



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας με αξιοποίηση των LTE δικτύων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριστείδης Ν. Σερέτης

Επιβλέπων: Παναγιώτης Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ



Συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας με αξιοποίηση των LTE δικτύων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριστείδης Ν. Σερέτης

Επιβλέπων: Παναγιώτης Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....
Αριστείδης Ν. Σερέτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αριστείδης Ν. Σερέτης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παναγιώτη Κωττή, για τη συνεχή και αμέριστη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας διπλωματικής. Οι εύστοχες παρατηρήσεις του καθώς και η ενδελεχής και συστηματική ανάγνωση της εργασίας συνέβαλαν καθοριστικά στο τελικό αποτέλεσμα. Κυρίως, όμως, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το βασικότερο εφόδιο, πέραν των γνώσεων επικοινωνιών, που μου μετέδωσε τα πέντε χρόνια γνωριμίας μας, τόσο μέσα από τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας όσο και κατά τη διδασκαλία των μαθημάτων: «Το πώς πραγματικά πρέπει να σκέφτεται ένας μηχανικός».

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Έλενα Βλαχογιάννη, καθηγήτρια του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Η βοήθειά της στην κατανόηση εννοιών συγκοινωνιολογικής φύσεως καθώς και οι συμβουλές της πάνω σε θέματα διαχείρισης της κυκλοφορίας ήταν εξαιρετικά σημαντικές για την κατανόηση των απαιτήσεων ενός σύγχρονου κέντρου διαχείρισης της κυκλοφορίας. Δεν θα μπορούσα, βεβαίως, να μην ευχαριστήσω θερμά τον φίλο και υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Εμμανουήλ Καμπιτάκη, με τη βοήθεια του οποίου ξεπεράστηκαν τα πολλά εμπόδια που παρουσιάστηκαν στον προσομοιωτή AIMSUN.

Επίσης, αξίζουν τα συγχαρητήρια και την ταπεινή μου ευγνωμοσύνη όλοι οι καθηγητές που με μόχθο και ενδιαφέρον πασχίζουν, πολλές φορές κάτω από δύσκολες συνθήκες, να μεταλαμπαδεύσουν στους φοιτητές ένα κομμάτι από τις γνώσεις τους, όπως επίσης, και σε όλο το διοικητικό προσωπικό του ΕΜΠ. Τέλος, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου για τις εποικοδομητικές μας συζητήσεις κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κλείνοντας, είμαι βαθύτατα ευγνώμων στους γονείς μου, Γεωργία και Νικόλαο, για τη συνεχή ενθάρρυνση και υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Σε αυτούς, ως ένα ελάχιστο ευχαριστώ για όσα μου έχουν προσφέρει, αφιερώνεται η παρούσα εργασία.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η περιγραφή ενός συστήματος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων, το οποίο αξιοποιεί τις υποδομές των δικτύων LTE. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος ενώ διαστασιολογείται και αξιολογείται για διάφορα κυκλοφοριακά σενάρια, τόσο με βάση τις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις του όσο και με την ακρίβεια της κυκλοφοριακής εικόνας που παρέχει.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται η αρχιτεκτονική και ο τρόπος λειτουργίας ενός κέντρου διαχείρισης της κυκλοφορίας. Τονίζεται ιδιαίτερα η αναγκαιότητα πρόβλεψης της κυκλοφορίας και αναλύονται τα βασικά κυκλοφοριακά δεδομένα που το κέντρο διαχείρισης συλλέγει για το σκοπό αυτό.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι συμβατικές τεχνολογίες καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμιάς. Πρόκειται για τεχνικές που βασίζονται στην εγκατάσταση αισθητήρων και συσκευών καταγραφής πλησίον του οδοστρώματος.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι νέες τεχνολογίες καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμιάς. Πρόκειται για τεχνικές που αξιοποιούν τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών.

Στο Κεφάλαιο 4 χρησιμοποιείται ο προσομοιωτής AIMSUN για να διαπιστωθεί η ποιοτική σχέση που υπάρχει ανάμεσα στο ποσοστό των δειγματοληπτούμενων οχημάτων και στη συχνότητα με την οποία λαμβάνονται κυκλοφοριακές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η Λεωφόρος Κηφισίας επιλέγεται ως περιοχή μελέτης, και για διάφορες τιμές του ποσοστού των δειγματοληπτούμενων οχημάτων και της συχνότητας δειγματοληψίας, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα των οχημάτων σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα της Λεωφόρου. Τέλος, η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων αντιπαραβάλλεται με μετρήσεις που έχουν συγκεντρωθεί από φωρατές εντός των αντίστοιχων οδικών τμημάτων.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται συνοπτικά η τεχνολογία LTE και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο ένα σύστημα συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα LTE δίκτυο. Γίνεται, επίσης, λόγος για τις διάφορες τεχνικές υπολογισμού της θέσης ενός οχήματος που παρέχει ένα δίκτυο τεχνολογίας LTE.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 γενικεύει τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4 και καταλήγει σε συμπεράσματα για τις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις και την αρχιτεκτονική του συστήματος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων.

Λέξεις-κλειδιά: Κέντρο διαχείρισης κυκλοφορίας, μέθοδοι συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων, ευφυή συστήματα μεταφορών, προσομοιωτής κυκλοφορίας AIMSUN, δίκτυα LTE και V2X τύπος επικοινωνίας, διαστασιολόγηση συστήματος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων

Abstract

The aim of this thesis is to examine a traffic data collection system that exploits LTE networks' infrastructure. In particular, the architecture of such a system is analyzed, while it is also evaluated for several traffic scenarios, in terms of its communication requirements as well as the accuracy of the traffic state it provides.

The 1st section describes the architecture and the mode of operation of a general traffic data collection center. The necessity for traffic prediction is highlighted and the various categories of traffic data collected for that purpose are analyzed.

The 2nd section examines the conventional methods for traffic data collection. These methods are based on sensors and traffic collection devices installed close to traffic sectors. Finally, a comparison of the methods is presented.

The 3rd section examines the new, emerging methods for traffic data collection. These methods utilize information and communication technologies. A comparison of these techniques is also presented.

The 4th section makes use of AIMSUN simulation program in order to identify a qualitative relation between the two traffic collection factors that mainly influence the accuracy of every traffic data collection method, namely the penetration rate (pr) of probe vehicles and the sampling frequency (sf) of traffic measurements. The case study scenario utilizes measurements collected from probe vehicles on Kifisias Avenue. For several different values of pr and sf , the mean space velocity of specific traffic sectors of Kifisias is estimated and contrasted with the mean velocity computed from detection loops installed in the respective traffic sectors.

The 5th section briefly describes the LTE technology and mainly focuses on services provided by LTE for vehicle positioning estimation and mobility management. In this respect, Vehicle to Everything (V2X) and especially Vehicle to Infrastructure (V2I) type of communication are examined.

Last, in the 6th section, the conclusions drawn in the 4th section are generalized, while a dimensioning, in terms of data load, of a traffic data collection system is presented. Finally, comments and proposal regarding the assimilation of such a system in an LTE network are offered.

Key Words: Traffic control center, traffic data collection methods, intelligent transportation systems, AIMSUN traffic simulator, LTE networks and V2X type of communication, traffic data collection system dimensioning

Περιεχόμενα

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	11
1.1 Διαχείριση κυκλοφορίας.....	11
1.2 Αρχιτεκτονική κέντρου διαχείρισης κυκλοφορίας.....	12
1.3 Συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων.....	13
1.3.1 Κατηγοριοποίηση κυκλοφοριακών δεδομένων.....	13
1.3.2 Τρόπος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων.....	15
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	16
2.1 Αισθητήρες επί του οδοστρώματος.....	16
2.1.1 Ανιχνευτές επαγωγικού βρόχου.....	16
2.1.2 Πνευματικοί σωλήνες.....	17
2.1.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες.....	18
2.1.4 Μαγνητικοί αισθητήρες.....	18
2.2 Αισθητήρες υπεράνω του οδοστρώματος.....	19
2.2.1 Επεξεργαστές εικόνας βίντεο.....	19
2.2.2 Μικροκυματικά ραντάρ.....	20
2.2.3 Υπέρυθροι αισθητήρες.....	21
2.2.3.1 Παθητικοί υπέρυθροι αισθητήρες.....	21
2.2.3.2 Ενεργητικοί υπέρυθροι αισθητήρες.....	22
2.2.4 Ακουστικοί αισθητήρες.....	23
2.2.5 Υπερηχητικοί αισθητήρες.....	24
2.2.6 Τεχνικές αναγνώρισης πινακίδας οχήματος.....	25
2.3 Σύγκριση συμβατικών μεθόδων.....	27
2.4 Βιβλιογραφία.....	28
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΝΕΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	29
3.1 FCD προερχόμενα από συσκευές GPS.....	30
3.1.1 FCD προερχόμενα από ενσωματωμένες εντός οχήματος συσκευές GPS.....	30
3.1.2 Κινητά τηλέφωνα με ενσωματωμένο δέκτη GPS.....	32
3.2 FCD προερχόμενα από δειγματοληψία κινητών τηλεφώνων.....	34
3.3 Ανιχνευτές τεχνολογίας Bluetooth.....	36
3.4 Συστήματα ραδιοπλοήγησης.....	38
3.5 Αυτόματος εντοπισμός οχήματος βασισμένος σε πινακίδες.....	39
3.6 Συστήματα αυτόματης αναγνώρισης οχήματος (AVIS).....	41
3.7 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN).....	43

3.8 Σύγκριση νέων μεθόδων.....	46
3.9 Παράρτημα.....	47
3.10 Βιβλιογραφία.....	48
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΛΛΟΓΗ FCD ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ AIMSUN.....	49
4.1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN.....	50
4.2 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	57
4.2.1 Μέτρα ακρίβειας μετρήσεων.....	57
4.2.2 Επιλογή σεναρίων προσομοίωσης.....	58
4.2.3 Μεθοδολογία επεξεργασίας αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	59
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	61
4.3.1 Πρώτη κατηγορία φωρατών.....	61
4.3.2 Δεύτερη κατηγορία φωρατών.....	65
4.4 Παράρτημα.....	68
4.5 Βιβλιογραφία.....	73
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LTE ΚΑΙ V2X ΤΥΠΟΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	74
5.1 Η τεχνολογία LTE.....	74
5.2 Υπολογισμός θέσης UE.....	77
5.3 Επικοινωνία τύπου V2X.....	80
5.4 Βιβλιογραφία.....	87
6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	88
6.1 Υπολογισμός αριθμού FCD μετρήσεων στο δίκτυο προσομοίωσης.....	88
6.2 Υπολογισμός τηλεπικοινωνιακού φορτίου στο δίκτυο προσομοίωσης.....	91
6.2.1 Τα ΙΕ που περιγράφουν τη θέση ενός UE εντός δοκιμαστικού οχήματος.....	92
6.2.2 Τα ΙΕ που περιγράφουν την ταχύτητα και τη χρονική στιγμή της μέτρησης ενός UE εντός δοκιμαστικού οχήματος.....	96
6.2.3 Υπολογισμός όγκου FCD δεδομένων.....	97
6.3 Συμπεράσματα.....	102
6.4 Παράρτημα.....	104
6.5 Βιβλιογραφία.....	105

Συντομογραφίες

2G/3G/4G/5G – 2nd/3rd/4th/5th Generation

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

API - Application Programming Interface

AVIS - Automatic Vehicle Identification Systems

D2D - Device to Device

E-CID - Enhanced Cell ID

eNB - evolved Node B

EPC - Evolved Packet Core

ETC - Electronic Toll Collection

ETSI - European Telecommunications Standards Institute

E-UTRA(N) - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (Network)

FCD - Floating Car/Cellular Data

FDD - Frequency Division Duplex

GNSS - Global Navigation Satellite Systems

GPS - Global Positioning System

ICT - Information and Communication Technologies

IE - Information Element

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP/IPv6 - Internet Protocol/Internet Protocol version 6

ITS - Intelligent Transportation Systems

Los - Line of Sight

LTE - Long Term Evolution

M2M - Machine to Machine

MAC - Media Access Control

MAE - Mean Absolute Error

MAPE - Mean Absolute Percentage Error

ME - Mean Error

MIMO - Multiple Input and Multiple Output

MSE - Mean Squared Error

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OTDOA - Observed (Downlink) Time Difference of Arrival

