοποιούσε αυτή την παρουσία του τηλεφώνου (ως μέσο ανίχνευσης πεζού ή ποδηλάτη) για να ρυθμίσει τον χρόνο των σηματοδοτών.

Ήδη έχουν παρουσιαστεί συστήματα που έχουν υλοποιήσει τέτοιες εφαρμογές<sup>334</sup>.

Μια τέτοια εφαρμογή ενεργοποιείται με αυτόματο τρόπο, με τη διέλευση του χρήστη από ένα χωρικό όριο γύρω από τη διασταύρωση κάνοντας χρήση του GPS και ειδικού αλγορίθμου προσέγγισης και δεν απαιτεί από αυτόν οποιαδήποτε επιπλέον ενέργεια.

<sup>333</sup> Falbo, N. (2015): *Protected Intersections for Bicyclists*. Available at: <https://vimeo.com/86721046>

<sup>334</sup> Peek Traffic (2022): *Smart mobility services for pedestrians & cyclists*. Available at: <https://www.peektraffic.eu/what-we-do/smart-mobility-services-for-pedestrians-cyclists/>

Σε κάποιους χρήστες (πεζοί ή ποδηλάτες) που έχουν λάβει άδεια προτεραιότητας (από τις αρμόδιες αρχές) η υποδομή εξασφαλίζει την προτεραιότητα αυτή καθόσον πλησιάζουν στη διασταύρωση, λιγοστεύοντας έτσι τις στάσεις και τις καθυστερήσεις.

Άνθρωποι με κινητικά προβλήματα που απαιτούν περισσότερο χρόνο για τη διέλευση της διασταύρωσης, έχοντας την εφαρμογή στο κινητό τους, δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα γιατί η εφαρμογή ειδοποιεί την υποδομή και αυτή εξασφαλίζει την επέκταση του χρόνου του πράσινου σήματος.

Ομοίως, όταν πλησιάζει ποδηλάτης – ή ομάδα από ποδηλάτες – το σύστημα μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να τους διασφαλίζει ασφαλές και γρήγορο πέρασμα είτε με επέκταση του χρόνου του πράσινου ώστε να προλάβει(-ουν) να περάσει(-ουν) είτε με πιο γρήγορη εναλλαγή σε πράσινο ώστε να μην σταματήσει(-ουν).

Σε όλες τις περιπτώσεις η υποδομή έχει ενημερωθεί για την ύπαρξη «ευάλωτων χρηστών» (Vulnerable Road Users - VRUs), ενημερώνει όλα τα υπόλοιπα συστήματα και μέσω αυτών ενημερώνει και τους υπόλοιπους χρήστες της διασταύρωσης (με V2X), ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια κατά την διέλευσή τους.

Στην αντίθετη κατεύθυνση η υποδομή ενημερώνει με κατάλληλο μήνυμα τους ευάλωτους χρήστες για πιθανό κίνδυνο που διαφαίνεται από όχημα το οποίο προσεγγίζει την διασταύρωση<sup>335</sup>.

#### 7.4. Συνοπτικά Χαρακτηριστικά της Έξυπνης Διασταύρωσης

Ανακεφαλαιώνοντας, η έξυπνη διασταύρωση που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό διαθέτει 4 δυνατότητες<sup>336</sup>:

- Έναν χάρτη GIS με όλες τις λωρίδες, τις γραμμές αναμονής και τις επιτρεπόμενες κινήσεις. Ένας αλγόριθμος δημιουργεί όλες τις οδεύσεις, τις ζώνες διένευσης και υπολογίζει τις τυφλές ζώνες.
- Ιστορικά αλλά και RT δεδομένα της οδικής σηματοδότησης καθώς και το αντίστοιχο πλάνο χρονοπρογραμματισμού, ώστε να μπορεί να εξαχθεί ακριβές συμπέρασμα σχετικά με τη διάρκεια της παρούσας φάσης (τα δεδομένα φάσης μπορεί να λαμβάνονται και από τον ελεγκτή της διασταύρωσης<sup>337</sup>). Αυτές οι πληροφορίες χρειάζονται για τον υπολογισμό του SPaT.

---

<sup>335</sup> USA Department of Transportation: *VS12: Pedestrian and Cyclist Safety. ARC-IT 9.0*. Available at: <https://www.arc-it.net/html/servicepackages/sp50.html>

<sup>336</sup> Grembek, O., Kurzhanskiy, A., Medury, A., Varaiya, P., & Yu, M. (2019, May): Making intersections safer with I2V communication. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.102, pp.396-410. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.017>

<sup>337</sup> Ibrahim, S., Kalathil, D., Sanchez, R. O., & Varaiya, P. (2019, July): Estimating Phase Duration for SPaT Messages. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.20, no.7, pp.2668–2676. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873150>

## Ευφυείς Οδικές Διασταυρώσεις με χρήση V2X

- Αισθητήρες εγκατεστημένους σε στρατηγικές θέσεις κατά μήκος των οδούσεων και των ζωνών διένεξης, ώστε να αντιλαμβάνονται εάν μια τυφλή ζώνη είναι κατειλημμένη.
- Δυνατότητα αναμετάδοσης του SPaT και του σήματος κατάληψης τυφλής ζώνης τόσο προς τους χρήστες όσο και προς τα AVs.

## 8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη διερεύνηση διαφόρων θεμάτων που αφορούν στην ανάπτυξη των ευφυών οδικών διασταυρώσεων, μέσα από τη χρήση εφαρμογών επικοινωνίας Vehicle-to-Everything (V2X), υπό το πλαίσιο δράσεων του 5G.

Η εργασία σκοπεύει στην ανάδειξη του ρόλου που καλούνται να διαδραματίσουν οι ευφυείς διασταυρώσεις στο περιβάλλον των σύγχρονων «έξυπνων πόλεων» σε συνδυασμό με διαφαινόμενες καινοτόμες λύσεις για αυτόνομη οδήγηση.

Η προσέγγιση στο εν λόγω αντικείμενο δεν θα μπορούσε να γίνει παραβλέποντας την τεχνολογική εξέλιξη που συντελείται αυτή τη στιγμή στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, και συγκεκριμένα με την 5<sup>η</sup> γενιά αυτών γνωστή ως 5G.

Μετά την περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών του συστήματος επικοινωνιών 5G γίνεται περιγραφή των υπηρεσιών που αυτό θα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει και τα κύρια σενάρια χρήσης του σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R M.2083-0 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU).

Βάσει αυτής, τίθενται απαιτήσεις του συστήματος 5G οι οποίες καλύπτουν τρεις γενικές κατηγορίες υπηρεσιών (ήτοι: eMBB, URLLC και mMTC), σύμφωνα με τις αναμενόμενες εξελίξεις της αγοράς και αναλύονται οι διαφορετικές απαιτήσεις καθεμιάς από αυτές.

Αναλύονται οι κύριες τεχνικές προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν στα σχετικά σενάρια αυτά και οι οποίες πολλές φορές είναι θέτουν αντικρουόμενες απαιτήσεις. Τέτοιες απαιτήσεις είναι π.χ. η ταχύτητα (speed), η λανθάνουσα καθυστέρηση (latency), η πυκνότητα των συσκευών, ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων (data rate) ανά χρήστη, η υψηλή κινητικότητα (mobility) των συνδεδεμένων συσκευών, η διαθεσιμότητα (availability) και αξιοπιστία (resilience), το κόστος των συσκευών και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους.

Αναφέρονται οι τεχνολογικές λύσεις που προτείνονται για την κάλυψη συναφών απαιτήσεων, όπως είναι: (α) η περίπτωση Multi-Access Edge Computing (MEC) που μεταφέρει μέρος του υπολογιστικού και τηλεπικοινωνιακού φόρτου πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, (β) η περίπτωση Network Function Virtualisation (NFV) που μέσα από την εικονικοποίηση των λειτουργιών των δικτύων προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα, (γ) το Software Defined Network (SDN) το οποίο προσφέρει ευελιξία για τον καθορισμό του δικτύου δια του λογισμικού, και τέλος (δ) η περίπτωση Network and Service Management (NSM) που αφορά στον αυτοματισμό των δικτύων και των υπηρεσιών και που είναι δυνατόν να προσφερθεί συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω με την Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και τη Μηχανική Μάθηση (ML).

Ένα από τα σημαντικά έργα για τον έλεγχο των δυνατοτήτων και για την επίλυση των προβλημάτων χρήσης των σεναρίων 5G αναφορικά με τα αυτόνομα οχήματα και τη διαλειτουργικότητά τους με την υποκείμενη τηλεπικοινωνιακή υποδομή των οδικών δικτύων, είναι το ερευνητικό πρόγραμμα 5G-DRIVE το οποίο αποτελεί μια κοινή προσπάθεια Ε.Ε. και Κίνας. Στην εργασία περιγράφεται το αντικείμενο του έργου 5G-DRIVE και στο Παράρτημα Α γίνεται αναφορά στα κοινά σενάρια χρήσης καθώς επίσης και στις δοκιμές που έλαβαν χώρα.

Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά και συναφή σενάρια χρήσης του «διαδόχου» συστήματος που θα επικρατήσει μετά το 2030 και που θα είναι το 6G, το οποίο ήδη αποτελεί αντικείμενο επενδύσεων τόσο από εταιρίες όσο και από κρατικές οντότητες.

Στη συνέχεια, και αφού τεκμηριωθεί η σημασία των συστημάτων μεταφορών για τη σύγχρονη κοινωνία παρατίθεται η εξέλιξη των επικοινωνιακών συστημάτων των σύγχρονων οχημάτων. Τα συστήματα αυτά εξασφαλίζουν την ανταλλαγή δεδομένων είτε με άλλα οχήματα (V2V) είτε με την υποδομή (V2I) είτε με τους πεζούς (V2P) ή γενικά με οτιδήποτε (V2X).

Το γεγονός ότι η πλειονότητα των σοβαρών τραυματισμών (και θανάτων) συμβαίνουν κυρίως στις αστικές περιοχές ενώ η τάση αστυφιλίας βαίνει ανοδική, καταδεικνύει την ανάγκη – ειδικά στις πόλεις – ώστε να υπάρξει ανάπτυξη έξυπνων οδικών αρτηριών (Smart Roadways) και έξυπνου συστήματος μεταφορών (Intelligent Transportation System).