P2P - Peer to Peer

ProSe - Proximity-based services
RB - Resource Block
RE - Resource Element
RSU - Road Stationary Unit
TDD - Time Division Duplex
UDP - User Datagram Protocol
UE- User Equipment
UTDOA - Uplink Time Difference of Arrival
V2I - Vehicle to Infrastructure
V2N - Vehicle to Network
V2P - Vehicle to Pedestrian
V2V - Vehicle to Vehicle
V2X - Vehicle to Everything
VTL - Virtual Trip Line
WSN - Wireless Sensor Network
ΚΔΚ - Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Το σύστημα ανίχνευσης επαγωγικού βρόχου.....	16
Σχήμα 2.2. Η μαγνητική ανωμαλία που επάγεται στο πεδίο της Γης από ένα μαγνητικό δίπολο.....	18
Σχήμα 2.3. Παράδειγμα βιντεοκάμερας προσαρτημένης σε σύλλο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
Σχήμα 2.4. Τρόπος λειτουργίας και εγκατάστασης μικροκυματικού ραντάρ.....	20
Σχήμα 2.5. Παθητικός αισθητήρας με δυνατότητα ανίχνευσης πολλαπλών ζωνών.....	21
Σχήμα 2.6. Τρόπος λειτουργίας παθητικού υπέρυθρου αισθητήρα.....	22
Σχήμα 2.7. Υπέρυθρο ραντάρ δύο ακτίνων λέιζερ για κάθετη σάρωση του οδοστρώματος.....	23
Σχήμα 2.8. Παράδειγμα υπερηχητικού αισθητήρα τοποθετημένου σε ιστό άνω του οδοστρώματος.....	24
Σχήμα 2.9. Υπολογισμός χρόνου διαδρομής μέσω καταγραφής της πινακίδας κινούμενου οχήματος.....	26
Σχήμα 3.1. Τυπική δομή συστήματος καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων κάνοντας χρήση GPS.....	32
Σχήμα 3.2. Αρχή λειτουργίας κυψελωτού συστήματος καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων.....	35
Σχήμα 3.3. Τρόπος λειτουργίας ανιχνευτών Bluetooth προς καταγραφή κυκλοφοριακών δεδομένων.....	37
Σχήμα 3.4. Τρόπος λειτουργίας συστήματος ραδιοπλοήγησης.....	38
Σχήμα 3.5. Διαδικασία επικοινωνίας οχήματος με σύστημα αυτόματου εντοπισμού.....	40
Σχήμα 3.6. Διαδικασία ανίχνευσης οχήματος από AVIS.....	42
Σχήμα 3.7. Τρόποι τοποθέτησης αισθητήρων σε ένα WSN.....	44
Σχήμα 3.8. Τυπική αρχή λειτουργίας WSN για την καταγραφή κυκλοφοριακών δεδομένων.....	45
Σχήμα 4.1. Η περιοχή μελέτης στο προγραμματιστικό περιβάλλον του AIMSUN.....	50
Σχήμα 4.2. Η περιοχή μελέτης.....	51
Σχήμα 4.3. Διαδικασία ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ του AIMSUN και εξωτερικής εφαρμογής.....	52
Σχήμα 4.4. Αξιοποίηση API μεταξύ του AIMSUN και μιας εξωτερικής εφαρμογής.....	52
Σχήμα 4.5. Λογικό διάγραμμα συναρτήσεων <i>AAPIEnterVehicle</i> και <i>AAPIExitVehicle</i>	53
Σχήμα 4.6. Λογικό διάγραμμα συνάρτησης <i>AAPIPostManage</i>	54
Σχήμα 4.7. Τα δομικά οδικά στοιχεία ενός δικτύου στο AIMSUN.....	55
Σχήμα 4.8. Σενάριο για τον υπολογισμό της σχέσης (4.2).....	56
Σχήμα 4.9. Η μεταβολή του αριθμού των δοκιμαστικών οχημάτων εντός του δικτύου για όλα τα pr.....	59
Σχήμα 4.10. Η εικόνα του δικτύου προσομοίωσης για $pr = 2\%$ και $sf = 1\text{Hz}$	60
Σχήμα 4.11. Αντιπαραβολή των μετρήσεων των ταχυτήτων για τις δύο κατηγορίες φωρατών.....	65
Σχήμα 5.1. Η αρχιτεκτονική του LTE E-UTRAN.....	74
Σχήμα 5.2. Γενική αρχιτεκτονική της υποδομής ενός LTE δικτύου.....	75
Σχήμα 5.3. Δομή πλαισίου τύπου 1 (FDD) στο πεδίο του χρόνου.....	76
Σχήμα 5.4. Διαδικασία εύρεσης της θέσης ενός UE.....	79

Σχήμα 5.5. Στοίβα UE-τερματιζόμενων πρωτοκόλλων.....	79
Σχήμα 5.6. Στοίβα eNB-τερματιζόμενων πρωτοκόλλων.....	80
Σχήμα 5.7. Οι τέσσερις μορφές επικοινωνίας V2X.....	81
Σχήμα 5.8. Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου LTE που ενσωματώνει V2X υπηρεσίες.....	83
Σχήμα 5.9. V2I επικοινωνία οχήματος με RSU που υλοποιείται στον τοπικό eNB.....	84
Σχήμα 5.10. V2I επικοινωνία οχήματος με RSU τύπου UE.....	85
Σχήμα 6.1. Η μέση ταχύτητα του δικτύου προσομοίωσης.....	89
Σχήμα 6.2. Ο μέσος χρόνος διαδρομής του δικτύου προσομοίωσης.....	89
Σχήμα 6.3. Υπολογισμός της θέσης ενός ελλειψοειδούς σημείου.....	92
Σχήμα 6.4. Ένα ελλειψοειδές σημείο που περιβάλλεται από ακτίνα αμφιβολίας.....	93
Σχήμα 6.5. Ένα ελλειψοειδές σημείο που περιβάλλεται από έλλειψη αμφιβολίας.....	93
Σχήμα 6.6. Υπολογισμός της θέσης ενός UE εντός πολυγώνου πέντε κορυφών.....	94
Σχήμα 6.7. Θέση ελλειψοειδούς σημείου με ύψος.....	94
Σχήμα 6.8. Ελλειψοειδές σημείο με ύψος εντός έλλειψης αμφιβολίας.....	95
Σχήμα 6.9. Υπολογισμός της θέσης ενός UE εντός ελλειψοειδούς τόξου.....	95
Σχήμα 6.10. Υπολογισμός της οριζόντιας ταχύτητας ενός κινούμενου UE.....	96
Σχήμα 6.11. Η οριζόντια ταχύτητα ενός κινούμενου UE εντός κύκλου αμφιβολίας.....	96
Σχήμα 6.12. Το ποσοστό χρησιμοποίησης της uplink ζώνης των 5MHz.....	101
Σχήμα 6.13. Παράδειγμα σύνταξης ενός IE κατά ASN.1.....	105

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1. Σύγκριση συμβατικών μεθόδων καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων.....	27
Πίνακας 3.1. Σύγκριση νέων μεθόδων καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων.....	46
Πίνακας 4.1. Στατιστικά δεδομένα για τον αριθμό των δοκιμαστικών οχημάτων εντός του δικτύου.....	59
Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης για την πρώτη ομάδα φωρατών.....	62
Πίνακας 4.3. Κανονικοποίηση σφαλμάτων ως προς τις τιμές σφαλμάτων για $pr = 0.5\%$ και $sf = 1\text{Hz}$	63
Πίνακας 4.4. Ποσοστό μεταβολής του MAPE για κάθε σενάριο προσομοίωσης.....	63
Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη δεύτερη ομάδα φωρατών.....	66
Πίνακας 4.6. Ποσοστό μεταβολής του MAPE για κάθε σενάριο προσομοίωσης.....	67
Πίνακας 5.1. Τιμές για τα RB, RE και τα σύμβολα πληροφορίας.....	76
Πίνακας 5.2. Τιμές για το διαθέσιμο εύρος ζώνης αποστολής δεδομένων σε μία χρονοσχισμή.....	77
Πίνακας 5.3. Μονάδα υπολογισμού τελικής θέσης ενός UE ανάλογα της χρησιμοποιούμενης τεχνικής...78	
Πίνακας 5.4. Ζώνη συχνοτήτων για V2X επικοινωνίες μέσω της διεπαφής PC5.....	85
Πίνακας 5.5. Ζώνη συχνοτήτων για V2X επικοινωνίες μέσω της διεπαφής LTE-Uu.....	85
Πίνακας 5.6. Συνδυασμός inter-band συχνοτήτων για V2X επικοινωνίες.....	86
Πίνακας 5.7. Επιτρεπτό εύρος ζώνης συχνοτήτων εντός μιας V2X ζώνης.....	86
Πίνακας 5.8. Μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων για όλα τα inter-band φέροντα.....	87
Πίνακας 6.1. Συνολικός αριθμός FCD μετρήσεων για κάθε σενάριο προσομοίωσης.....	88
Πίνακας 6.2. Συνολικός αριθμός FCD μετρήσεων για υψηλή και μέση πυκνότητα κυκλοφορίας.....	91
Πίνακας 6.3. Τα διάφορα IΕ που καθορίζουν τον τρόπο περιγραφής της θέσης ενός UE.....	92
Πίνακας 6.4. Τα διάφορα IΕ που καθορίζουν τον τρόπο περιγραφής της ταχύτητας ενός UE.....	96
Πίνακας 6.5. Όγκος και ρυθμός αποστολής FCD δεδομένων στην περίπτωση υψηλής πυκνότητας.....	98
Πίνακας 6.6. Όγκος και ρυθμός αποστολής FCD δεδομένων στην περίπτωση μέσης πυκνότητας.....	98
Πίνακας 6.7. Θεωρητικός και διαθέσιμος ρυθμός uplink μετάδοσης δεδομένων για εύρος 1.4MHz.....	100
Πίνακας 6.8. Θεωρητικός και διαθέσιμος ρυθμός uplink μετάδοσης δεδομένων για εύρος 5MHz.....	100

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

1.1 Διαχείριση Κυκλοφορίας

Η χρήση οχημάτων για τη μετακίνηση ανθρώπων και εμπορευμάτων αποτελεί, πλέον, σύνηθες φαινόμενο. Η ευρεία χρήση των οχημάτων, όμως, έχει προκαλέσει μεγάλα κυκλοφοριακά προβλήματα, ειδικά σε πόλεις με μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα, γεγονός που καθιστά επιτακτική τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Βασικοί στόχοι της κυκλοφοριακής διαχείρισης αποτελούν η ρύθμιση της κυκλοφορίας των οχημάτων που χρησιμοποιούν το οδικό δίκτυο και, δευτερευόντως, η ασφάλεια και η αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση των πεζών που το χρησιμοποιούν.

Παλαιότερα, η ορθή σχεδίαση και κατασκευή του οδικού δικτύου αρκούσε για την ομαλή μεταφορά ανθρώπων και αγαθών. Πλέον, όμως, το τεράστιο και συνεχώς αυξανόμενο πλήθος οχημάτων καθιστά επιτακτική ανάγκη τη σωστή διαχείριση του οδικού δικτύου και μετά από την κατασκευή του. Πρέπει, δηλαδή, να είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση της κυκλοφοριακής ροής και, σε πολλές περιπτώσεις, η πρόβλεψή της. Η κυκλοφοριακή ροή μπορεί να θεωρηθεί ως δυναμικός παράγοντας, η μελέτη και διαστασιολόγηση του οποίου θα οδηγήσει στην καλύτερη κατανόησή του, με τελικό στόχο τη ρύθμισή του υπό ομαλές συνθήκες αλλά και τη διαχείριση έκτακτων περιστατικών.

Για να πραγματοποιούνται, βεβαίως, λειτουργίες όπως η συνεχής παρακολούθηση της κυκλοφορίας ή η άμεση λήψη μέτρων μετά από κάποιο έκτακτο περιστατικό, είναι απαραίτητη η ενίσχυση του κέντρου διαχείρισης κυκλοφορίας (ΚΔΚ) με νέες προηγμένες συσκευές πέραν των παραδοσιακών (σηματοδότες, σήμανση κτλ). Απώτερος στόχος αποτελεί η πρόσδοση ευφυίας στο σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας, που θα επιτρέψει την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των διαφόρων κυκλοφοριακών προβλημάτων. Επιπλέον, θα απαλλαγεί ο ανθρώπινος παράγοντας από την επιτέλεση εργασιών που χαρακτηρίζονται ανιαρές, αδύνατες ή απαιτούν απαγορευτικά υψηλό αριθμό εργαζομένων, και θα του επιτραπεί να επικεντρωθεί σε σημαντικότερες λειτουργίες και, κυρίως, στον έλεγχο της εύρυθμης λειτουργίας του συστήματος.

Ενδεικτικά, κλειστό κύκλωμα από βιντεοκάμερες μπορεί να παρακολουθεί συγκεκριμένα τμήματα του οδικού δικτύου και να υποδεικνύει σε συνθήκες πραγματικού χρόνου σημεία όπου παρατηρείται κυκλοφοριακή συμφόρηση ή έχει συμβεί κάποιο ατύχημα. Παρομοίως, χρήση συσκευών που θα αποτιμούν τη ροή της κυκλοφορίας, θα συμβάλλουν στην πρόβλεψη χρόνων κίνησης και στην ενημέρωση των οδηγών για πιθανές καθυστερήσεις. Καθίσταται, λοιπόν, σαφές ότι παράλληλα με το βασικό σύστημα ρύθμισης της κυκλοφορίας πρέπει να λειτουργεί και ένα άλλο σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης της κυκλοφοριακής ροής, το ΚΔΚ.

Η χρήση συστημάτων που βασίζονται σε τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών (Information and Communication Technologies - ICT) επιτρέπουν την κατασκευή και λειτουργία ευφών συστημάτων μεταφοράς (Intelligent Transportation Systems - ITS). Βασικός στόχος των τελευταίων αποτελεί η υποβοήθηση στη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών και η ασφαλέστερη και αποδοτικότερη αξιοποίηση των οδικών υποδομών και των μεταφορικών μέσων (οχήματα, αεροπλάνα κά).

1.2 Αρχιτεκτονική κέντρου διαχείρισης κυκλοφορίας

Στα περισσότερα ΚΔΚ υπάρχει μια βασική υποδομή διαχείρισης της κυκλοφορίας που είναι εγκατεστημένη επί του οδικού δικτύου και αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Υποσύστημα διαχείρισης φωτεινών σηματοδοτών
- Κύκλωμα ενημερωτικών πινακίδων
- Κλειστό κύκλωμα παρακολούθησης της κυκλοφορίας
- Υποσύστημα καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων
- Υποσύστημα επεξεργασίας και ανάλυσης κυκλοφοριακών δεδομένων

Τα ανωτέρω υποσυστήματα βοηθούν το ΚΔΚ να πραγματοποιήσει τις τρεις βασικές του λειτουργίες:

(i) Την ανίχνευση των κυκλοφοριακών συνθηκών

Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται μέσω του υποσυστήματος καταγραφής της ροής της κίνησης, το οποίο διαθέτει εξειδικευμένες συσκευές καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων, όπως επαγωγικούς βρόχους, βιντεοανιχνευτές κ.ά. Οι συσκευές αυτές ρυθμίζονται να καταγράφουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα πληθώρα κυκλοφοριακών δεδομένων, όπως την ταχύτητα κάθε οχήματος, τον αριθμό των οχημάτων που διέρχονται από ένα τμήμα αυτοκινητοδρόμου κ.ά.

(ii) Την επεξεργασία των κυκλοφοριακών δεδομένων που συλλέγονται

Ο όγκος των δεδομένων που συγκεντρώνεται μεταφέρεται στο κέντρο επεξεργασίας της οδικής πληροφορίας, όπου έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία εξάγεται μια γενικότερη εικόνα των κυκλοφοριακών συνθηκών. Η ποιοτική ανάλυση της κυκλοφορίας οδηγεί στην εκτίμηση της ροής της κίνησης, στον προσεγγιστικό υπολογισμό χρόνων διαδρομής αλλά και στην ανίχνευση πιθανών σημείων συμφόρησης. Στο τελευταίο, συμβάλλει ουσιωδώς το κλειστό κύκλωμα παρακολούθησης κυκλοφορίας.

(iii) Την απόκριση του συστήματος, δηλαδή, τη λήψη διαχειριστικών και διορθωτικών ενεργειών

Έχοντας, πλέον, στη διάθεσή του τα προαναφερθέντα δεδομένα, το ΚΔΚ είναι σε θέση να επέμβει δυναμικά για τη διαχείριση της κυκλοφορίας ή την αντιμετώπιση εκτάκτων περιστατικών αλλά και για την ενημέρωση των οδηγών. Προς τούτο, διαχειρίζεται κατάλληλα τα υποσυστήματα φωτεινών σηματοδοτών και ενημερωτικών πινακίδων.

Για τη διασφάλιση της απρόσκοπτης και αρτιότερης λειτουργίας του ΚΔΚ, τα ανωτέρω υποσυστήματα οφείλουν να συνεργάζονται μεταξύ τους. Έτσι, πρέπει να είναι κατάλληλα διασυνδεδεμένα. Οφείλουν, επίσης, να ανταποκρίνονται δυναμικά στα διάφορα συμβάντα που ενδέχεται να εμφανιστούν. Οπότε, πρέπει να ελέγχονται κεντρικά από το ΚΔΚ. Αποτελεί, συνεπώς, κομβικής σημασίας η ποιότητα του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που εξυπηρετεί την επικοινωνία τόσο μεταξύ του ΚΔΚ με τα διάφορα υποσυστήματά του, όσο και μεταξύ του ΚΔΚ με τα άλλα διαχειριστικά κέντρα δημόσιων και ιδιωτικών οργανισμών (πχ. διαχειριστικό κέντρο ΕΚΑΒ ή αστυνομίας).

Με βάση την κατεύθυνση μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με το ΚΔΚ, διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- Μετάδοση των δεδομένων κυκλοφορίας που συλλέγονται από τους μετρητικούς κόμβους προς το ΚΔΚ (μετάδοση uplink).
- Διάχυση της χρήσιμης κυκλοφοριακής πληροφορίας που παράγεται από το ΚΔΚ (μετάδοση downlink).

Με κριτήριο αναφοράς την προέλευση-προορισμό πληροφορίας σε σχέση με το σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας, διακρίνονται οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

- **Ενδο-συστημική επικοινωνία (Intra-system communication):** Περιλαμβάνει τους σταθερούς κόμβους του συστήματος (φωρατές, κάμερες, υποσυστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας και πληροφόρησης) που επικοινωνούν με το ΚΔΚ κατά ενσύρματο τρόπο και αφορούν, κυρίως, uplink μετάδοση δεδομένων, εσωτερικών του συστήματος διαχείρισης της κυκλοφορίας. Αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως Center to Field (C2F) Communication.
- **Δια-συστημική επικοινωνία (Inter-system communication):** Πρόκειται για την επικοινωνία του ΚΔΚ με συναρμόδιους φορείς, η οποία, εκτός από την επικοινωνία με τα αντίστοιχα κέντρα των συναρμόδιων φορέων (Peer to Peer - P2P επικοινωνία μεταξύ σταθερών κόμβων), μπορεί να περιλαμβάνει και κινητούς κόμβους που επικοινωνούν με το σύστημα με ασύρματο τρόπο. Δια-συστημική διακίνηση πληροφορίας προβλέπεται τόσο για τη συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων (uplink) όσο και για τη διάχυση της κυκλοφοριακής πληροφορίας (downlink). Αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως Center to Center (C2C) Communication.
- **Εξω-συστημική επικοινωνία (Extra-system communication):** Αφορά επικοινωνία του ΚΔΚ (i) με τους πολίτες, είτε μέσω SMS (επικοινωνία με κινητούς κόμβους) είτε μέσω του Διαδικτύου και (ii) με εξουσιοδοτημένους από/συμβεβλημένους με την Περιφέρεια παρόχους κυκλοφοριακών υπηρεσιών (επικοινωνία μεταξύ σταθερών κόμβων).

1.3 Συλλογή Κυκλοφοριακών Δεδομένων

Η παρούσα εργασία εστιάζει, κυρίως, στο υποσύστημα καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων και στις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις που απαιτεί η ενδοσυστημική επικοινωνία τως συσκευών καταγραφής με το ΚΔΚ.

1.3.1 Κατηγοριοποίηση κυκλοφοριακών δεδομένων

Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα παρέχουν τη δυνατότητα συλλογής διαφόρων κυκλοφοριακών δεδομένων από τους κόμβους καταγραφής.

Όγκος Κυκλοφορίας

Ουσιαστικά, μετράται ο αριθμός των διερχομένων οχημάτων μέσω συγκεκριμένου τμήματος του οδικού δικτύου επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Με κριτήριο την ακρίβεια της πληροφορίας που επιθυμεί να συλλέξει ο διαχειριστής, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο καταγράφεται η πυκνότητα της κυκλοφορίας γενικά ποικίλλει και μπορεί να κυμαίνεται από μερικά λεπτά μέχρι μερικούς μήνες. Το συγκεκριμένο είδος μέτρησης θεωρείται ως η βασικότερη πληροφορία που πρέπει να διαθέτει το κέντρο διαχείρισης και το υποβοηθά να προσδιορίσει τον βαθμό χρήσης των διαφόρων τμημάτων του οδικού δικτύου.

Συχνότητα Κυκλοφορίας

Και αυτό το είδος μέτρησης καταγράφει τον αριθμό των οχημάτων που διέρχονται από συγκεκριμένο τμήμα του οδικού δικτύου. Αποδίδει, ωστόσο, μεγαλύτερη σημασία στο χρόνο κατά τον οποίο αυτή η

διέλευση συντελείται και λιγότερο στον συνολικό όγκο της κίνησης. Συγκεκριμένα, μετράται ο αριθμός των οχημάτων ανά μονάδα χρόνου, κάτι που συνήθως εκφράζεται σε οχήματα/ώρα. Η συγκεκριμένη μέτρηση, η οποία γενικά λαμβάνεται με μικρότερη συχνότητα σε σχέση με την αντίστοιχη του όγκου κίνησης, συμβάλλει στον χαρακτηρισμό της κίνησης κατά δυναμικό τρόπο. Η συχνότητα διέλευσης των οχημάτων από συγκεκριμένο τμήμα του οδικού δικτύου, καθώς και ο τρόπος που αυτή μεταβάλλεται, αποτελούν ισχυρή ένδειξη πιθανής κυκλοφοριακής συμφόρησης και ειδοποιούν το ΚΔΚ να πραγματοποιήσει τις απαραίτητες ενέργειες.

Ταχύτητα Οχημάτων

Με χρήση κατάλληλων συσκευών είναι δυνατή η μέτρηση της ταχύτητας ενός οχήματος που διέρχεται μέσω συγκεκριμένου τμήματος του οδικού δικτύου. Η μέση ταχύτητα ενός οχήματος είναι η μέση χρονική τιμή της ταχύτητας με την οποία αυτό κινείται επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και περιγράφεται από τη σχέση:

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{T} \quad (1.1)$$

όπου v_i η ταχύτητα ενός οχήματος κατά τη χρονική στιγμή t_i και T η συνολική διάρκεια καταγραφής. Για τη συνολική περιγραφή της κίνησης των οχημάτων χρησιμοποιούνται τρία μέτρα ταχύτητας:

- Η μέση χρονική ταχύτητα (time-mean speed) αποτελεί τον αριθμητικό μέσο της μέσης ταχύτητας των οχημάτων που διέρχονται από συγκεκριμένο σημείο του οδικού δικτύου και επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η σχέση που δίνει τη μέση χρονική ταχύτητα είναι:

$$\bar{v}_{tms} = \frac{\sum \bar{v}_n}{N} \quad (1.2)$$

όπου N ο αριθμός των διερχομένων οχημάτων και \bar{v}_n η μέση ταχύτητα του n -οστού οχήματος.

- Η μέση χωρική ταχύτητα (space-mean speed) αποτελεί τη μέση ταχύτητα όλων των οχημάτων που κινούνται κατά μήκος συγκεκριμένου τμήματος του οδικού δικτύου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Υπολογίζεται διαιρώντας το μήκος του επιλεγμένου τμήματος με τον απαιτούμενο μέσο χρόνο διέλευσής του ως:

$$\bar{v}_{sms} = \frac{d}{\frac{1}{N} \sum t_n} = \frac{N \cdot d}{\sum t_n} \quad (1.3)$$

όπου d το μήκος του τμήματος του οδικού δικτύου και t_n ο απαιτούμενος χρόνος διέλευσης του n -οστού οχήματος.

- Η μέση ταχύτητα κίνησης (average running speed) υπολογίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με τη μέση χωρική ταχύτητα, με τη διαφορά ότι ο μέσος χρόνος κίνησης αποτελείται από τον μέσο καθαρό χρόνο κίνησης ενός οχήματος αγνοώντας χρονικά διαστήματα κατά τα οποία αυτό ενδέχεται να είναι ακινητοποιημένο. Η σχέση που δίνει τη μέση ταχύτητα κίνησης είναι:

$$\bar{v}_r = \frac{d}{\frac{1}{N} \sum t_r} = \frac{N \cdot d}{\sum t_r} \quad (1.4)$$

όπου t_r ο καθαρός χρόνος κίνησης του n-οστού οχήματος.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η μέση χρονική ταχύτητα δίνει έμφαση στη δυναμική συμπεριφορά της ταχύτητας των οχημάτων που διέρχονται από συγκεκριμένο σημείο, ενώ η μέση χωρική ταχύτητα αντανακλά τη μέση ταχύτητα σε τμήμα οδικού δικτύου και αποτελεί τη συχνότερα μετρούμενη ταχύτητα.

Η μέτρηση της ταχύτητας οχημάτων είναι περισσότερο σύνθετη από τη μέτρηση άλλων κυκλοφοριακών δεδομένων. Ωστόσο, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του ρυθμού με τον οποίο κινείται ή μεταβάλλεται η ροή των οχημάτων. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς αποτελεί σημαντική παράμετρο για την πρόβλεψη κυκλοφοριακών καταστάσεων ή και έκτακτων περιστατικών.