Ανάλογα με τα συστήματα υποβοήθησης του οδηγού και επικοινωνιών που διαθέτουν τα σύγχρονα οχήματα, τα διακρίνουμε σε Συνδεδεμένα Οχήματα (CVs), σε Αυτόνομα Οχήματα (AVs) και στον συνδυασμό αυτών των δύο (δηλαδή στα Αυτόνομα Διασυνδεδεμένα Οχήματα (CAVs)). Τα αυτόνομα οχήματα κατατάσσονται αναλόγως των χαρακτηριστικών τους σε 6 επίπεδα, σύμφωνα με την Society of Automotive Engineers (SAE).

Μία σοβαρή προσθήκη στα συστήματα υποβοήθησης του οδηγού από την πλευρά της υποδομής είναι η προσθήκη αισθητήρων στις διασταυρώσεις (με τη χρήση LiDAR, ραντάρ και καμερών) για τη μετάδοση χρήσιμων πληροφοριών στα διερχόμενα οχήματα, τόσο για αύξηση της ασφάλειας όσο και για τη ρύθμιση της κυκλοφορίας.

Ένας από τους τρεις τομείς που χαρακτηρίζουν τις «έξυπνες πόλεις» όπως ορίζονται από την ITU-T είναι οι μεταφορές (οι άλλοι δύο είναι η υγεία και η διαβίωση). Οι «έξυπνες μεταφορές» αναφέρονται εκτός από τα «έξυπνα αυτοκίνητα» και στους «έξυπνους δρόμους». Στην παρούσα εργασία αναλύονται οι προσπάθειες κατασκευής τέτοιων «έξυπνων δρόμων» που «συσσωρεύουν ενέργεια», «παράγουν μουσική», «ζυγίζουν αυτόματα τα οχήματα εν κινήσει», «φορτίζουν τα ηλεκτρικά οχήματα», «διαθέτουν έξυπνη σήμανση», «διαθέτουν έξυπνο εντοπισμό παραβάσεων», «διαθέτουν έξυπνο φωτισμό» κ.ά. Το πλέον όμως σημαντικό χαρακτηριστικό για έναν «έξυπνο δρόμο» είναι το να διαθέτει «έξυπνες διασταυρώσεις».

Από την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών (δεκαετία 1970) έως και σήμερα έχουν κάνει την εμφάνισή τους συστήματα διαχείρισης των διασταυρώσεων, εκμεταλλεζόμενα παράλληλα και τις δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνιών της εκάστοτε χρονικής περιόδου. Στην εργασία γίνεται ιστορική αναδρομή στα συστήματα αυτά, καλύπτοντας έως και τα πλέον πρόσφατα, όπως χαρακτηριστικά τη διαχείριση διασταύρωσης με χρήση EoT και Blockchain και τη διαχείριση διασταυρώσεων για την εξυπηρέτηση ομάδων οχημάτων.

Ένα πολύ διαδεδομένο και αρκετά υποσχόμενο σύστημα υποβοήθησης τόσο των ανθρώπων οδηγών αλλά και των αυτόνομων οχημάτων είναι το σύστημα GLOSA (Green Light Optimized Speed Advisory), το οποίο υπολογίζει – ή παρέχει τα απαραίτητα



στοιχεία ώστε το όχημα να υπολογίσει – τη βέλτιστη ταχύτητα προσέγγισης στην επερχόμενη διασταύρωση για να βρουν τον φωτεινό σηματοδότη με πράσινο φως.

Τα συστήματα GLOSA διαλειτουργούν καλά με τα συστήματα ελέγχου της διασταύρωσης σταθερού και προκαθορισμένου χρονισμού (fixed-time), ενώ πλέον η τεχνολογία επιτρέπει την εξίσου καλή λειτουργία τους και με τα συστήματα ελέγχου με μεταβλητό χρονισμό, προσαρμοζόμενο στην κυκλοφορία. Με τη χρήση του συστήματος επιτυγχάνεται μείωση των χρόνων στάσης, βελτίωση της ρευστότητας της κίνησης, αύξηση της ασφάλειας λόγω της παροχής δεδομένων πρόβλεψης, μείωση των εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub>, μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και μείωση του συνολικού χρόνου αναμονής κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού.

Στη συνέχεια η εργασία ακολουθεί μια σε βάθος ανάλυση ενός συστήματος έξυπνης διασταύρωσης, το οποίο δύναται να ανιχνεύει και να επιλύει τις πιθανές διενέξεις μεταξύ όλων των χρηστών της διασταύρωσης (οχημάτων, ποδηλάτων, πεζών). Η μέθοδος που αξιολογείται είναι τεσσάρων βημάτων. Στο 1<sup>ο</sup> βήμα γίνεται χρήση των γεωγραφικών δεδομένων της διασταύρωσης, κωδικοποιούνται οι φάσεις (πιθανές κινήσεις) των χρηστών και χαράσσονται οι οδεύσεις (όλες οι πιθανές διαδρομές των χρηστών). Στο 2<sup>ο</sup> βήμα υπολογίζονται για κάθε όδευση, οι ζώνες διένεξης, δηλαδή οι περιοχές της όδευσης οι οποίες διασταυρώνονται με άλλες οδεύσεις (άλλων πιθανών κινήσεων των χρηστών της διασταύρωσης). Στο 3<sup>ο</sup> βήμα γίνεται η επίλυση των πιθανών διενέξεων με χρήση του φωτεινού σηματοδότη, με τη χρήση της εικόνας της διασταύρωσης που αποκτά το όχημα μέσω των αισθητήρων του και εν τέλει με τη χρήση του σήματος SPaT που εκπέμπει η υποδομή της έξυπνης διασταύρωσης. Στο 4<sup>ο</sup> βήμα γίνεται επίλυση των εναπομενουσών διενέξεων, με την εκπομπή σήματος προειδοποίησης «κατάληψης τυφλής ζώνης» που και πάλι εκπέμπει η υποδομή, δια της χρήσης ειδικών αισθητήρων. Η υποδομή μπορεί επίσης να εκπέμπει προειδοποίηση παραβίασης ερυθρού σηματοδότη ή ύπαρξης ευάλωτου χρήστη (VRU) ώστε να αποφευχθεί πιθανό ατύχημα. Με βάση την παραπάνω προσέγγιση γίνεται ανάλυση ενός πραγματικού ατυχήματος και με το πώς αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί, τεκμηριώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Η έξυπνη διασταύρωση μπορεί να υποκαταστήσει σε μεγάλο βαθμό την «προστατευμένη διασταύρωση ποδηλάτων» με πολύ μικρότερο κόστος και χωρίς μόνιμες δομικές παρεμβάσεις.

Συνοψίζοντας, τα οφέλη από τα συστήματα έξυπνης διασταύρωσης είναι άμεσα, πολλαπλά και καθολικά, αφού με την επικοινωνία μεταξύ έξυπνων τηλεφώνων και υποδομής, η έξυπνη διασταύρωση μπορεί να προσφέρει ευκολία και ασφάλεια σε ανθρώπους με κινητικά προβλήματα, ή προτεραιότητα σε οχήματα που την χρειάζονται ή την δικαιούνται, ή εύκολη και ασφαλή διέλευση σε ποδηλάτες και ευάλωτους χρήστες και, αντίστροφα, να προειδοποιήσει για επερχόμενο κίνδυνο από όχημα το οποίο προσεγγίζει την διασταύρωση.

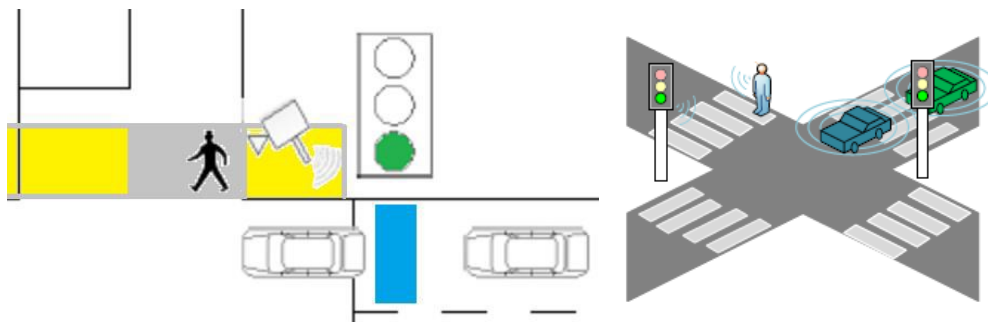
## 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Η ΕΥΦΥΗΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΣΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ

### ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ 5G-DRIVE

Το τρέχον Παράρτημα έχει αμιγώς την έννοια πληροφοριακού χαρακτήρα και επιδιώκει να παραθέσει ορισμένα ενδεικτικά στοιχεία από το πλαίσιο των δράσεων του ερευνητικού προγράμματος 5G-DRIVE<sup>338</sup>, το οποίο εισήγαγε ένα κοινό συνεργατικό πλαίσιο μεταξύ της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Κίνας.

Η περίπτωση της έξυπνης διασταύρωσης στο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα 5G-DRIVE [2] ασχολείται με την ασφάλεια, εστιάζοντας στην ανίχνευση καταστάσεων από την υποδομή, οι οποίες είναι δύσκολο να γίνουν αντιληπτές από τα ίδια τα οχήματα.

Ένα καλό παράδειγμα είναι η κατάσταση στην οποία ένα όχημα θέλει να εκτελέσει δεξιά στροφή ενώ παράλληλα οι VRUs (Vulnerable Road Users – Τρωτοί χρήστες του Δρόμου) όπως π.χ. οι πεζοί έχουν επίσης και δικαίωμα διέλευσης (επιτρεπτή σήμανση φαναριού σε κατάσταση «πράσινο» και για μηχανοκίνητη κίνηση). Αυτή η κατάσταση απεικονίζεται στην Εικόνα 61.



Εικόνα 61: Το όχημα εκτελεί δεξιά στροφή ενώ ένας πεζός διασχίζει την διάβαση [2]

Όταν ένας πεζός ανιχνεύεται στη διάβαση (όπως στην γκρι περιοχή του σχήματος) ένα σήμα DENM (Decentralised Environmental Notification Message)<sup>339,340</sup> πρέπει να μεταδοθεί από τον αισθητήρα της διασταύρωσης μέσω της Παρόδιας Μονάδας (Road Side Unit - RSU) και η υποδομή διαχείρισης του οδικού δικτύου θα το αναμεταδώσει στη συνέχεια σε όλα τα οχήματα που προσεγγίζουν στην περιοχή του σηματοδότη ρύθμισης της οδικής κίνησης.

<sup>338</sup> 5G-DRIVE Project: “5G HarmoniseD Research and Trials for serVice Evolution between EU and China”, Grant Agreement No.814956. Για περισσότερα στοιχεία βλέπε: <https://5g-drive.eu/>

<sup>339</sup> Το μήνυμα DENM ορίζεται στο ETSI EN 302 637-3, περιέχει πληροφορίες σχετικά με κάποιο επικίνδυνο συμβάν ή σημείο του δρόμου και περιλαμβάνει γεωγραφική αναφορά (συσχετιζόμενη με το μήνυμα MAP) ώστε τα οχήματα να μπορούν να αντιληφθούν εάν προσεγγίζουν στην εν λόγω «επικίνδυνη» περιοχή και για να προειδοποιηθεί ο οδηγός.

<sup>340</sup> European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2014-19). ETSI EN 302 637-2 V1.4.1 (2019-04): “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service”. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/30263703/01.02.01\\_30/en\\_30263703v010201v.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263703/01.02.01_30/en_30263703v010201v.pdf)

Στις κίτρινες περιοχές, με δεδομένη την κίνηση των πεζών προς τη διασταύρωση, η υποδομή πρέπει να στείλει ένα μήνυμα Collective Perception Message (CPM)<sup>341,342</sup>. Αυτό χρησιμοποιείται για να προειδοποιηθούν τα οχήματα για την πιθανότητα σύγκρουσης και έτσι να αποφευχθούν τα απότομα φρεναρίσματα.

Στο πλαίσιο του προγράμματος 5G-DRIVE δοκιμάζονται διάφορα μηνύματα DENM με διαφορετικό μέγεθος ώστε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα σε σχέση με την απόδοση της επικοινωνίας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σενάρια δεν εστιάζουν στη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής, αλλά στην απόδοση της εφαρμογής V2X και ότι οι καταστάσεις στις κλίνες δοκιμών εξομοιώνονται ώστε να μην θέσουν τους πραγματικούς πεζούς σε κίνδυνο αλλά να διερευνηθούν οι απαιτήσεις και η αποδοτικότητα της επικοινωνίας σύμφωνα με το σενάριο προσέγγισης των οχημάτων.

Δεδομένου ότι το 5G-DRIVE αποδίδει ιδιαίτερη μέριμνα σε θέματα ασφάλειας, η καθυστέρηση (latency) της επικοινωνίας V2X και η εξασφάλιση παραλαβής των μηνυμάτων είναι πολύ κρίσιμα ζητήματα. Ο χρόνος καθυστέρησης σε παλαιότερα δίκτυα 3G διαπιστώθηκε ότι έφτανε τα 25 δευτερόλεπτα, κάτι που είναι απαράδεκτο για αυτές τις εφαρμογές. Η μέγιστη αποδεκτή καθυστέρηση μετάδοσης δύναται να είναι 100 ms για τα μηνύματα που αφορούν στην ασφάλεια της διασταύρωσης (DENM) και 1000 ms για τα μηνύματα που αποσκοπούν στην πρόληψη ατυχήματος (CPM).

### A.1. Βασικοί Δείκτες Απόδοσης - KPIs

Οι βασικοί δείκτες (Key Performance Indicators) σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοιοι με αυτούς του συστήματος GLOSA. Εντούτοις, λόγω της κρισιμότητας της ασφάλειας και της μεταβλητότητας που παρατηρήθηκε σε προηγούμενες δοκιμές, απαιτούνται περισσότεροι δείκτες για να επιτευχθεί μια περισσότερο προβλέψιμη καθυστέρηση. Προτείνονται λοιπόν οι ακόλουθες θεωρήσεις:

- **Ρυθμός Πακετικών Σφαλμάτων (Packet Error Rate - PER):** Πρόκειται για το ποσοστό των πακέτων που δεν ελήφθησαν επιτυχώς (από την Εποχούμενη Μονάδα / On Board Unit - OBU) προς τον συνολικό αριθμό των πακέτων που εστάλησαν (από την RSU).

---

<sup>341</sup> Τα μηνύματα CPM χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων σχετικά με τοπικά και γεωγραφικά εντοπισμένα εμπόδια κυκλοφορίας ώστε να επιτευχθεί βελτίωση της επίγνωσης της τρέχουσας κατάστασης. Αξιοποιώντας τις αυξανόμενες δυνατότητες ανίχνευσης και επικοινωνίας των μελλοντικών οχημάτων, το CPM θεωρείται από την αυτοκινητοβιομηχανία ως ένας βασικός παράγοντας για συνεργατικές εφαρμογές αυτοματοποιημένης οδήγησης. Τα μηνύματα CPM όπως προδιαγράφονται στο ETSI TR 103 562 μεταδίδουν αφηρημένες αναπαραστάσεις των ανιχνευόμενων εμποδίων αντί για τα πρωταρχικά δεδομένα των αισθητήρων που εξαρτώνται από τον τύπο και τον κατασκευαστή τους.

<sup>342</sup> European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2019): ETSI TR 103 562 V0.0.15 (2019-10): "Intelligent Transport System (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective -Perception Service (CPS)".

- **Λανθάνουσα καθυστέρηση (Latency):** Είναι η καθυστέρηση που εισάγει το επικοινωνιακό δίκτυο από τη στιγμή εκπομπής του πακέτου από την RSU έως τη λήψη του από την OBU (σε ms).
- **Σύνολο ενεργών σταθμών (Total active stations):** Αυτός ο δείκτης προσδιορίζει πόσοι από τους λοιπούς σταθμούς ήταν ταυτόχρονα ενεργοί στο εύρος επικοινωνίας του υπό εξέταση αντικειμένου.
- **Συνολικό φορτίο καναλιού σε Mbps (Total channel load in Mbps):** Το συνολικό φορτίο του καναλιού συνιστά σημαντικό δείκτη γιατί αποτελεί ένδειξη αναφορικά με το πόσες παρεμβολές μπορούν να αναμένονται.
- **Συνολικά μηνύματα ανά δευτερόλεπτο στο κανάλι (Total messages per seconds on channel):** Ένας άλλος χρήστης που χρησιμοποιεί φορτίο 1 Mbps έχει πολύ λιγότερες πιθανότητες σύγκρουσης πακέτων από εκατό χρήστες που εκπέμπουν με ρυθμό 10 kbps.

## A.2. Κοινοί Βασικοί Δείκτες Απόδοσης

Η παροχή κάποιων κοινών βασικών δεικτών απόδοσης για όλες τις περιπτώσεις συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα<sup>343, 344</sup>:

ΔΟΚΙΜΗ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	ΒΑΣΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ
DENM V2I	5/10/15/20 DENM stations 50/100/150/200 CAM stations	PER < 1% Latency < 100 ms Active stations >=300
GLOSA V2N	100/200/300/400/500 CAM stations	PER < 10% Latency: MAP < 5s, SPaT < 2s
CPM V2X	80/100/120/140 CAM and CPM station	PER < 10% Latency < 100 ms Bandwidth > 1.6 Mbyte/s
MCM <sup>345</sup> V2X	100/200/300/400/500 active CAM and MCM stations	PER < 10% Latency < 100ms Active stations >=300

<sup>343</sup> Βλέπε επίσης και: 5G-DRIVE Project (02/2019): Deliverable 4.1: “V2X Development and Test Plan”.  
<https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>344</sup> Βλέπε επίσης: 5G-DRIVE Project (08/2019): Deliverable 4.2: “Joint Specification for V2X Trials”.  
<https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>

<sup>345</sup> Βλέπε: ETSI TR 103 578 V0.0.2 (2018-10): “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communication; Informative Report for the Maneuver Coordination Service”.  
Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) βρίσκεται στη διαδικασία προσδιορισμού της Υπηρεσίας Συντονισμού Ελιγμών (Manoeuver Coordination Service - MCS). Η τυποποίηση βασίζεται σε μια κατανεμημένη λύση όπου τα οχήματα συντονίζουν τους ελιγμούς τους χρησιμοποιώντας επικοινωνίες V2V.