Κατηγοριοποίηση Οχημάτων

Με κατάλληλο συνδυασμό των στοιχείων που καταγράφονται για κάθε όχημα είναι δυνατή η εξακρίβωση χαρακτηριστικών του όπως:

- Το μήκος του
- Η απόσταση μεταξύ των αξόνων του (μεταξόνιο)
- Το βάρος του

Η γνώση των ανωτέρω χαρακτηριστικών επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των οχημάτων σε κλάσεις (πχ μεγάλα φορτηγά, αυτοκίνητα κτλ.) και παρέχει ακριβέστερη εικόνα ως προς την ποικιλία των οχημάτων που χρησιμοποιεί συγκεκριμένο τμήμα του οδικού δικτύου.

1.3.2 Τρόπος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές και συστήματα καταγραφής επιλεγμένων κυκλοφοριακών στοιχείων. Η ανάγκη συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων έχει ωθήσει πλήθος εταιρειών στην κατασκευή μεγάλου αριθμού συσκευών καταγραφής. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, με τη συμβολή των ICT, νέες τεχνολογίες αρχίζουν να χρησιμοποιούνται, υποβοηθώντας τις ήδη υπάρχουσες ή και αντικαθιστώντας ορισμένες εξ αυτών. Επίσης, αρκετές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε άλλους επιστημονικούς τομείς διερευνώνται ως προς το κατά πόσο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή δεδομένων κίνησης. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη να διαχωριστούν οι μέθοδοι συλλογής δεδομένων σε δύο κατηγορίες, τις συμβατικές και τις νέες. Οι πρώτες αποτελούν τις παραδοσιακές τεχνικές πραγματοποίησης κυκλοφοριακών μετρήσεων και η χρήση τους τις τελευταίες δεκαετίες είναι ευρεία. Στηρίζονται, κυρίως, σε συσκευές καταγραφής που εγκαθίστανται πλησίον ή εντός του οδοστρώματος. Οι νέες τεχνολογίες έχουν αναδυθεί την τελευταία δεκαετία και έχουν γνωρίσει σημαντική επιτυχία χάρη στην ευελιξία τους. Κατά κύριο λόγο βασίζονται στη χρήση εξελιγμένων ηλεκτρονικών συσκευών καταγραφής και στη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών, αλλά και μεταξύ των συσκευών με την υποδομή του ΚΔΚ. Και οι δύο κατηγορίες θα αναλυθούν περαιτέρω στα κεφάλαια που ακολουθούν.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι συμβατικές μέθοδοι καταγραφής δεδομένων βασίζονται, κυρίως, στην αξιοποίηση διαφόρων τύπων αισθητήρων και καμερών. Οι αισθητήρες μέτρησης αποτελούν διατάξεις που διαθέτουν δυνατότητα καταγραφής, έκαστος με τον δικό του τρόπο, κυκλοφοριακών δεδομένων από το περιβάλλον και επεξεργασίας αυτών. Για τον λόγο αυτό, διαθέτουν, συνήθως, προσαρτημένο μικροεπεξεργαστή. Με κριτήριο τη θέση εγκατάστασης των αισθητήρων καταγραφής, αυτοί διακρίνονται σε:

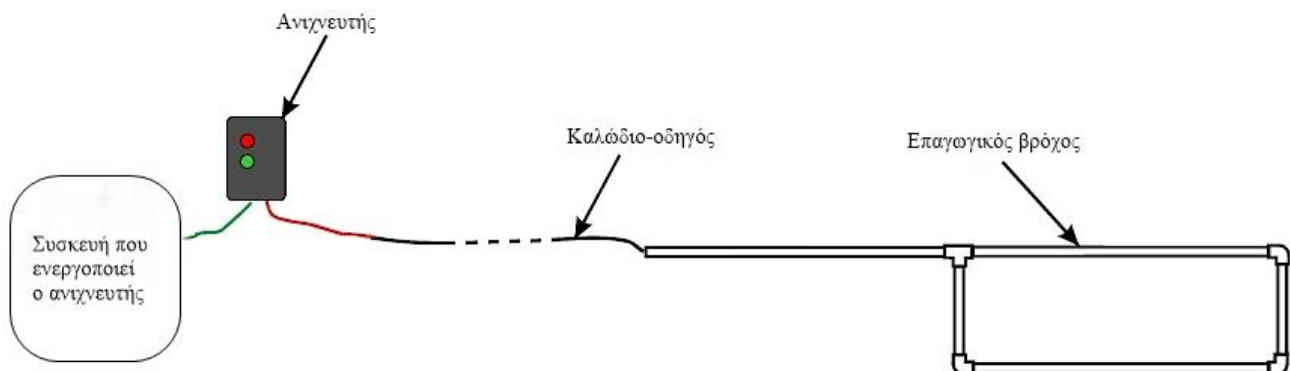
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι επί του οδοστρώματος (in-roadway sensors). Εγκαθίστανται, συνήθως, εντός του πεζοδρομίου ή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος είτε πάνω σε αυτή, σε ειδικές θήκες.
- Αισθητήρες εγκατεστημένοι υπεράνω του οδοστρώματος (over-roadway sensors). Πρόκειται για αισθητήρες που συνήθως εγκαθίστανται σε ιστούς που βρίσκονται πάνω από το οδόστρωμα ή κατά μήκος αυτού σε σχετικά μικρή απόσταση.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι κυριότεροι αισθητήρες καταγραφής δεδομένων που χρησιμοποιούνται εμπορικά.

2.1 Αισθητήρες επί του οδοστρώματος

2.1.1 Ανιχνευτές επαγωγικού βρόχου (inductive loop detectors)

Θεωρούνται οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες καταγραφής δεδομένων κυκλοφορίας. Το σχετικό σύστημα, που απεικονίζεται και στο Σχ. 2.1, αποτελείται από 3 μέρη: (i) τον επαγωγικό βρόχο, (ii) το καλώδιο-οδηγό και (iii) τον ανιχνευτή.



Σχήμα 2.1. Το σύστημα ανίχνευσης επαγωγικού βρόχου [τροποποιήθηκε κατάλληλα από www.marshproducts.com].

Ο επαγωγικός βρόχος δημιουργείται με χρήση μονωμένου σύρματος χαλκού που τοποθετείται στο άνω επίπεδο του οδοστρώματος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζει κλειστή διαδρομή-βρόχο, δηλαδή, το ένα άκρο του σύρματος συνδέεται με το άλλο. Το σύρμα τυλίγεται σπειροειδώς ώστε να σχηματίσει ένα πηνίο-επαγωγέα. Ο βρόχος επικοινωνεί με τον ανιχνευτή μέσω του καλωδίου-οδηγού, το οποίο επιτρέπει την εξ αποστάσεως επιτήρηση του επαγωγικού βρόχου.

Η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος στηρίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Μέσω του καλωδίου, το κύκλωμα του ανιχνευτή τροφοδοτεί με ρεύμα τον επαγωγικό βρόχο. Καθώς διαρρέεται από ρεύμα, ο βρόχος επάγει μαγνητικές γραμμές κυκλικές και κάθετες στο πεδίο του ρεύματος που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο. Το συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο έχει την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα του ρεύματος της πηγής που το δημιούργησε και, γενικά, θεωρείται σταθερό απουσία οχήματος πάνω από τον βρόχο. Τα οχήματα, ωστόσο, είναι κατά βάση μεταλλικές κατασκευές, οπότε η διέλευσή τους πάνω από τον βρόχο προκαλεί αντίθετης κατεύθυνσης μαγνητικό πεδίο στο μεταλλικό τμήμα των οχημάτων, το οποίο αλληλεπιδρά με αυτό του επαγωγικού βρόχου και μεταβάλλει (μειώνει) την τιμή της επαγωγής του. Η τελευταία μεταβολή θέτει σε λειτουργία το κύκλωμα του μετρητή μέσω του κλεισίματος ενός ηλεκτρονόμου. Μετά τη διέλευση του οχήματος υπεράνω του βρόχου, ο ηλεκτρονόμος ανοίγει και πάλι, οπότε και η επαγωγή επιστρέφει στην τιμή ηρεμίας.

Πλεονεκτήματα: Λόγω της ευρείας εμπορικής χρήσης τους, οι επαγωγικοί βρόχοι αποτελούν ώριμη τεχνολογία καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων. Επίσης, το κόστος αγοράς τους είναι σχετικά μικρό, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών. Επιπλέον, η ακρίβεια των μετρήσεων που παρέχουν συγκριτικά με άλλες παραδοσιακές τεχνικές είναι αυξημένη. Τέλος, η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τις κλιματικές ή μετεωρολογικές συνθήκες του περιβάλλοντος (βροχή, χιόνι κτλ).

Μειονεκτήματα: Η εγκατάσταση και συντήρηση των επαγωγικών βρόχων απαιτεί τη διακοπή της κυκλοφορίας. Επίσης, η ορθή λειτουργία τους προϋποθέτει την εγκατάστασή τους σε οδόστρωμα καλής ποιότητας. Εξάλλου, τόσο ο βρόχος όσο και το καλώδιο-οδηγός υφίστανται συνεχή καταπόνηση λόγω της διέλευσης των οχημάτων, κάτι που μειώνει τον κύκλο ζωής τους. Επομένως, τόσο η εγκατάσταση όσο και η συντήρηση των επαγωγικών βρόχων αποτελούν διαδικασίες με σημαντικό οικονομικό κόστος. Τέλος, η ανάγκη επιτήρησης μεγάλου τμήματος αυτοκινητοδρόμου συνήθως απαιτεί την εγκατάσταση σημαντικού αριθμού επαγωγικών βρόχων, διαδικασία που ενέχει σημαντικό οικονομικό κόστος.

2.1.2 Πνευματικοί σωλήνες (pneumatic tubes)

Αποτελούν σωλήνες από καουτσούκ (λάστιχο) που φέρουν στο εσωτερικό τους πεπιεσμένο αέρα και εγκαθίστανται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, κάθετα προς την κατεύθυνση της κυκλοφορίας. Η πίεση που ασκεί ένα διερχόμενο όχημα στον σωλήνα έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση του αέρα στο εσωτερικό του. Η μεταβολή αυτή ανιχνεύεται και καταγράφεται από ειδικό μετρητή τοποθετημένο στο άκρο του σωλήνα.

Η κατάλληλη τοποθέτηση πολλαπλών πνευματικών σωλήνων επιτρέπει τη μέτρηση πρόσθετων κυκλοφοριακών δεδομένων, πέραν της απλής καταγραφής του αριθμού των διερχομένων οχημάτων. Για παράδειγμα, η παράλληλη τοποθέτηση σωλήνων σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις και η χρήση κοινού μετρητή στο άκρο τους, παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της μέσης ταχύτητας ή και του μέσου μήκους συγκεκριμένου οχήματος.

Πλεονεκτήματα: Κυριότερα πλεονεκτήματα των πνευματικών σωλήνων αποτελούν η ευκολία εγκατάστασης και συντήρησης, το σχετικά μικρό κόστος και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Μειονεκτήματα: Οι πνευματικοί σωλήνες εμφανίζουν λανθασμένους υπολογισμούς μεταξονίου υψηλών οχημάτων (λεωφορείων, φορτηγών κá) όταν ο όγκος κίνησης είναι σημαντικός. Επίσης, ο ειδικός αισθητήρας αέρα που φέρουν είναι ευαίσθητος στις μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας.

2.1.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες (piezo-electric sensors)

Είναι αισθητήρες που εκμεταλλεύονται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, με βάση το οποίο ορισμένα στερεά υλικά έχουν τη δυνατότητα να ηλεκτρίζονται υπό την πίεση μηχανικής δύναμης. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί, δηλαδή, έναν τρόπο μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

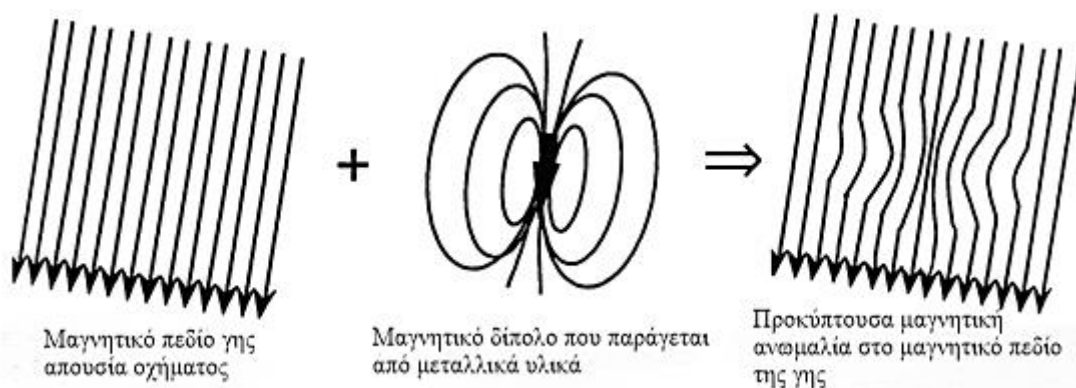
Οι αισθητήρες αυτοί περιέχουν πιεζοηλεκτρικό υλικό, συνήθεστερα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, και τοποθετούνται σε ειδικές μεμβράνες εντός του οδοστρώματος, κάθετα στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας. Η μηχανική πίεση που προκαλεί η διέλευση ενός οχήματος πάνω από την επιφάνεια του αισθητήρα συμπιέζει το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Η μεταβολή αυτή της πυκνότητας φορτίου του υλικού οδηγεί στην πόλωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού και μεταβάλλει την τάση που καταγράφεται στους ακροδέκτες του αισθητήρα.

Πλεονεκτήματα: Καθώς αποτελούν αισθητήρες που ανιχνεύουν διερχόμενο όχημα από την πίεση που αυτό ασκεί στο οδόστρωμα, μπορούν να ανιχνεύσουν με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια κάθε άξονα ενός οχήματος, από την πίεση που αυτός ασκεί. Πέραν της ακρίβειας μέτρησης της ταχύτητας, η ακρίβεια στην ανίχνευση των αξόνων και στη μέτρηση του βάρους ενός οχήματος οδηγεί σε ακριβή εύρεση της κλάσης του.

Μειονεκτήματα: Τα γενικά μειονεκτήματα των αισθητήρων αυτών είναι η ανάγκη διακοπής της κυκλοφορίας, είτε κατά την εγκατάσταση είτε κατά την επισκευή τους, αλλά και η αναγκαία ποιότητα του οδοστρώματος για την ορθή λειτουργία τους. Τέλος, η θερμοκρασία του οδοστρώματος αλλά και η υψηλή ταχύτητα διερχομένων οχημάτων ενδέχεται να οδηγήσουν σε λάθος μετρήσεις.

2.1.4 Μαγνητικοί αισθητήρες (magnetic sensors)

Είναι συσκευές που βασίζουν τη λειτουργία τους στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της Γης κατά τη διέλευση ενός οχήματος από το πεδίο τους. Ουσιαστικά αποτελούν μαγνήτες που αλλάζουν προσανατολισμό εξαιτίας της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου της Γης, την οποία προκαλεί η μεταλλική μάζα του οχήματος. Η μεταβολή αυτή καταγράφεται ως παραγωγή τάσης στα άκρα του ηλεκτρικού κυκλώματος που διαθέτει ενσωματωμένο ο αισθητήρας.



Σχήμα 2.2. Η μαγνητική ανωμαλία που επάγεται στο πεδίο της γης από ένα μαγνητικό δίπολο [1].

Πλεονεκτήματα: Αποτελούν συσκευές περισσότερο ανθεκτικές στην καταπόνηση από τη διέλευση οχημάτων συγκριτικά με άλλες συσκευές καταγραφής, πχ. σε σύγκριση με τους επαγωγικούς βρόχους. Επιπλέον, μπορούν να εγκατασταθούν πάνω στο οδόστρωμα σε τμήματα όπου αποφεύγεται η εγκατάσταση επαγωγικών βρόχων, όπως στις γέφυρες.

Μειονεκτήματα: Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες δεν είναι γενικά σε θέση να ανιχνεύσουν την παρουσία σταματημένων οχημάτων στο πεδίο τους, αλλά μόνο διερχομένων. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο ανίχνευσης των αισθητήρων αυτών είναι γενικά μικρό, οδηγώντας σε αδυναμία ανίχνευσης ορισμένων οχημάτων όταν η ροή της κίνησης είναι πυκνή. Τέλος, και για τον συγκεκριμένο τύπο αισθητήρων, η εγκατάστασή του απαιτεί διακοπή της κυκλοφορίας.

2.2 Αισθητήρες υπεράνω του οδοστρώματος

2.2.1 Επεξεργαστές εικόνας βίντεο (video image processors)

Η βιντεοκάμερα είναι ηλεκτρονική συσκευή που διαθέτει δυνατότητα καταγραφής οπτικοακουστικού υλικού από το περιβάλλον όπου εγκαθίσταται. Η δυνατότητα εγκατάστασης καμερών κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα δίκτυο, και συντονισμένα να καταγράφουν και να μεταδίδουν υλικό στο ΚΔΚ, αποτέλεσε κίνητρο για τη χρήση τους και στο οδικό δίκτυο, κυρίως για τη συνεχή επιτήρησή του.

Το υλικό που συγκεντρώνουν και καταγράφουν οι κάμερες μεταδίδεται στο ΚΔΚ όπου, έπειτα από κατάλληλη ανάλυση και επεξεργασία, μετατρέπεται σε χρήσιμη πληροφορία. Η ανίχνευση των οχημάτων βασίζεται σε ιδιότητες του χρώματος και συγκεκριμένα στις διακυμάνσεις του γκρι στα καρέ του βίντεο, τις οποίες εξελιγμένοι αλγόριθμοι είναι σε θέση να εντοπίσουν και κατηγοριοποιήσουν καταλλήλως.



Σχήμα 2.3. Παράδειγμα βιντεοκάμερας προσαρτημένης σε στύλο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [www.gatewayguide.com].

Πλεονεκτήματα: Επαρκής αριθμός βιντεοκαμερών και εγκατάστασή τους σε κατάλληλο ύψος πάνω από το οδόστρωμα προσφέρουν υψηλή ακρίβεια μετρήσεων. Επιπλέον, νέοι αλγόριθμοι επεξεργασίας των

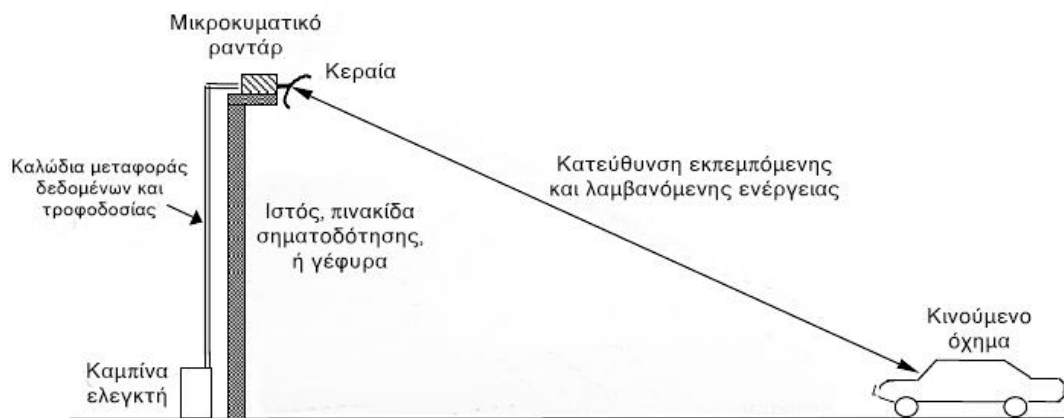
σημάτων που συγκεντρώνουν οι βιντεοκάμερες, βελτιώνουν περαιτέρω την ανίχνευση διερχομένων οχημάτων.

Μειονεκτήματα: Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ευαίσθητη στις συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον και στο οδόστρωμα. Αντίξοες καιρικές συνθήκες, ανεπαρκής φωτισμός του οδοστρώματος, υψηλά αντικείμενα εντός της εμβέλειας της βιντεοκάμερας, αποτελούν μερικούς από τους λόγους που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ακρίβεια της μεθόδου. Επιπλέον, ειδικά σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας, η ανάγκη ακρίβειας μετρήσεων απαιτεί την εγκατάσταση των καμερών πάνω σε ιστούς ύψους ακόμα και άνω των 15 μέτρων. Τέλος, το κόστος αγοράς και λειτουργίας καμερών είναι σημαντικό και αντισταθμίζεται, κυρίως, σε οδικές αρτηρίες που περιέχουν πολλαπλές ζώνες ανίχνευσης (πέραν της μιας λωρίδας κυκλοφορίας) εντός του οπτικού πεδίου των καμερών.

2.2.2 Μικροκυματικά ραντάρ (microwave radar)

Ο τρόπος με τον οποίο ανιχνεύονται τα οχήματα από τις συσκευές ραντάρ στηρίζεται στο φαινόμενο της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων. Ο πομπός του συστήματος εκπέμπει ραδιοκύματα που ανακλώνται από το αντικείμενο ενδιαφέροντος, στη συγκεκριμένη εφαρμογή τα κινούμενα οχήματα, και αφού συλλεγούν, καταγράφονται, με στόχο τον καθορισμό διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με αυτό.

Τα μικροκυματικά ραντάρ που χρησιμοποιούνται για ανίχνευση οχημάτων λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 1GHz και 30GHz. Συνήθως εγκαθίστανται πάνω σε ιστούς, ώστε να έχουν καθαρή εικόνα του οδικού δικτύου. Χρησιμοποιούν παραβολικού τύπου κεραίες με κατάλληλο άνοιγμα κυρίου λοβού, ώστε να στοχεύουν ακριβώς το τμήμα του οδικού δικτύου που επιτηρούν. Τα ανακλώμενα κύματα συλλέγονται από την κεραία του ραντάρ και, αφού υποστούν επεξεργασία προκειμένου να παραχθεί κατάλληλη προς διαχείριση πληροφορία, μεταφέρονται στον ελεγκτή που είναι συνήθως εγκατεστημένος στη βάση του ιστού. Από εκεί, με τη βοήθεια του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, ο όγκος των μετρήσεων μεταφέρεται στο ΚΔΚ για περαιτέρω ανάλυση.



Σχήμα 2.4. Τρόπος λειτουργίας και εγκατάστασης μικροκυματικού ραντάρ [1].

Πλεονεκτήματα: Η συγκεκριμένη τεχνολογία παραμένει ανεπηρέαστη από αντίξοες καιρικές συνθήκες. Προσφέρει, επίσης, απευθείας μέτρηση της ταχύτητας κινούμενου οχήματος. Τέλος, η εγκατάσταση των

ραντάρ σε θέσεις πλησίον του οδοστρώματος και με κατεύθυνση κάθετη στην κίνηση των οχημάτων, επιτρέπει παράλληλη ανίχνευση και μέτρηση της ταχύτητας αυτών.

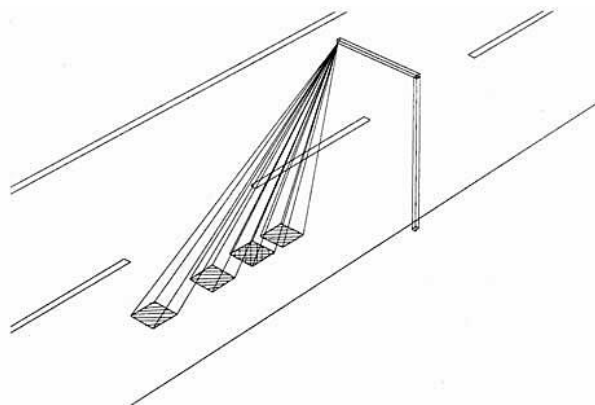
Μειονεκτήματα: Η ανίχνευση ακινητοποιημένων οχημάτων εντός του οπτικού πεδίου του ραντάρ δεν είναι δυνατή με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Επίσης, προβλήματα εμφανίζει η ανίχνευση οχημάτων που διέρχονται από διασταυρώσεις.