### A.3. Αρχιτεκτονική των Περιπτώσεων Χρήσης

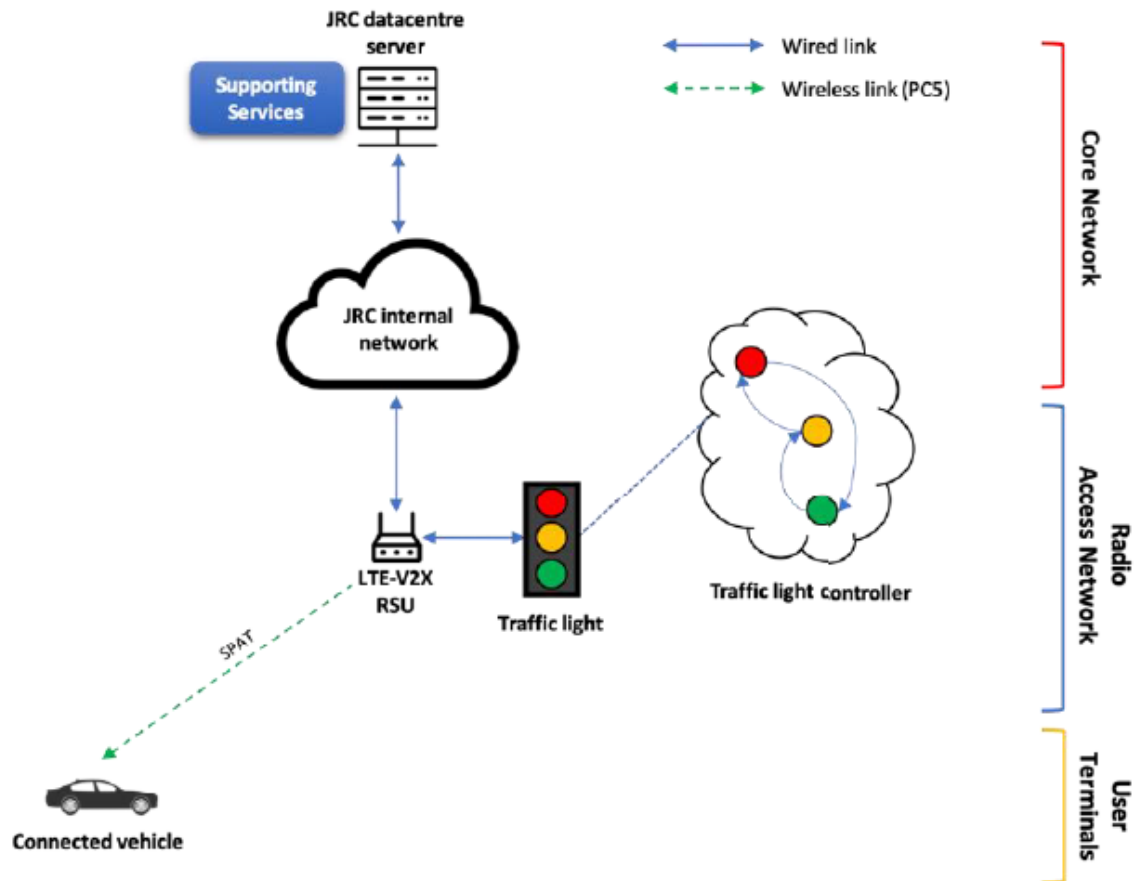
#### A.3.1. Η Φυσική Αρχιτεκτονική για την Περίπτωση Χρήσης GLOSA

Η Εικόνα 62 απεικονίζει τη φυσική αρχιτεκτονική της κλίνης δοκιμών για τη χρήση του συστήματος GLOSA, σύμφωνα με την προγραμματισμένη εφαρμογή του στην κλίνη δοκιμών της JRC στην Ispra της Ιταλίας [2]. Όπως φαίνεται στο σχήμα, τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής αυτής της περίπτωσης χρήσης είναι τα ακόλουθα:

- **Ένα φυσικό ή εικονικό φανάρι** και ο σχετικός ελεγκτής κυκλοφορίας για συντονισμό των μεταβάσεων μεταξύ των καταστάσεων «κόκκινο», «πορτοκαλί» και «πράσινο». (Για τους σκοπούς της πειραματικής αξιολόγησης αυτής της περίπτωσης χρήσης, το φανάρι μπορεί να είναι είτε φυσικό είτε εικονικό).
- **Μια C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) RSU** στον ίδιο χώρο με το φανάρι (εάν αυτό είναι φυσικό) ή σε επικοινωνία με τον ελεγκτή κυκλοφορίας (εάν αυτός είναι εικονικός). Η RSU μεταδίδει περιοδικά μηνύματα φάσης σήματος και χρονισμού (SPAT) (π.χ. για κάθε 100 ms) προς όλα τα γειτονικά οχήματα. Μεταξύ άλλων, τα μηνύματα DENM περιλαμβάνουν την τρέχουσα κατάσταση του φωτεινού σηματοδότη και πληροφορίες χρονισμού Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων (Finite State Machine - FSM).
- **Διάφορες C-ITS OBUs** που αναπτύσσονται στα οχήματα δοκιμής. Οι OBUs λαμβάνουν και επεξεργάζονται τα μηνύματα SPAT τοπικά για να υπολογίσουν τις σχετικές πληροφορίες GLOSA σε διάφορες μορφές (π.χ. υπολειπόμενος χρόνος μέχρι την επόμενη μετάβαση στην κατάσταση του φωτεινού σηματοδότη, βέλτιστη ταχύτητα για να φτάσει το όχημα στο φανάρι σε κατάσταση «πράσινο», κτλ.). Μόλις υπολογιστούν, οι πληροφορίες GLOSA μεταφέρονται σε εποχούμενο φορητό υπολογιστή (ή σε συσκευή Διεπαφής Χρήστη / User Interface - UI), όπου μπορούν να εμφανίζονται τόσο οπτικά όσο και ηχητικά στον οδηγό.
- Το **Εσωτερικό δίκτυο επικοινωνιών του φορέα JRC (Joint Research Centre<sup>346</sup>)** παρέχει συνδετικότητα μεταξύ των C-ITS RSUs και διαφόρων υποστηρικτικών υπηρεσιών που λειτουργούν στο κέντρο δεδομένων του φορέα JRC (π.χ. κονσόλα διαχείρισης πειράματος, ελεγκτής φαναριών οδικής σήμανσης, εξυπηρετητής καταγραφής (log server) κτλ.).
- **Φυσικοί/εικονικοί εξυπηρετητές** στο κέντρο δεδομένων του φορέα JRC που εκτελούν τις παραπάνω υποστηρικτικές υπηρεσίες. Με σκοπό την εφαρμογή και την πειραματική αξιολόγηση αυτής της περίπτωσης χρήσης, αυτοί οι εξυπηρετητές μπορούν να είναι είτε φυσικοί είτε εικονικοί.

---

<sup>346</sup> Βλέπε: [https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre\\_el](https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre_el)

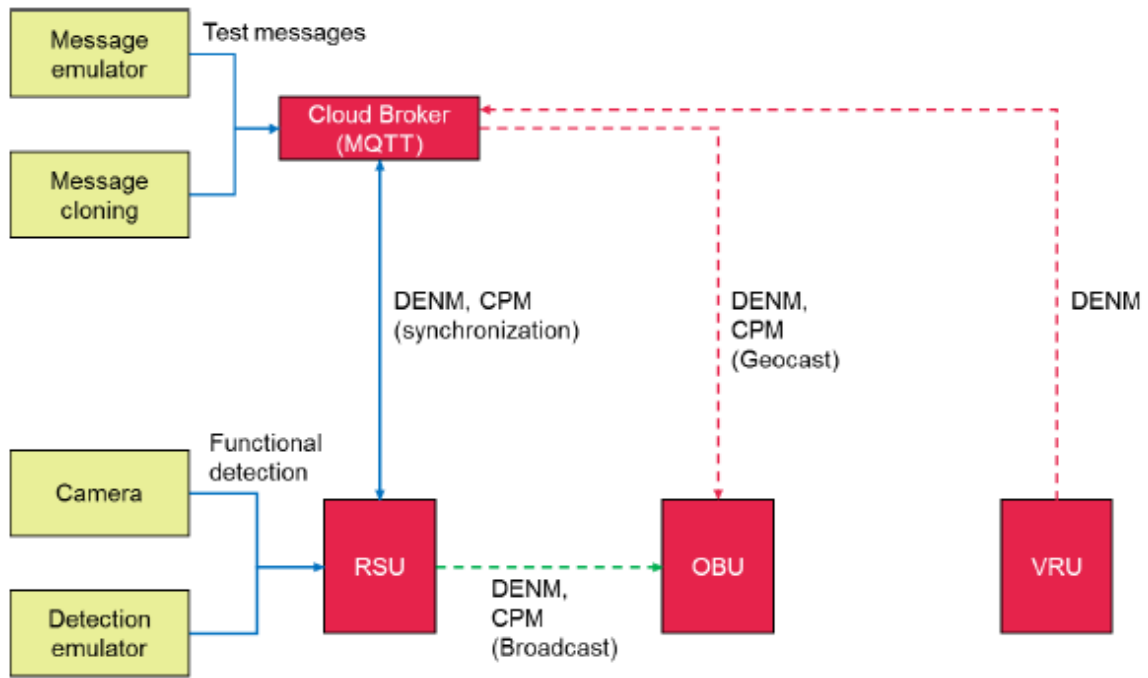


Εικόνα 62: Προτεινόμενη φυσική αρχιτεκτονική για το σύστημα GLOSA, στο πλαίσιο του προγράμματος 5G-DRIVE [2]

### A.3.2. Η Φυσική Αρχιτεκτονική για την Περίπτωσης Χρήσης της Έξυπνης Διασταύρωσης

Η φυσική αρχιτεκτονική για το περιβάλλον δοκιμών της έξυπνης διασταύρωσης είναι παρόμοια με εκείνη της αρχιτεκτονικής του συστήματος GLOSA της προηγούμενης ενότητας, με εξαίρεση τη μη χρήση εσωτερικού δικτύου, αλλά τη θεώρηση ενός Εικονικού Ιδιωτικού Δικτύου (Virtual Private Network - VPN) για τη σύνδεση του γραφείου υποστήριξης (back-office) με την RSU και την παράλειψη του φαναριού οδικής σήμανσης.

Μια λειτουργική άποψη της προτεινόμενης μορφής αρχιτεκτονικής φαίνεται στην Εικόνα 63:



Εικόνα 63: Λειτουργική Απεικόνιση για την Έξυπνη Διασταύρωση στο πρόγραμμα 5G-DRIVE [2]

Οι διακεκομμένες γραμμές είναι ασύρματες γραμμές επικοινωνίας βελτιωμένης ευρυζωνικής πρόσβασης (enhanced Mobile Broadband - eMBB), ενώ οι πράσινες διακεκομμένες συνιστούν τοπικές επικοινωνίες τύπου V2X.

- **RSU:**

Η RSU είναι υπεύθυνη για τις επικοινωνίες τύπου V2X και για τη συλλογή των δεδομένων από τους τοπικά διαθέσιμους αισθητήρες. Στην περίπτωση αυτής της δοκιμής, προστίθεται επίσης η δυνατότητα χρήσης προσομοιωμένων συμβάντων ανίχνευσης. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση των μηνυμάτων DENM και CPM που μπορούν να σταλούν απευθείας μέσω V2X ή να συγχρονιστούν με μεσίτη νεφοϋπολογιστικής (cloud broker) για να ενεργοποιήσουν την ασύρματη γεωγραφική μετάδοση μέσω σύνδεσης eMBB.