2.2.3 Υπέρυθροι αισθητήρες (infrared sensors)

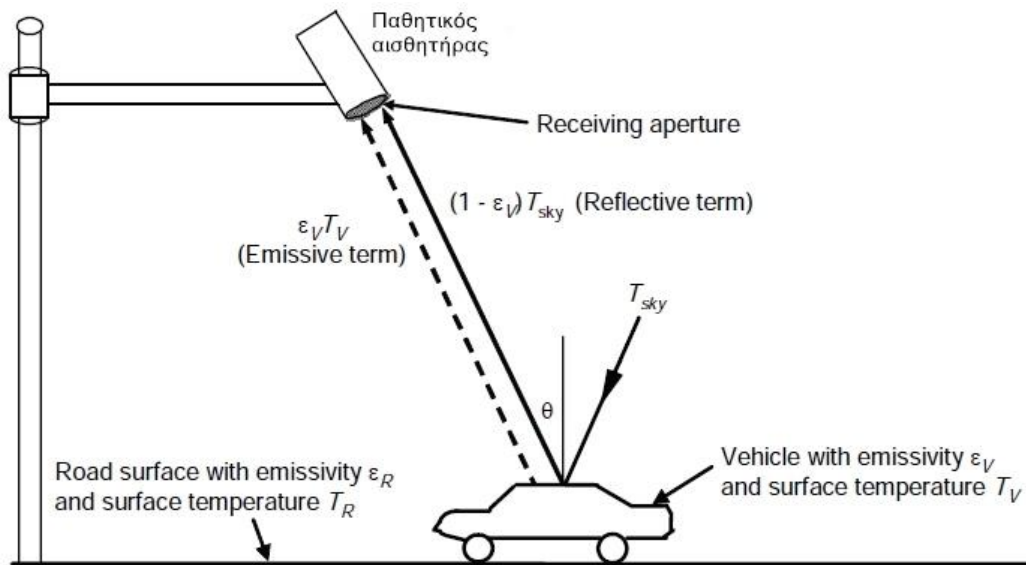
Υπέρυθρη καλείται η ακτινοβολία με μήκος κύματος που κυμαίνεται από 700nm έως 1mm (430THz μέχρι 300GHz σε φάσμα συχνοτήτων). Αποτελεί μη ορατή ακτινοβολία, καθώς περιλαμβάνει μήκη κύματος μεγαλύτερα από αυτά του ορατού φωτός, και ονομάστηκε υπέρυθρη επειδή το ερυθρό-κόκκινο χρώμα αποτελεί το άνω άκρο του ορατού φάσματος (620-740nm μήκος κύματος). Οι αισθητήρες αυτού του τύπου βασίζονται στη λειτουργία τους στη μέτρηση της υπέρυθρης ενέργειας εντός του πεδίου τους. Η ενέργεια αυτή συγκεντρώνεται σε ειδικό οπτικό υλικό και αφού μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, αποστέλλεται στο ΚΔΚ για περαιτέρω επεξεργασία. Οι υπέρυθροι αισθητήρες διακρίνονται σε ενεργητικούς και παθητικούς.

2.2.3.1 Παθητικοί υπέρυθροι αισθητήρες (passive infrared sensors)

Οι παθητικοί αισθητήρες λειτουργούν χωρίς να εκπέμπουν ενέργεια, ανιχνεύοντας την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα οχήματα, την επιφάνεια του οδοστρώματος, άλλα αντικείμενα ή την ατμόσφαιρα. Ένα μέτρο της ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα αντικείμενα αποτελεί ο παράγοντας ϵ (emissivity). Η παρουσία οχήματος εντός του πεδίου του αισθητήρα παράγει σήμα ανάλογο του γινομένου ενός παράγοντα διαφοράς ϵ , επί ένα άλλο παράγοντα διαφοράς θερμοκρασίας T . Ο πρώτος ορίζεται ως η απόλυτη διαφορά των παραγόντων ϵ_R του εδάφους και ϵ_V του οχήματος, ενώ ο δεύτερος ως η απόλυτη διαφορά των θερμοκρασιών T_R και T_{sky} του εδάφους και της ατμόσφαιρας, αντίστοιχα. Το σήμα αυτό επιτρέπει την ανίχνευση του οχήματος, ενώ ειδικά μοντέλα πολλαπλών ζωνών ανίχνευσης ακτινοβολίας είναι σε θέση να μετρήσουν πρόσθετα δεδομένα όπως την ταχύτητα, το μεταξόνιο του οχήματος κτλ.



Σχήμα 2.5. Παθητικός αισθητήρας με δυνατότητα ανίχνευσης πολλαπλών ζωνών [4].



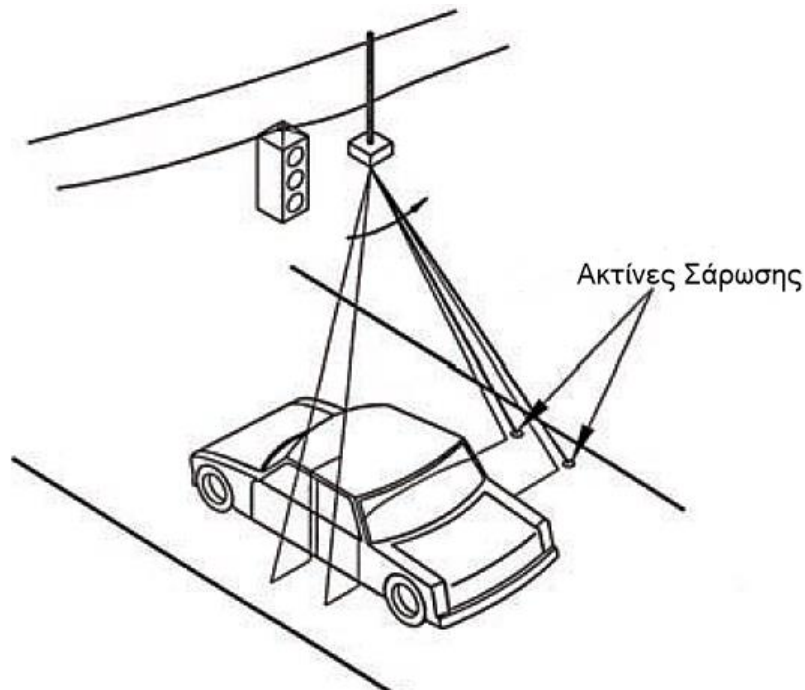
Σχήμα 2.6. Τρόπος λειτουργίας παθητικού υπέρυθρου αισθητήρα [1].

Πλεονεκτήματα: Το κύριο πλεονέκτημα των παθητικών αισθητήρων αποτελεί η ύπαρξη μοντέλων με δυνατότητα ανίχνευσης πολλαπλών ζωνών, η οποία καθιστά δυνατή τη μέτρηση της ταχύτητας των διερχομένων οχημάτων. Επίσης, το κόστος αγοράς τέτοιων αισθητήρων είναι μικρότερο από αυτό των αντίστοιχων ενεργητικών.

Μειονεκτήματα: Η ακρίβεια των αισθητήρων επηρεάζεται από τις διάφορες κλιματικές και μετεωρολογικές μεταβολές, ενώ κάποια μοντέλα δεν ενδείκνυνται για την ανίχνευση της παρουσίας οχήματος εντός του πεδίου τους.

2.2.3.2 Ενεργητικοί υπέρυθροι αισθητήρες (active infrared sensors)

Οι ενεργητικοί αισθητήρες βασίζουν τη λειτουργία τους σε οπτικά υλικά, όπως είναι οι δίοδοι φωτοεκπομπής (Light-Emitting Diodes - LEDs). Οι τελευταίες εκπέμπουν χαμηλής ενέργειας υπέρυθρη ακτινοβολία στην προς καταγραφή περιοχή, ενώ οι αισθητήρες ανιχνεύουν το μέρος της ενέργειας που ανακλάται από τα διερχόμενα οχήματα. Οι αισθητήρες φέρουν δύο κατηγορίες οπτικών υλικών. Η δέσμη εκπομπής των οπτικών χωρίζεται σε δύο ή περισσότερες ισαπέχουσες ακτίνες σάρωσης. Η ταυτόχρονη παρουσία περισσότερων της μιας δέσμης επιτρέπει τη μέτρηση πρόσθετων κυκλοφοριακών δεδομένων, όπως της ταχύτητας του οχήματος. Τα οπτικά που συλλέγουν τις ανακλώμενες ακτίνες έχουν μεγάλο άνοιγμα πεδίου με στόχο την αποτελεσματικότερη ανίχνευσή τους.



Σχήμα 2.7. Υπέρυθρο ραντάρ 2 ακτίνων λέιζερ για κάθετη σάρωση του οδοστρώματος [1].

Πλεονεκτήματα: Η εκπομπή πολλαπλών υπέρυθρων δεσμών παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης ποικίλων οδικών δεδομένων, όπως η θέση, η ταχύτητα, ο τύπος του κινούμενου οχήματος. Κατά τον ίδιο τρόπο, είναι δυνατή η παράλληλη μέτρηση της ταχύτητας και η ανίχνευση οχημάτων που κινούνται σε διαφορετικές λωρίδες, από αισθητήρες τοποθετημένους στα άκρα του οδοστρώματος.

Μειονεκτήματα: Η ακρίβεια της τεχνολογίας επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες. Ανακλάσεις του φωτός, αντίξοες καιρικές συνθήκες, όπως χιονόπτωση, βροχή, ομίχλη, συμβάλλουν στην υποβάθμιση του σήματος που συλλέγεται. Τέλος, η εγκατάσταση και συντήρηση των αισθητήρων απαιτεί διακοπή της κυκλοφορίας.

2.2.4 Ακουστικοί αισθητήρες (acoustic sensors)

Αποτελούν αισθητήρες που ανιχνεύουν το επίπεδο ήχου στο υπό επιτήρηση τμήμα του οδικού δικτύου και μέσω της μεταβολής του, την ενδεχόμενη διέλευση οχημάτων. Τα ηχητικά κύματα που προέρχονται από τη λειτουργία ενός οχήματος (πχ. ήχος κινητήρα) αλλά και από την αλληλεπίδρασή του με το οδόστρωμα, μέσω του ήχου που παράγεται από την τριβή των ελαστικών του οχήματος, ανιχνεύονται από τους ηχητικούς αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι πλησίον του οδοστρώματος. Η απομάκρυνση ενός οχήματος από τη ζώνη επιτήρησης ενός αισθητήρα, συνοδεύεται από μείωση του επιπέδου του ήχου κάτω από την τιμή κατωφλίου που αυτός ανιχνεύει, κάτι το οποίο ολοκληρώνει την καταγραφή της διέλευσης του οχήματος.

Στη μέθοδο αυτή, είναι ιδιαίτερα σημαντική η ρύθμιση του κατάλληλου κατωφλίου θορύβου, το οποίο πρέπει να είναι ελαφρά μεγαλύτερο από το γενικότερο επίπεδο θορύβου του παρακαείμενου περιβάλλοντος, απουσία οχημάτων. Αυτό οδηγεί στη ρύθμιση διαφορετικών επιπέδων κατωφλίου, αντίστοιχων της περιοχής εγκατάστασης των ακουστικών αισθητήρων.

Πλεονεκτήματα: Η εγκατάσταση των ακουστικών αισθητήρων γίνεται, συνήθως, σε σημεία πλησίον του οδοστρώματος, χωρίς να απαιτείται εντατική εργασία ή καταστροφή του πεζοδρομίου. Αποτελεί, επίσης, μέθοδο η ακρίβεια της οποίας διατηρείται ανεπηρέαστη από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχή, χιονόπτωση κτλ). Τέλος, ορισμένα μοντέλα αισθητήρων επιτρέπουν την ταυτόχρονη ανίχνευση οχημάτων που κινούνται σε πολλαπλές λωρίδες κυκλοφορίας.

Μειονεκτήματα: Έχει παρατηρηθεί ότι χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε μείωση της ακρίβειας των ηχητικών αισθητήρων. Τέλος, ορισμένα μοντέλα δεν είναι κατάλληλα για την καταγραφή κυκλοφορίας χαμηλής ταχύτητας.

2.2.5 Υπερηχητικοί αισθητήρες (ultrasonic sensors)

Είναι αισθητήρες που ανιχνεύουν ηχητικά κύματα συχνότητων μεταξύ 25 και 50kHz, συχνότητες υψηλότερες από τις ακουστικές συχνότητες, αυτές, δηλαδή, που μπορεί να ανιχνεύσει το ανθρώπινο αυτί. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου συνοδεύονται από κατευθυντική κεραία μέσω της οποίας εκπέμπουν υπερηχητική ακτινοβολία (τετραγωνικού παλμού) στην προς επιτήρηση περιοχή. Το μέγεθος της ανακλώμενης ενέργειας που συλλέγει ο αισθητήρας, αποτελεί το κριτήριο ανίχνευσης ενός οχήματος. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για να συλλεγεί το σήμα ενέργειας από τον αισθητήρα, καθορίζει τη θέση ενός οχήματος σε σχέση με τον αισθητήρα.

Τα υπό συλλογή ακουστικά σήματα υφίστανται ειδική επεξεργασία είτε από μικροεπεξεργαστή, που μπορεί να είναι ενσωματωμένος στον αισθητήρα, είτε από τον πλησιέστερο ελεγκτή, και μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα που με τη σειρά τους συλλέγονται από το ΚΔΚ.



Σχήμα 2.8. Παράδειγμα υπερηχητικού αισθητήρα τοποθετημένου σε ιστό άνω του οδοστρώματος. Στην βάση του ιστού είναι εγκατεστημένος ο συλλέκτης [www.utms.or.jp].

Πλεονεκτήματα: Η εγκατάσταση των υπερηχητικών αισθητήρων γίνεται, συνήθως, σε σημεία πλησίον του οδοστρώματος, χωρίς να απαιτείται εντατική εργασία ή καταστροφή του πεζοδρομίου. Τέλος, ορισμένα μοντέλα επιτρέπουν την ταυτόχρονη ανίχνευση οχημάτων που κινούνται σε πολλαπλές λωρίδες κυκλοφορίας.

Μειονεκτήματα: Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ευαίσθητη στις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας αλλά, κυρίως, σε αναταράξεις αέρα.