- **OBU:**

Η OBU λαμβάνει τις πληροφορίες για έναν κινούμενο χρήστη. Στην περίπτωση του 5G-DRIVE αυτός ο χρήστης είναι ένα όχημα. Θα πρέπει να αποκωδικοποιεί τα λαμβανόμενα μηνύματα και να εμφανίζει οπτικά τα σχετικά λειτουργικά δεδομένα στον οδηγό ή στην αυτοματοποιημένη μονάδα οδήγησης. Το επίκεντρο εδώ είναι στην απόδοση της επικοινωνίας και όχι σε θέματα της Διεπαφής Ανθρώπου-Μηχανής (Human-Machine Interface – HMI). Επομένως, η έξοδος μπορεί να είναι στην γραμμή εντολών είτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εφαρμογή άλλου έργου.



- **Cloud Broker (Μεσίτης Νεφοϋπολογιστικής):**

Ο Cloud Broker συλλέγει όλες τις πληροφορίες κίνησης με αποτελεσματικό τρόπο ώστε να επιτρέψει τη γεωγραφική εκπομπή τους με την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IoT Message Queuing Telemetry Transport<sup>347</sup> (MQTT) και τα δεδομένα ταξινομούνται σύμφωνα με χωρικές ετικέτες/παραθέσεις (tiles) που επιτρέπουν τη γεωγραφική καταχώριση χωρίς να χρειάζεται οι χρήστες να μεταδώσουν την ακριβή τοποθεσία τους. Αυτό εξοικονομεί εύρος ζώνης επικοινωνίας και διασφαλίζει το απόρρητο. Τα μηνύματα που δημιουργούνται τοπικά στην RSU πρέπει να αποσταλούν στον Cloud Broker, ενώ τα μηνύματα από μια άλλη πηγή του Υπολογιστικού Νέφους (Cloud) μπορούν να καταφορτώνονται σε μια RSU. Το πλεονέκτημα αυτής της καταφόρτωσης (downloading) είναι ότι τα μηνύματα μπορούν να ευρυεκπέμπονται επιτρέποντας σε όλους τους τοπικούς χρήστες (clients) να τα λαμβάνουν ταυτόχρονα, αντί να χρειαστεί αυτοί να επικοινωνήσουν με πολλαπλές παράλληλες ζεύξεις τύπου eMBB.

- **VRU:**

Ο ευάλωτος χρήστης δρόμου μπορεί επίσης να αποστείλει τα δικά του προειδοποιητικά μηνύματα προς τον Cloud Broker, όταν εισέρχεται σε μια περιοχή διένεξης. Αυτή είναι μια ενδιαφέρουσα επιλογή ιδίως όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι αισθητήρες στην υποδομή. Ωστόσο, προσθέτει ένα επιπλέον (ασύρματο) βήμα επικοινωνίας σε σύγκριση με την ανίχνευση από την υποδομή. Επειδή θεωρείται απίθανο οι VRUs να είναι εξοπλισμένοι με ακριβή τεχνολογία V2X στο μέλλον, αυτή η επιλογή δεν λαμβάνεται υπόψη εδώ.

- **Κάμερα:**

Η κάμερα ανιχνεύει τις θέσεις και τις τροχιές των VRUs που διασχίζουν μια περιοχή διένεξης. Αυτά τα δεδομένα αποστέλλονται στην RSU σε μορφή που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής της κάμερας.

- **Detection Emulator (Εξομοιωτής Ανίχνευσης):**

Για την εκτέλεση των δοκιμών μπορεί να αποφευχθεί η χρήση κάμερας/καμερών στην υποδομή και οι πληροφορίες ανίχνευσης μπορούν να εξομοιώνονται με μια απλή εφαρμογή που «τρέχει» σε έναν φορητό υπολογιστή στο πεδίο, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην RSU. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται λεπτομερέστερος συντονισμός χρονισμού κατά τη διάρκεια των δοκιμών ενώ αποφεύγεται ο κίνδυνος για έναν ενεργό VRU όταν αυτός εισέρχεται σε μια περιοχή διένεξης.

---

<sup>347</sup> Για περισσότερα στοιχεία σχετικά με το MQTT βλέπε επίσης: <https://mqtt.org/>

- **Message Emulator (Εξομοιωτής Μηνυμάτων):**

Ο εξομοιωτής μηνυμάτων λειτουργεί στο επίπεδο του υπολογιστικού νέφους και μπορεί να εισάγει δοκιμαστικά μηνύματα στο cloud. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται πλήρης έλεγχος στον τύπο, στο μήκος του μηνύματος και στην τοποθεσία που αυτό απευθύνεται.

- **Message Cloning (Κλωνοποίηση Μηνυμάτων):**

Η κλωνοποίηση/αντιγραφή ενός μηνύματος σημαίνει τη χρήση δεδομένων από μια πραγματική διασταύρωση ευρισκόμενη οπουδήποτε αλλού στην δοκιμαστική διασταύρωση για τους σκοπούς λειτουργίας της κλίνης δοκιμών. Για την περίπτωση GLOSA αυτό σημαίνει χειροκίνητη επεξεργασία του MAP μηνύματος και αυτόματη επεξεργασία στο SPaT για την προσαρμογή των αναγνωριστικών των μηνυμάτων (Identifiers – IDs) στο μετασχηματισμένο μήνυμα MAP.

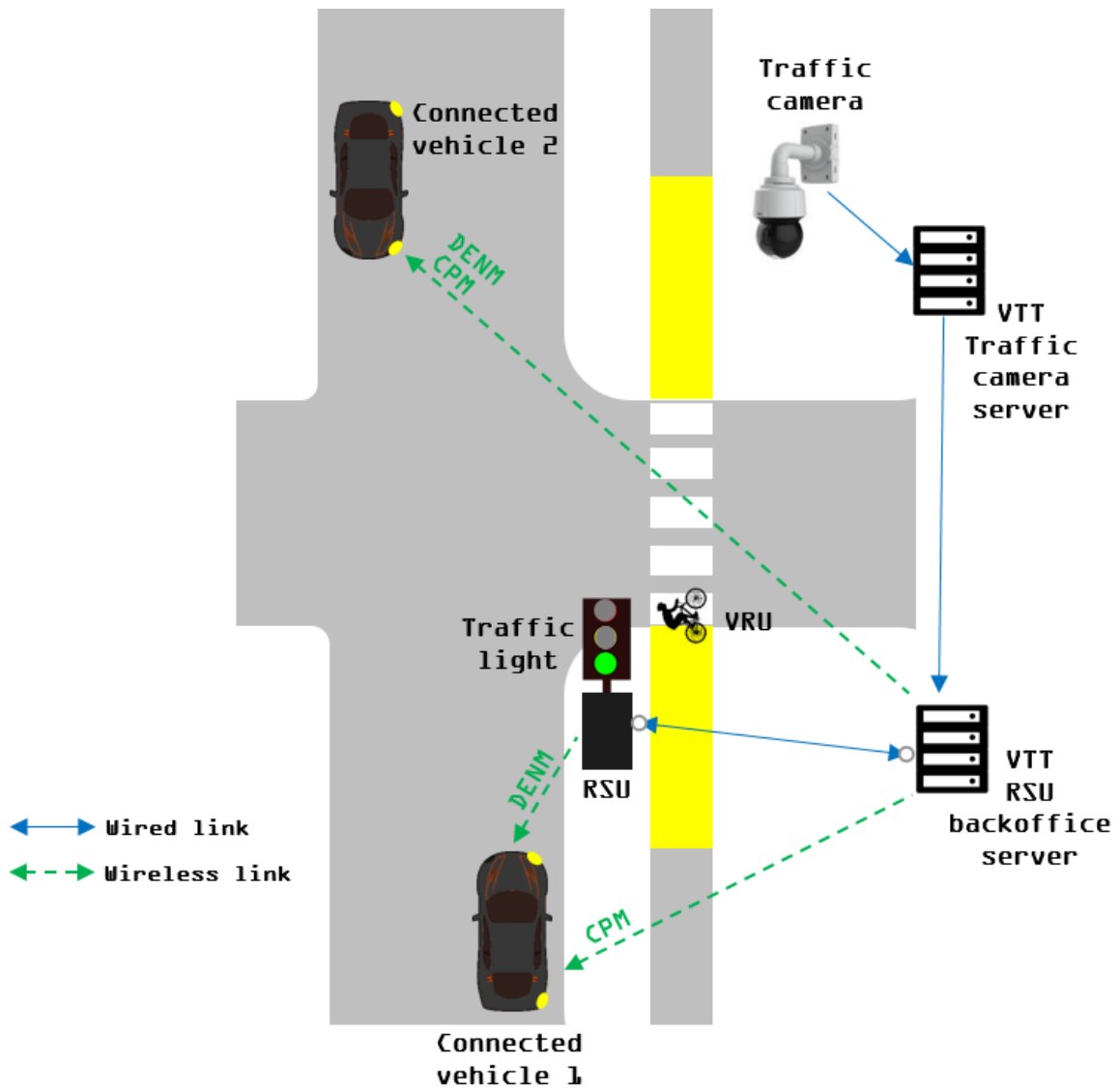
### **A.3.3. Κοινή Αρχιτεκτονική για τις Περιπτώσεις Χρήσης GLOSA και Έξυπνης Διασταύρωσης**

Οι δοκιμές στην Φινλανδία έλαβαν χώρα με τη μέριμνα του φορέα VTT (Technical Research Centre of Finland Ltd.<sup>348</sup>) στην κλίνη δοκιμών στο Espoo και διεξήχθησαν με εξοπλισμό και ρυθμίσεις που φαίνονται στην Εικόνα 64<sup>349</sup>.

---

<sup>348</sup> Βλέπε σχετικά: <https://www.vttresearch.com/en>

<sup>349</sup> Ο εξοπλισμός περιγράφεται στο 5G-DRIVE Project, Deliverable D4.1 (04/2019): “V2X Development and Test Plan”. (Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>)



Εικόνα 64: Κοινή Αρχιτεκτονική των περιπτώσεων χρήσης GLOSA και Έξυπνης Διασταύρωσης [2]

Το συνδεδεμένο όχημα 1 (Connected Vehicle 1 - CV1) προειδοποιείται για τον VRU (ποδηλάτης) από την υπηρεσία της έξυπνης διασταύρωσης (μήνυμα DENM).

Ας σημειωθεί ότι τα μηνύματα για την περίπτωση GLOSA δεν εμφανίζονται στο παραπάνω σχήμα και ότι εμφανίζονται δύο πιθανές θέσεις της RSU (μια με χρήση διακομιστή MEC/back-office και μια προσαρτημένο στο φανάρι οδικής σήμανσης). Τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής αυτής της «μεικτής» περίπτωσης χρήσης είναι τα ακόλουθα:

- **Ένα φυσικό/εικονικό φανάρι** σε κατάσταση λειτουργίας στατικού ελέγχου για την υλοποίηση της εναλλαγής των καταστάσεων «κόκκινο», «πορτοκαλί» και «πράσινο». Για το σκοπό της πειραματικής αξιολόγησης αυτής της δοκιμαστικής χρήσης, το φανάρι μπορεί να είναι είτε φυσικό είτε εικονικό (π.χ. λογισμικό που επικοινωνεί με την RSU). Μια άλλη παράμετρος είναι το κανάλι επικοινωνίας. Τα

δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν επιτόπου εάν είναι διαθέσιμες οι κατάλληλες διεπαφές στο όχημα ή μπορούν να προέρχονται από ένα κέντρο διαχείρισης της κίνησης που τα διαμοιράζει στο Cloud και τα οποία διανέμονται μέσω IoT πρωτοκόλλων σε επιτόπιες συσκευές στο πεδίο. Το φανάρι είναι απαραίτητο μόνο για τη δοκιμαστική χρήση του συστήματος GLOSA γιατί από αυτό ανακτάται το περιεχόμενο του μηνύματος SPAT.

- **Μια LTE - V2X RSU ή/και μία ITS - G5 RSU** τοποθετημένη/-ες μαζί με το φανάρι (εάν είναι φυσικό) ή όντας σε επικοινωνία με την εφαρμογή εξομοίωσης του φωτεινού σηματοδότη (εάν το φανάρι είναι εικονικό). Όταν ανιχνεύεται ένας VRU στη διάβαση πεζών (διαγραμμισμένη περιοχή) του σχήματος, τότε ένα μήνυμα DENM πρέπει να μεταδίδεται από την RSU, ενώ το γραφείο υποστήριξης θα πρέπει να το αναμεταδίδει σε όλα τα γειτονικά οχήματα. Στις κίτρινες περιοχές, δεδομένης της κατεύθυνσης κίνησης του VRU προς τη διασταύρωση, η υποδομή πρέπει να στέλνει μήνυμα CPM. Το σύστημα GLOSA θα πρέπει να εκπέμπει μηνύματα MAP και SPaT.
- **Τουλάχιστον δύο (On Board Units) OBUs** (μια ITS-G5 και μια LTE-V2X) εγκαθίστανται και λειτουργούν στα οχήματα που συμμετέχουν στις δοκιμές. Οι OBUs λαμβάνουν και επεξεργάζονται τα μηνύματα MAP, SPAT, DENM και CPM τοπικά για την εμφάνιση των πληροφοριών GLOSA ή για τον υπολογισμό των πιθανών διενέξεων με τους VRUs στη διάβαση πεζών και επίσης για να προειδοποιήσουν τα οχήματα για μια πιθανή επερχόμενη σύγκρουση και να αποτρέψουν ένα απότομο φρενάρισμα στο άμεσο μέλλον.
- **Ένα αυτοματοποιημένο όχημα** με αισθητήρες για τη δημιουργία μηνυμάτων CPM με πραγματικά δεδομένα αισθητήρων σε σενάρια V2V.
- **Μια κάμερα ελέγχου κυκλοφορίας** που ανιχνεύει και παρακολουθεί ευάλωτους χρήστες (VRUs) στη διασταύρωση.
- **Ένας εξυπηρετητής** για την κάμερα ελέγχου κίνησης που μπορεί να παρέχει επικοινωνία μεταξύ των RSUs και των διάφορων υποστηρικτικών υπηρεσιών που εκτελούνται στο αντίστοιχο κέντρο δεδομένων των δοκιμών. Όταν ένας πεζός ανιχνεύεται στη διάβαση, ένα μήνυμα DENM πρέπει να μεταδίδεται από την RSU, ενώ ο διακομιστής του γραφείου υποστήριξης της RSU θα πρέπει να το αναμεταδώσει σε όλα τα οχήματα της περιοχής (δηλαδή προς το CV1 και το CV2). Στις κίτρινες περιοχές, δεδομένης της κατεύθυνσης κίνησης του VRU προς τη διασταύρωση, η υποδομή πρέπει να στέλνει μήνυμα CPM. Το μήκος της κίτρινης περιοχής είναι το ίδιο με το μήκος της ζώνης διέλευσης. Για καλύτερη δοκιμή θα πρέπει να είναι δυνατή η δημιουργία μηνυμάτων που βασίζονται σε εξομοίωση κίνησης του VRU.

- Ένας εξυπηρετητής για το γραφείο υποστήριξης της RSU στο κέντρο δεδομένων εκτελεί όλες τις απαραίτητες υπηρεσίες υποστήριξης.

Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο μετράται καταγράφοντας τις χρονοσφραγίδες (timestamps) με την παρακάτω σειρά:

1. Ο χρόνος δημιουργίας του μηνύματος. Συνήθως εγγράφεται στο ίδιο το μήνυμα με την έναρξη της διαδικασίας κωδικοποίησης.
2. Μετάδοση μηνύματος από την πηγή (μια εικονική RSU που στέλνει το μήνυμα σε πλατφόρμα IoT).
3. Λήψη μηνύματος από MEC ή RSU.
4. Μετάδοση από MEC (Mobile Edge Computing) ή RSU στο κανάλι V2X.
5. Λήψη του μηνύματος από την OBU.

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Qualcomm: What is 5G?. Available at: <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>
- [2] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Vasilaki, E., et al. (2021): 5G-DRIVE Program, Deliverable 2.3: *Final Report of Architecture and Use Case Implementation*. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/>
- [3] The Third Generation Partnership project (3GPP). Available at: <https://www.3gpp.org/about-3gpp>
- [4] Wikipedia: 3GPP. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/3GPP>
- [5] Wikipedia: 5G. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [6] 5G - Public Private Partnership (5G-PPP). Available at: <https://5g-ppp.eu/>
- [7] 5G Americas (2021, November): Mobile Communications Towards 2030. Available at: <https://www.5gamericas.org/mobile-communications-towards-2030>
- [8] Steinberg, S. :A museum masterpiece in your living room? See how 5G could change our cultural experiences, Verizon (2021). Available at: <https://www.verizon.com/about/news/5g-impact-on-cultural-experiences>
- [9] Verizon (2021, May): 5G Applications for Network and the Future. Available at: <https://www.verizon.com/about/news/applications-use-case>
- [10] 5G Americas (2021, January): 3GPP Releases 16, 17 & beyond. Available at: <https://www.5gamericas.org/3gpp-releases-16-17-beyond/>
- [11] Shahzadi, S., Iqbal, M., Dagiuklas, T., & Qayyum, Z.U. (2017): Multi-access edge computing: open issues, challenges and future perspectives. *Journal of Cloud Computing*, vol.6, no.1, <https://doi.org/10.1186/s13677-017-0097-9>
- [12] M. T. Beck, M.T. and Maier, M. (2014): Mobile Edge Computing: Challenges for Future Virtual Network Embedding Algorithms. In: *Proceedings of The Eighth International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences (ADVCOMP 2014)*, pp.65-70, Munchen, Germany.
- [13] Taleb, T., Dutta, S. Ksentini A. , Iqbal M. and Flinck H. (2017. March): Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.3, pp.38-43, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600249CM
- [14] Warren, D. and Dewar, C. (2014, December): Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile GSM Association (GSMA) *Intelligence*, <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2015/01/2014-12-08-c88a32b3c59a11944a9c4e544fee7770.pdf>
- [15] International Telecommunication Union - Radiocommunications Sector (ITU-R) (2015,

- September): ITU-R Recommendation M.2083-0: IMT Vision - “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf)
- [16] Research and Markets (2021, April): Global 6G Market Report 2021: Market to Reach \$1,773.09 Billion by 2035. Globenewswire Inc. Available at: <https://www.globenewswire.com/fr/news-release/2021/04/19/2212107/28124/en/Global-6G-Market-Report-2021-Market-to-Reach-1-773-09-Billion-by-2035.html>.
- [17] NIKKEI Asia (2021, April): US and Japan to invest \$4.5 bn in next-gen 6G race with China. Nikkei Inc. Available at: <https://asia.nikkei.com/Business/Telecommunication/US-and-Japan-to-invest-4.5bn-in-next-gen-6G-race-with-China>
- [18] Rui, G. (2021, May): China’s Shenzhen to invest US\$108 billion in R&D over 5 years. South China Morning Post Publishers Ltd. Available at: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3132651/chinas-tech-hub-shenzhen-invest-us108-billion-rd-over-5-years>
- [19] CEVA: Improving Head Tracking in XR Environments. Available at: <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/improving-head-tracking-in-xr-environments/>.
- [20] NOKIA: Where can CSPs use digital twins? Everywhere. Available at: [https://www.nokia.com/networks/insights/where-can-csps-use-digital-twins/?did=D00000000519&gclid=Cj0KCQiA-eeMBhCpARIsAAZfxZB\\_iBYK1Aw0Ditb0LDqaAJwA363ymL5iAjKXyil5RpGqRiqjC0siJMaAuJrEALw\\_wcB](https://www.nokia.com/networks/insights/where-can-csps-use-digital-twins/?did=D00000000519&gclid=Cj0KCQiA-eeMBhCpARIsAAZfxZB_iBYK1Aw0Ditb0LDqaAJwA363ymL5iAjKXyil5RpGqRiqjC0siJMaAuJrEALw_wcB).
- [21] Storck, C.R., & Duarte-Figueiredo, F. (2020): A Survey of 5G Technology Evolution, Standards, and Infrastructure Associated with Vehicle-to-Everything Communications by Internet of Vehicles. *IEEE Access*, vol.8, pp.117593-117614, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004779>.
- [22] Wang, J., Shao, Y., Ge, Y., & Yu, R. (2019): A survey of vehicle to everything (V2X) testing, *Sensors*, vol.19, no.2, pp.334, <https://doi.org/10.3390/s19020334>.
- [23] Chen, M., Tian, Y., Fortino, G., Zhang, J., & Humar, I. (2018). Cognitive Internet of Vehicles. *Computer Communications*, vol.120, pp.58-70, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.02.006>
- [24] The Third Generation Partnership Project (3GPP), TR 21.916 V16.0.1 (2021-09): Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15). Available at: <https://www.3gpp.org/release-16>.
- [25] C40 CITIES(2019, October): Launch of global alliance providing blueprint for city and business collaboration on climate action. Press release. Available at: <https://www.c40.org/news/city-business-climate-alliance/>
- [26] 5G Americas (2021, November): 5G Edge Automation & Intelligence. Available at: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2021/10/5G-Edge-Automation->