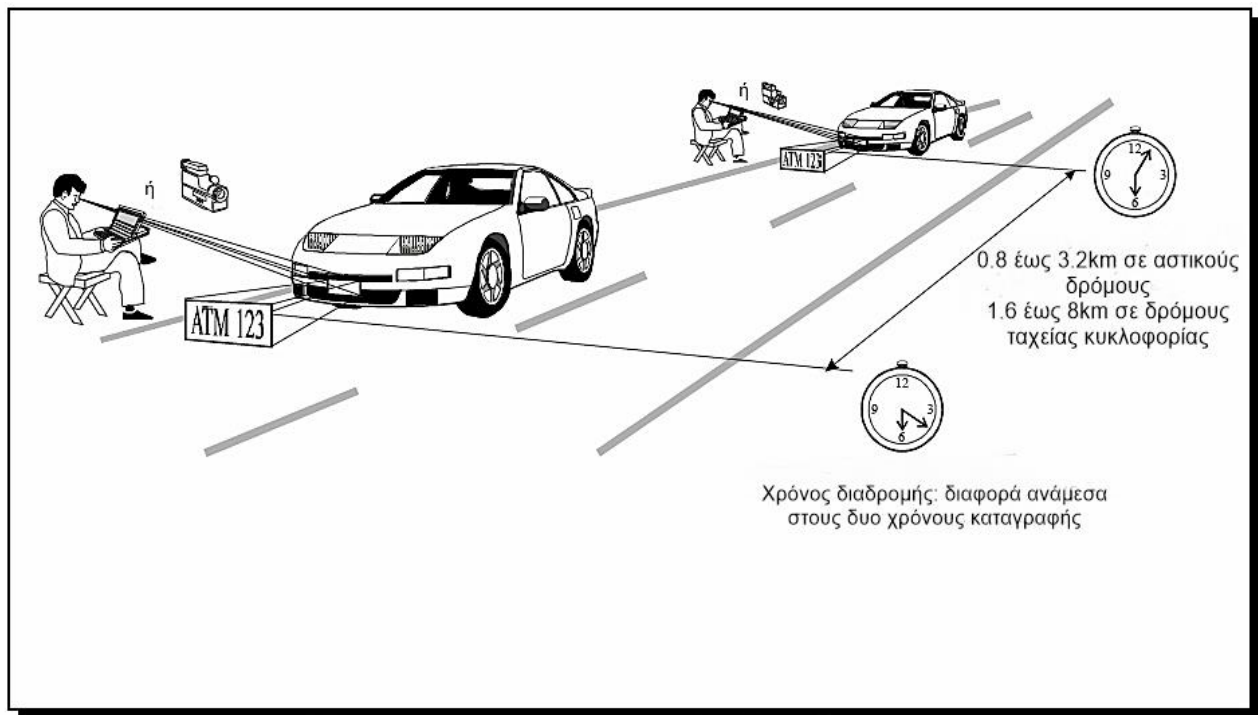
2.2.6 Τεχνικές αναγνώρισης πινακίδας οχήματος (license plate matching techniques)

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην αρχική αναγνώριση ενός οχήματος από την πινακίδα που αυτό φέρει και στη μετέπειτα αναγνώριση του ίδιου οχήματος σε επόμενο χρονικό σημείο. Η ταχύτητα υπολογίζεται με βάση τη διαφορά των χρονικών στιγμών που αυτό έγινε αντιληπτό να διέρχεται από δύο σημεία ενδιαφέροντος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αναγνωρισθεί η πινακίδα ενός διερχομένου οχήματος. Κάποιοι, περισσότερο απλοί, όπως η χρήση παρατηρητών πλησίον του οδοστρώματος στα σημεία ενδιαφέροντος, και κάποιοι, περισσότερο πολύπλοκοι, με χρήση βιντεοκαμερών.

Αν και έχουν ασήμαντο κόστος, οι τεχνικές που βασίζονται στη χρήση παρατηρητών στηρίζονται στην ικανότητα του παρατηρητή να καταγράψει τα διερχόμενα οχήματα, ενώ προϋποθέτουν μεγάλο αριθμό παρατηρητών για κάλυψη σημαντικού τμήματος του οδικού δικτύου, πράγμα ανέφικτο. Η καταγραφή μπορεί να γίνει με παραδοσιακές μεθόδους (καταγραφή σε κόλλα, ηχογράφηση κτλ.) ή με χρήση φορητού υπολογιστή. Στην πρώτη περίπτωση, η ταυτοποίηση και σύγκριση των χρονικών στιγμών που διήλθε ένα όχημα από σημεία ενδιαφέροντος γίνεται εκ των υστέρων, ύστερα από τη συγκέντρωση όλων των μετρήσεων των παρατηρητών και σύγκριση των πινακίδων κυκλοφορίας. Στη δεύτερη περίπτωση, απαιτείται μόνο η σύγκριση των δεδομένων που βρίσκονται αποθηκευμένα σε προσωπικό υπολογιστή, ώστε να βρεθούν κοινές πινακίδες. Αυτή η διαδικασία, ωστόσο, μπορεί να γίνει με χρήση κατάλληλου software, οπότε και καθίσταται περισσότερο αποδοτική. Οι συγκεκριμένες τεχνικές θεωρούνται κατάλληλες κυρίως ως βάση σύγκρισης για άλλες μεθόδους, εξαιτίας της δυσκολίας δειγματοληψίας μεγάλου αριθμού οχημάτων και της παραγωγής ακριβών μετρήσεων.

Η χρήση καμερών αναιρεί τη δυσκολία εύρεσης και διατήρησης αξιόλογου αριθμού παρατηρητών για παραγωγή μετρήσεων. Επιπλέον, παρέχει διαρκή κάλυψη σε επιλεγμένα σημεία αλλά και προσφέρει δυνατότητα ενδελεχούς παρατήρησης της κυκλοφορίας από εξειδικευμένο προσωπικό, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια των μετρήσεων. Και στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, δεν αποφεύγεται η χρήση εξειδικευμένου προσωπικού. Αυτό, πρέπει να είναι σε θέση να αναλύσει την εικόνα των καμερών από τα σημεία ενδιαφέροντος, να αναγνωρίσει τις πινακίδες των οχημάτων και να τις εισαγάγει στη συνέχεια σε υπολογιστή, ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκρισή τους. Μόνο τότε θα είναι δυνατός ο υπολογισμός περαιτέρω στοιχείων, όπως η μέση ταχύτητα κίνησης κτλ.

Η ανωτέρω χρονοβόρα διαδικασία αποφεύγεται κάνοντας χρήση υπολογιστών με κατάλληλο λογισμικό, οι οποίοι είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν αυτόματη αναγνώριση χαρακτήρων σε υψηλής ευκρίνειας εικόνα. Έτσι, η εργασία ανίχνευσης και ταυτοποίησης πινακίδων πραγματοποιείται από υπολογιστή, μειώνοντας τον χρόνο και αυξάνοντας την ακρίβεια της διαδικασίας. Βέβαια, ειδικά σε περιπτώσεις αδυναμίας του υπολογιστή για ταυτοποίηση αποτελεσμάτων, λόγω πχ. μη ευκρινούς πινακίδας, η παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα πρέπει να υποβοηθά τη διαδικασία.



Σχήμα 2.9. Τεχνική υπολογισμού χρόνου ταξιδιού, μέσω καταγραφής της πινακίδας κινούμενου οχήματος [3].

Πλεονεκτήματα: Η μέθοδος παρέχει χρόνους διαδρομών από μεγάλο δείγμα οδηγών αλλά και συνεχή καταγραφή της κυκλοφορίας, κάτι που βοηθά στην άμεση ανίχνευση των μεταβολών της. Επίσης, οι τεχνικές που δεν χρησιμοποιούν βιντεοκάμερες έχουν μικρό κόστος λειτουργίας, ενώ η χρήση φορητού εξοπλισμού προσδίδει ευελιξία στη μέθοδο.

Μειονεκτήματα: Η μέθοδος περιορίζεται από το διαθέσιμο αριθμό βιντεοκαμερών ή παρατηρητών και γενικά, προσφέρει μικρή γεωγραφική κάλυψη. Η ακρίβεια της μεθόδου στις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση παρατηρητών, εξαρτάται στενά από την ικανότητά τους, ενώ σε αυτοκινητόδρομους, η αυξημένη ταχύτητα των οχημάτων δυσχεραίνει το έργο τους. Επίσης, η χρήση υψηλής ευκρίνειας καμερών προς βελτίωση της ακρίβειας, η εκμετάλλευση εξελιγμένων υπολογιστικών συστημάτων για την ταυτοποίηση των πινακίδων, αλλά και το εξειδικευμένο προσωπικό που απαιτείται για το χειρισμό των παραπάνω, συνοδεύονται από υψηλό κόστος.

2.3 Σύγκριση συμβατικών μεθόδων

Στη συνέχεια παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα βασικότερα στοιχεία των τεχνικών συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων που αναλύθηκαν.

Τεχνολογία καταγραφής	Απαρίθμηση και ανίχνευση παρουσίας οχήματος	Μέτρηση ταχύτητας	Κατηγοριοποίηση οχήματος	Δυνατότητα επιτήρησης πολλαπλών λωρίδων	Απαιτήσεις τηλ/κού εύρους	Κόστος αγοράς
Επαγωγικός βρόχος	✓	✓(α)	✓(β)		Χαμηλές προς μέτριες	Χαμηλό
Πνευματικός σωλήνας	✓	✓	✓(κ)		Χαμηλές προς μέτριες	Χαμηλό
Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας	✓	✓	✓		Χαμηλές προς μέτριες	Χαμηλό προς μέτριο
Μαγνητικός αισθητήρας	✓	✓(α)			Χαμηλές	Μέτριο
Επεξεργαστής βιντεο-εικόνας	✓	✓	✓	✓	Χαμηλές έως υψηλές (γ)	Μέτριο προς υψηλό
Μικροκυματικό ραντάρ	✓(δ)	✓	✓(δ)	✓(δ)	Μέτριες	Χαμηλό προς μέτριο
Υπέρηθρος αισθητήρας	✓	✓(ε)	✓(ε)	✓(ε)	Μέτριες	Χαμηλό έως υψηλό (ζ)
Ακουστικός αισθητήρας	✓	✓(η)		✓(η)	Χαμηλές προς μέτριες	Μέτριο
Τεχνικές αναγνώρισης πινακίδας οχήματος	✓	✓	✓	✓	Καθόλου έως υψηλές (μ)	Χαμηλό έως υψηλό (λ)

Πίνακας 2.1. Σύγκριση συμβατικών μεθόδων καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων

- (α). Υπολογίζεται από τη χρονική διάρκεια που χρειάζεται ένα όχημα ώστε να διέλθει από δύο διαδοχικούς αισθητήρες, που απέχουν μεταξύ τους συγκεκριμένη απόσταση.
- (β). Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κατάλληλη ηλεκτρονική μονάδα, η οποία περιέχει ειδικό λογισμικό για την κατηγοριοποίηση των οχημάτων.
- (γ). Εξαρτάται από τη μορφή των δεδομένων που αποστέλλονται στο ΚΔΚ. Δεδομένα μεγάλου όγκου ή βιντεοεικόνες απαιτούν υψηλό τηλεπικοινωνιακό εύρος. Ωστόσο, το τηλεπικοινωνιακό φορτίο μπορεί να περιοριστεί αν τα δεδομένα συμπιεστούν μετά από κατάλληλη επεξεργασία.
- (δ). Η ανίχνευση της παρουσίας οχήματος επιτυγχάνεται μόνο ύστερα από μετάδοση κατάλληλης κυματομορφής και χρησιμοποιώντας ειδικά εργαλεία επεξεργασίας σήματος.
- (ε). Υπολογίζεται μόνο από ενεργητικούς υπέρυθρους αισθητήρες.
- (ζ). Το κόστος των παθητικών αισθητήρων είναι, εν γένει, χαμηλό προς μέτριο, ενώ των ενεργητικών μέτριο προς υψηλό.
- (η). Μόνο μοντέλα που εκπέμπουν πολλαπλές δέσμες.
- (κ). Λανθασμένες μετρήσεις του μεταξονίου φορτηγών και λεωφορείων, κυρίως, όταν ο όγκος των τελευταίων είναι μεγάλος.
- (λ). Εξαρτάται από την τεχνική που χρησιμοποιείται. Από χαμηλό, όταν χρησιμοποιούνται μόνο παρατηρητές, έως σημαντικά υψηλό, όταν γίνεται χρήση βιντεοκαμερών και πολύπλοκου λογισμικού αναγνώρισης χαρακτήρων.
- (μ). Η χρήση παρατηρητών με φορητούς υπολογιστές δεν απαιτεί τηλεπικοινωνιακούς πόρους. Η χρήση, ωστόσο, βιντεοκαμερών υψηλής ευκρίνειας προς αναγνώριση της πινακίδας, απαιτεί σημαντικούς τηλεπικοινωνιακούς πόρους.