[Optimization-InDesign-1.pdf](#)

- [27] World Health Organization (WHO) (2021): Road Traffic Injuries. Available at: [https://www.who.int/health-topics/road-safety#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/road-safety#tab=tab_1)
- [28] Zanes Law: Intersection Car Accidents: Statistics, Causes, and Possible Solutions. Available at: <https://zaneslaw.com/intersection-car-accidents/>
- [29] Buzachis, A., Celesti, A., Galletta, A., Fazio, M., Fortino, G. and Villari, M., (2020, June): A multi-agent autonomous intersection management (MA-AIM) system for smart cities leveraging edge-of-things and Blockchain. *Information Sciences*, vol.522, pp.148-163, doi:10.1016/j.ins.2020.02.059.
- [30] Intel: Smart Road Infrastructure. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/transportation/smart-road-infrastructure.html>
- [31] SMMT (2017). Connected and Autonomous Vehicles Facts 2017. <https://www.smmt.co.uk/2017/>
- [32] Μενεγάτος, Α. (2021): Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με θέμα: «Ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας σε περιβάλλοντα έξυπνων μεταφορών» , διαθέσιμο σε: [https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/13715/%20ENEGATOS\\_1920.pdf?sequence=3](https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/13715/%20ENEGATOS_1920.pdf?sequence=3)
- [33] Choksey, J.S., Wardlaw, C. (2021, May): Levels of Autonomous Driving, Explained. Available at: <https://www.idpower.com/cars/shopping-guides/levels-of-autonomous-driving-explained>
- [34] Beresford, C. (2021, March): Honda Legend Sedan with Level 3 Autonomy Available for Lease in Japan . Available at: <https://www.caranddriver.com/news/a35729591/honda-legend-level-3-autonomy-leases-japan/>
- [35] Printz, L. (2021, December): The Detroit Bureau. Available at: <https://www.thedetroitbureau.com/2021/12/mercedes-benz-cleared-to-offer-level-3-autonomous-driving-in-2022/>
- [36] Toh, C.K., Sanguesa, J.A., Cano, J.C., & Martinez, F.J. (2020). Advances in smart roads for future smart cities *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol.476, issue 2233, pp.1-24, <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0439>
- [37] ITU Study Group on Smart Cities. ITU/Focus Group on Smart Sustainable Cities (2015, October). Available at: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ssc/Pages/default.aspx>
- [38] Terrafugia . Available at: <https://terrafugia.com/>
- [39] The Institution of Engineering and Technology (IET) (2018, September): Is it the end of the road for asphalt and concrete? Available at: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2018/09/is-it-the-end-of-the-road-for->



[asphalt-and-concrete/](#)

- [40] Kokkinopoulos, A., Vokas, G., & Papageorgas, P. (2014). Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators-The potential for the Attiki Odos traffic grid. *Energy Procedia*, vol.50, pp.1070-1085, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.126>
- [41] Zhou, M., Huang, D., Hu, Y., Zhou, L., & An, L. (2022, February). Musical roads: Design, construction and potential economic and safety benefits. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, vol.175 Issue 1, pp.34-42, <https://doi.org/10.1680/jtran.18.00136>
- [42] Jacob, B., & Feypell-de La Beaumelle, V. (2010, July). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*, vol.34, issue 1, pp.9-15. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2010.06.003>
- [43] Dongwoon Hahn, Manoj Pansare: Maryland Virtual Weigh Station. Available at: [https://www.roads.maryland.gov/OOTS/MD\\_VWS\\_Final\\_Report.pdf](https://www.roads.maryland.gov/OOTS/MD_VWS_Final_Report.pdf)
- [44] The Guardian: World's first electrified road for charging vehicles opens in Sweden. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2018/apr/12/worlds-first-electrified-road-for-charging-vehicles-opens-in-sweden>
- [45] The Conversation: Wired-up roads will soon charge your electric car - while you're driving. Available at: <https://theconversation.com/wired-up-roads-will-soon-charge-your-electric-car-while-youre-driving-72625>
- [46] Kottasova, I., & Petroff, A. (2015, August): These roads will charge cars as they drive. Available at: <https://money.cnn.com/2015/08/18/technology/uk-electric-cars-roads/index.html>
- [47] Toh, C.K., Cano, J.C., Fernandez-Laguia, C., Manzoni, P., & Calafate, C.T. (2019): Wireless digital traffic signs of the future. *IET Networks*, vol.8, issue 1, pp.74-78, <https://doi.org/10.1049/iet-net.2018.5127>
- [48] Wang, L., Chen, F., & Yin, H. (2016, December). Detecting and tracking vehicles in traffic by unmanned aerial vehicles. *Automation in Construction*, vol.72, part 3, pp.294-308, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.008>
- [49] Drobots Company: Watch Out! Your Next Traffic Ticket May Come From A Drone. Available at: <https://drobotscompany.com/drones-traffic-tickets/>
- [50] Fu, B., (2016, September) : Drones Are Writing Tickets For Traffic Police On Highways In China. Available at: <https://www.buzzfeednews.com/article/beimengfu/cops-in-china-are-using-drones>
- [51] Staff, T. (2018, August): Israel police roll out traffic drones to catch reckless drivers. Available at: <https://www.timesofisrael.com/israel-police-roll-out-traffic-drones-to-catch-reckless-drivers/>
- [52] Huawei: Huawei LiteOS-assisted Smart Lighting Solution. Available at:

<https://www.huawei.com/minisite/liteos/en/lighting.html>.

- [53] Martinez, F.J., Toh, C.-K., Cano, J.-C., Calafate, C.T., & Manzoni, P. (2010, October): Emergency Services in Future Intelligent Transportation Systems Based on Vehicular Communication Networks. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol.2, issue 2, pp.6-20, doi: 10.1109/MITS.2010.938166.
- [54] Umedu, T., Isu, K., Higashino, T., & Toh, C.K. (2010): An intervehicular-communication protocol for distributed detection of dangerous vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.59, no.2, pp.627-637, <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2035041>
- [55] Lowrie, P.R. (1990). SCATS - A Traffic Responsive Method of Controlling Urban Traffic. In Sales information brochure published by Roads and Traffic Authority.
- [56] Luk, J.Y.K. (1984): Two traffic-responsive area traffic control methods: SCATS and SCOOT. *Traffic Engineering and Control*, vol.25, pp.14-20.
- [57] Robertson, D. I., & Bretherton, R. D. (1991): Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time - The SCOOT Method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.40, pp.11-15, <https://doi.org/10.1109/25.69966>
- [58] Collotta, M., Giuffré, T., Pau, G., & Scatà, G. (2014): Smart traffic light junction management using wireless sensor networks. *WSEAS Transactions on Communications*, vol.13, pp.648-658, <https://doi.org/10.20894/ijcnes.103.005.001.023>
- [59] Stevanovic, A., Kergaye, C., and Martin, P.T., (2009, January): SCOOT and SCATS: A Closer Look into Their Operations. In: *Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC*, pp.1-17. [https://www.researchgate.net/publication/274137098\\_SCOOT\\_and\\_SCATS\\_A\\_Closer\\_Look\\_into\\_Their\\_Operations](https://www.researchgate.net/publication/274137098_SCOOT_and_SCATS_A_Closer_Look_into_Their_Operations)
- [60] Dissanayake, D.T., Senanayake, S.M.R., Divarathne, H.K.D.W.M.M.R., & Samaranayake, B.G.L.T. (2009): Real-time dynamic traffic light timing adaptation algorithm and simulation software. In: *Proceedings of the ICIIS 2009 - 4th International Conference on Industrial and Information Systems 2009, Conference Proceedings, (ICIIS)*, pp.563-567, <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2009.5429797>.
- [61] Collotta, M., Pau, G., Salerno, V.M., & Scatà, G. (2012): A novel road monitoring approach using Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 2012 6th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, CISIS 2012*, pp.376-381, <https://doi.org/10.1109/CISIS.2012.37>.
- [62] Al-Khateeb, K.A.S., Johari, J.A.Y., & Al-Khateeb, W.F. (2008): Dynamic Traffic Light Sequence Algorithm Using RFID. *Journal of Computer Science*, vol.4, no.7, pp.517-524, <https://doi.org/10.3844/jcssp.2008.517.524>.
- [63] Collotta, M., Messineo, A., Nicolosi, G., & Pau, G. (2014): A self-powered bluetooth network for Intelligent traffic light junction management. *WSEAS Transactions on*

- Information Science and Applications*, vol.11, pp.12-23,  
[https://www.researchgate.net/publication/261947421\\_A\\_Self-Powered\\_Bluetooth\\_Network\\_for\\_Intelligent\\_Traffic\\_Light\\_Junction\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/261947421_A_Self-Powered_Bluetooth_Network_for_Intelligent_Traffic_Light_Junction_Management).
- [64] Collotta, M., Denaro, M., Scatà, G., Messineo, A., & Nicolosi, G. (2014): A self-powered wireless sensor network for dynamic management of queues at traffic lights. *Transport and Telecommunication*, vol.15, no.1, pp.42-52, <https://doi.org/10.2478/tti-2014-0005>.
- [65] GeeksForGeeks: Introduction of Cloud of Things (CoT). Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-cloud-of-things-cot/>
- [66] El-Sayed, H., Sankar, S., Prasad, M., Puthal, D., Gupta, A., Mohanty, M., & Lin, C.T. (2017): Edge of Things: The Big Picture on the Integration of Edge, IoT and the Cloud in a Distributed Computing Environment. *IEEE Access*, vol.6, pp.1706-1717, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780087>.
- [67] Dresner, K., & Stone, P. (2008): A multiagent approach to autonomous intersection management. *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol.31, pp.591-656, <https://doi.org/10.1613/jair.2502>.
- [68] Michaelian, M., Browand, F., (2000, September): Field Experiments Demonstrate Fuel Savings for Close-Following, *California PATH Research Report University of California, US*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/254439044\\_Field\\_Experiments\\_Demonstrate\\_Fuel\\_Savings\\_for\\_Close-Following](https://www.researchgate.net/publication/254439044_Field_Experiments_Demonstrate_Fuel_Savings_for_Close-Following)
- [69] Parent, M., & Gallais, G. (2002): Intelligent transportation in cities with CTS. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.826-830, <https://doi.org/10.1109/ITSC.2002.1041326>.
- [70] Bergenhem, C., Pettersson, H., Coelingh, E., Englund, C., Shladover, S., & Tsugawa, S. (2012): Overview of platooning systems. In: *Proceedings of the 19th Intelligent Transport Systems World Congress (ITS 2012)*.
- [71] Amoozadeh, M., Deng, H., Chuah, C. N., Zhang, H. M., & Ghosal, D. (2015, April): Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET. *Vehicular Communications*, vol.2, issue 2, pp.110-123, <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2015.03.004>.
- [72] Amirgholy, M., Nourinejad, M., & Gao, H. O. (2020, July): Optimal traffic control at smart intersections: Automated network fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol.137, pp.2-18, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.10.001>.
- [73] Yang, K., Guler, S. I., & Menendez, M. (2016): Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.72, pp.109-129, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.009>.

- [74] Mellegård, N., & Reichenberg, F. (2020): The day 1 C-its application green light optimal speed advisory - A mapping study. *Transportation Research Procedia*, vol.49, pp.170-182, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.015>.
- [75] www.swarco.com: Traffic Light Assistance. Available at: <https://www.swarco.com/solutions/connected-driving/traffic-light-assistance>.
- [76] Bodenheimer, R., Brauer, A., Eckhoff, D., & German, R. (2015, January): Enabling GLOSA for adaptive traffic lights. *IEEE Vehicular Networking Conference*, pp.167-174, <https://doi.org/10.1109/VNC.2014.7013336>.
- [77] Lebre, M.-A., Le Mouël, F., Garnault, A., and Picron, V. (2015): Real scenario and simulations on GLOSA traffic light system for reduced CO2 emissions, waiting time and travel time. In: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ITS World Congress*, October 2015, Bordeaux. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.01965.pdf>.
- [78] ITSWorldCongres: Real scenario and simulations on GLOSA traffic light system for reduced CO<sub>2</sub> emissions, waiting time and travel time. Available at: <https://vehicular-mobility-trace.github.io/publis/ITSWorldCongress-final-paper-2736-GLOSA-2015.pdf>.
- [79] Behrisch, Michael and Bieker, Laura and Erdmann, Jakob and Krajzewicz, Daniel (2011): *SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview*. In: *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, October 23-28, 2011, Barcelona. ISBN 978-1-61208-169-4.
- [80] Wegener, A., Piórkowski, M., Raya, M., Hellbrück, H., Fischer, S., & Hubaux, J. P. (2008): TraCI: An interface for coupling road traffic and network simulators. In: *Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS'08)*, pp.155-163, <https://doi.org/10.1145/1400713.1400740>.
- [81] Eckhoff, D., Halmos, B., & German, R. (2013): Potentials and limitations of Green Light Optimal Speed Advisory systems. *IEEE Vehicular Networking Conference*, pp.103-110, <https://doi.org/10.1109/VNC.2013.6737596>.
- [82] Stahlmann, R., Möller, M., Brauer, A., German, R., & Eckhoff, D. (2016): Technical evaluation of GLOSA systems and results from the field. *IEEE Vehicular Networking Conference*, pp.1-8, <https://doi.org/10.1109/VNC.2016.7835967>.
- [83] Rondinone, M., Walter, T., Blokpoel, R., & Schindler, J. (2018): V2X Communications for Infrastructure-Assisted Automated Driving. In: *Proceedings of the 19<sup>th</sup> IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2018)*, pp.14-19, <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2018.8449775>.
- [84] MAVEN: V2X communications for infrastructure-assisted automated, Managing Automated Vehicles Enhances: Deliverable D5.1 (2018).
- [85] Pereira, A.M., Anany, H., Příbyl, O., & Příkryl, J. (2017): Automated vehicles in smart urban environment: A review. In: *Proceedings of the 2017 Smart Cities Symposium Prague (SCSP 2017 - IEEE Proceedings)*, pp.1-8,

<https://doi.org/10.1109/SCSP.2017.7973864>.

- [86] Seredynski, M., Mazurczyk, W., & Khadraoui, D. (2013): Multi-segment green light optimal speed advisory. In: *Proceedings of the IEEE 27th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops and PhD Forum (IPDPSW 2013)*, pp.459-465, <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2013.157>.
- [87] Car 2 Car: C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems and Services. Available at: <https://www.car-2-car.org/about-c-its/>
- [88] ETSC (2017, November): Briefing Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) Available at: <https://etsc.eu/wp-content/uploads/ETSC-Briefing-on-Cooperative-Intelligent-Transport-Systems-C-ITS.pdf>.
- [89] C-Its Platform: Day 1 Applications. Available at: [https://ec.europa.eu/inea/sites/default/files/1\\_inea\\_cef\\_transport\\_info\\_day\\_its\\_2016\\_call\\_161021.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/default/files/1_inea_cef_transport_info_day_its_2016_call_161021.pdf). (slide 6)
- [90] C-Roads(2019, June): Evaluation and Assessment Plan. Available at: [https://www.c-roads.eu/fileadmin/user\\_upload/media/Dokumente/C-Roads\\_WG3\\_Evaluation\\_and\\_Assessment\\_Plan\\_version\\_June19\\_adopted\\_by\\_Countries\\_Final.pdf](https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_WG3_Evaluation_and_Assessment_Plan_version_June19_adopted_by_Countries_Final.pdf).
- [91] 5G-Drive (2019, August): Deliverable D4.3. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/#1567499052204-c92b37d8-cebc>.
- [92] 5G-Drive (2019, August): Deliverable D4.2, Joint Specifications for V2X Trials, 8/2019
- [93] 5G-Drive (2019, February):ERT, D4.1: V2X Development and Test Plan. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/#1552568196209-3ef4b649-a787>.
- [94] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Agapiou, G., Lazaridis, P. and Zaharis, Z. (2021): C-V2X Communications for the Support of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Use Case. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2/2021, pp.93-106. National Institute of Communications, Poland, doi: 10.26636/jtit.2021.152321.
- [95] Choi, E.-H. (2010, September): Crash Factors in Intersection-Related Crashes: An On-Scene Perspective. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Available at: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/811366>.
- [96] Medury, A., Yu, M., Grembek, O., Kurzhanskiy, A.A., Flores, C., and Varaiya, P. (2017): The disengagement dilemma of automated vehicles. In: *Proceedings of the ITS World Congress 2017*, pp.1-18. Montreal, Canada, October 29 - November 02, 2017.
- [97] Hafner, M. Cunningham, D., Caminiti, L., and Del Vecchio, D. (2013, September): Cooperative collision avoidance at intersections: Algorithms and experiments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.14, no.3, pp.1162-1175, doi:

10.1109/TITS.2013.2252901.

- [98] Grembek, O., Kurzhanskiy, A., Medury, A., Varaiya, P., & Yu, M. (2019, May): Making intersections safer with I2V communication. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.102, pp.396-410. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.017>.
- [99] Ibrahim, S., Kalathil, D., Sanchez, R. O., & Varaiya, P. (2019): Estimating Phase Duration for SPaT Messages. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.20, no.7, pp.2668–2676, <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873150>.
- [100] Muralidharan, A., Coogan, S., Flores, C., & Varaiya, P. (2016, July): Management of intersections with multi-modal high-resolution data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.68, pp.101-112, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.017>.
- [101] Ahn, H., & del Vecchio, D. (2018). Safety Verification and Control for Collision Avoidance at Road Intersections. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.63, no.3, pp.630-642, <https://doi.org/10.1109/TAC.2017.2729661>.
- [102] Misener, J., Barnes, M. Chan, C.-Y., Cody, D., Dickey, S., Goodsell, R., Gordon, T., Kim, Z.W., et al. (2010, April): Cooperative Intersection Collision Avoidance System (CICAS): Signalized Left Turn Assist and Traffic Signal Adaptation. *California PATH Research Report. UCB-ITS-PRR-2010-20*. Available at: <https://trid.trb.org/view/919887>.
- [103] Vimeo: Falbo, N.,: Protected Intersections For Bicyclists. Available at: <https://vimeo.com/86721046>.
- [104] The Third Generation Partnership Project (3GPP), TR 21.915 V15.0.0 (2019-09): Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15). Available at: <https://www.3gpp.org/release-15>.
- [105] Broggi, A., Cerri, P., Debattisti, S., Laghi, M. C., Medici, P., Molinari, D., Panciroli, M., & Prioletti, A. (2015, December): PROUD-Public Road Urban Driverless-Car Test. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.16, no.6, pp.3508-3519, <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2477556>.
- [106] Zimdahl, W. (1984): GUIDELINES AND SOME DEVELOPMENTS FOR A NEW MODULAR DRIVER INFORMATION SYSTEM. *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp.178-182, <https://doi.org/10.1109/vtc.1984.1623259>.
- [107] Varaiya, P. (1993): Smart Cars on Smart Roads: Problems of Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.38, no.2, pp.195-207, <https://doi.org/10.1109/9.250509>.
- [108] Fernandes, P., & Nunes, U. (2012): Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.13, issue 1, pp.91-106. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2179936>.