2.4 Βιβλιογραφία

- [1]. U.S. Department of Transportation FHWA (2006-10) - Traffic Detector Handbook: Third Edition - Volume I
- [2]. U.S. Department of Transportation FHWA (2013-09) - Traffic Monitoring Guide
- [3]. Various Authors FHWA (1998-03) - Travel Time Data Collection Handbook
- [4]. The Vehicle Detector Clearinghouse (2007-08) - A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies Used in Intelligent Transportation Systems
- [5]. Helio Armino Valente Silva (2012-02) - Methods, Techniques and Instruments of Data Collection in European Countries

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΝΕΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Καθημερινά, ο άνθρωπος χρησιμοποιεί διάφορες ασύρματες συσκευές επικοινωνίας, από το τηλέφωνο για φωνητικές κλήσεις ή σύνδεση στο διαδίκτυο, μέχρι το GPS (Global Positioning System - Παγκόσμιο Σύστημα Θεσιθεσίας) του αυτοκινήτου του. Όλες αυτές οι συσκευές παρέχουν τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας με το αντίστοιχο κέντρο εξυπηρέτησης. Η ασύρματη φύση αυτού του τρόπου επικοινωνίας, μεταξύ τερματικών ή μεταξύ τερματικού και κέντρου εξυπηρέτησης, επιτρέπει την ανίχνευση των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται. Μπορεί, επομένως, το ΚΔΚ να αξιοποιήσει την πληροφορία αυτή για την παραγωγή κυκλοφοριακών δεδομένων.

Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την καταγραφή και συλλογή κυκλοφοριακής πληροφορίας, προϋποθέτουν την ασύρματη επικοινωνία με κινούμενα οχήματα. Ως επί το πλείστον, η επικοινωνία αυτού του είδους απαιτεί σημαντικούς τηλεπικοινωνιακούς πόρους και κατάλληλο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πρόσβασης και μεταφοράς της πληροφορίας στο διαχειριστικό κέντρο. Συνεπώς, για τη λειτουργία τους οι συγκεκριμένες τεχνικές στηρίζονται κατά βάση στις υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υποδομές και εξαρτώνται από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για τη λήψη των απαιτούμενων μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κυκλοφοριακή πληροφορία προκύπτει κυρίως από τη δειγματοληψία παθητικών δοκιμαστικών οχημάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα οχήματα δεν έχουν αποκλειστικό στόχο την παροχή κυκλοφοριακών μετρήσεων στο ΚΔΚ, αλλά το υποβοηθούν έμμεσα χρησιμοποιώντας ασύρματες συσκευές επικοινωνίας.

Τα κυκλοφοριακά δεδομένα που εξάγονται έπειτα από την ανίχνευση της θέσης κινούμενων οχημάτων, μέσω κινητών τηλεφώνων ή συσκευών GPS, αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Floating Car Data ή Floating Cellular Data (FCD). Η άλλη μεγάλη κατηγορία καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων βασίζεται σε τεχνικές αυτόματης αναγνώρισης οχημάτων (Automatic Vehicle Identification - AVI). Οι συγκεκριμένες τεχνικές απαιτούν την εγκατάσταση ηλεκτρονικών πομποδεκτών στα προς μέτρηση κινούμενα οχήματα.

Η δυνατότητα παροχής κυκλοφοριακής πληροφορίας πραγματικού χρόνου και κάλυψης του μεγαλύτερου τμήματος του οδικού δικτύου καθιστά τις συγκεκριμένες τεχνικές κομβικής σημασίας για την εδραίωση και ανάπτυξη των ITS. Για το λόγο αυτό, οι τεχνικές που θα αναλυθούν στη συνέχεια εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και με τον όρο ITS Probe Vehicle Techniques, ενώ με τον όρο Probe Vehicle εννοείται κάθε δοκιμαστικό όχημα που δειγματοληπτείται για τη συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων.

Το επίπεδο ακρίβειας μετρήσεων που παρέχει κάθε ITS τεχνική ποικίλλει, ωστόσο, οι ITS τεχνικές μπορούν να δράσουν επικουρικά στις παραδοσιακές τεχνικές ή, και σε πολλές περιπτώσεις, να τις αντικαταστήσουν. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγαλύτερη ευελιξία εγκατάστασης και χρήσης των ITS τεχνικών, αφού, κατά κύριο λόγο αξιοποιούν το υπάρχον τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και δεν απαιτούν πολύπλοκες και κοστοβόρες εργασίες εγκατάστασης πρόσθετου εξοπλισμού. Τέλος, μπορούν να παρέχουν κυκλοφοριακά δεδομένα από μεγάλα τμήματα του οδικού δικτύου, ακόμα και από σημεία περιορισμένου ενδιαφέροντος, όπου η αντίστοιχη εγκατάσταση αισθητήρων επί του οδοστρώματος είναι οικονομικά ασύμφορη.

Συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους αξιοποίησης κυκλοφοριακών δεδομένων οι ITS τεχνικές εμφανίζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό κόστος ανά μονάδα δεδομένων. Μετά την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού και υποδομών, τα δεδομένα κίνησης συλλέγονται εύκολα και με χαμηλό κόστος.
- Συνεχής συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων. Καθόσον διέρχονται δοκιμαστικά οχήματα από ένα επιτηρούμενο τμήμα αυτοκινητόδρομου, παρέχονται συνεχώς μετρήσεις προς αξιοποίηση για το ΚΔΚ.
- Αυτοματοποιημένη διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Τα δεδομένα βρίσκονται σε ηλεκτρονική μορφή και αποστέλλονται αυτόματα από τα δοκιμαστικά οχήματα προς το ΚΔΚ. Έτσι, η συλλογή και επεξεργασία τους πραγματοποιείται εύκολα.
- Διακριτικότητα (non-intrusiveness) τεχνολογίας. Η λειτουργία των ITS τεχνικών συντελείται χωρίς να επηρεάζουν την κυκλοφορία. Τα δοκιμαστικά οχήματα δεν έχουν αυτοσκοπό την παροχή μετρήσεων, αλλά έμμεσα υποβοηθούν το κέντρο. Συνεπώς, οι μετρήσεις που συγκεντρώνονται προέρχονται από οδηγούς με διαφορετικά προφίλ οδήγησης και άρα μπορούν να θεωρηθούν αμερόληπτες.
- Δυνατότητα άμεσης λειτουργίας και ευρείας κάλυψης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ITS τεχνικές στηρίζονται κυρίως σε συχνά χρησιμοποιούμενες συσκευές (συσκευές GPS, κινητά τηλέφωνα κά) και στην υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή υποδομή.

Μειονεκτήματα

- Σχετικά υψηλό αρχικό κόστος. Η αγορά και εγκατάσταση εξοπλισμού, αλλά και η αναγκαία εκπαίδευση του προσωπικού εμφανίζουν σημαντικό κόστος. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο δεν ενδείκνυται η χρήση ITS τεχνικών για μικρής έκτασης εφαρμογές συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων.
- Εξάρτηση από τις υπάρχουσες υποδομές. Το κόστος επέκτασης των τηλεπικοινωνιακών υποδομών (πχ. εγκατάσταση νέων σταθμών βάσης) είναι υψηλό, οπότε η εμβέλεια του συστήματος περιορίζεται από τις υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υποδομές. Απαιτείται, συνεπώς, διεξοδική έρευνα πριν τη σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος, καθώς δύσκολα αυτό γίνεται επεκτάσιμο μελλοντικά.
- Ζητήματα ιδιωτικότητας. Οι ITS τεχνικές προϋποθέτουν την παρακολούθηση δοκιμαστικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω ανάθεσης στο καθένα από αυτά ειδικής ταυτότητας. Συνεπώς, γίνονται γνωστά στο ΚΔΚ ιδιωτικά δεδομένα, όπως η ταχύτητα κίνησης του οχήματος και η θέση του κάθε στιγμή.

3.1 FCD προερχόμενα από συσκευές GPS (GPS Devices)

3.1.1 FCD προερχόμενα από ενσωματωμένες εντός οχήματος συσκευές GPS

Το GPS αποτελεί σύστημα προσδιορισμού της θέσης αλλά και της ώρας ενός χρήστη (δέκτη GPS). Η λειτουργία του βασίζεται στην ύπαρξη δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη Γη. Οι τελευταίοι, κάθε χρονική στιγμή διαθέτουν αυστηρά καθορισμένες γεωγραφικές θέσεις και ώρα, οι οποίες σε περιπτώσεις αποκλίσεων διορθώνονται από το κέντρο ελέγχου στη Γη. Ένας δέκτης GPS με δυνατότητα

LoS (Line of Sight) επικοινωνίας με τουλάχιστον τέσσερις από τους δορυφόρους, είναι σε θέση να καθορίσει με ακρίβεια τη γεωγραφική θέση (άψονες χ,ψ,ζ) και ώρα του.

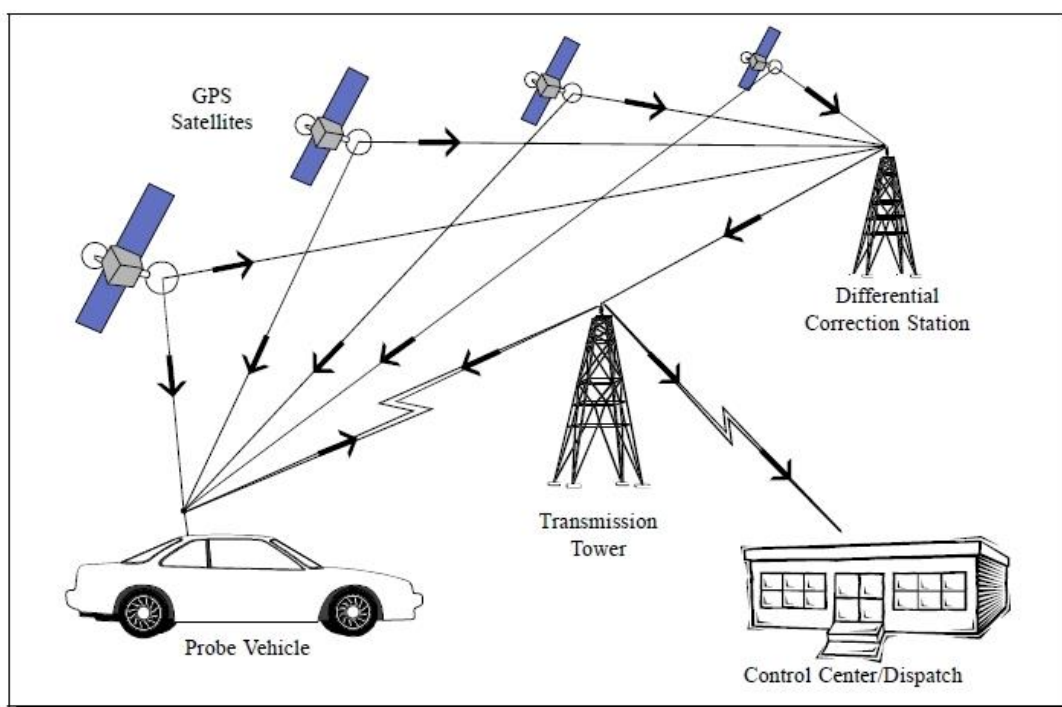
Πλέον, μεγάλος αριθμός οχημάτων διαθέτει ενσωματωμένα συστήματα GPS. Επίσης, αρκετοί οδηγοί χρησιμοποιούν τέτοια συστήματα καθώς είναι διαθέσιμα σε προσιτές γενικά τιμές. Επιπλέον, οι νέες γενιές ευφυών τηλεφώνων (smartphones) προσφέρουν ενσωματωμένα συστήματα GPS. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαδεδομένη χρήση των ευφυών τηλεφώνων, συμπεραίνεται το μεγάλο ποσοστό διεισδυτικότητας της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Συχνή χρήση της εντοπίζεται και στον τομέα των μεταφορών. Η ανάγκη αποδοτικότερης διαχείρισης και εποπτείας του στόλου οχημάτων των μεταφορικών εταιρειών αλλά και του δημοσίου τομέα, (ασθενοφόρων, πυροσβεστικών οχημάτων, λεωφορείων συγκοινωνίας κτλ.) έχει οδηγήσει στην εγκατάσταση συστημάτων GPS εντός αυτών.

Από τα προηγούμενα προκύπτει το συμπέρασμα πως ο δυνητικός αριθμός χρηστών GPS είναι υπολογίσιμος. Αυτό, σε συνδυασμό με τα πρόσθετα χαρακτηριστικά που διαθέτουν οι νέες τεχνολογίες συσκευές GPS, όπως πχ. ο μικρός χρόνος απόκρισης, αποτελούν έναυσμα για τη μελέτη και δημιουργία ενός συστήματος συγκέντρωσης και ανάλυσης των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων, με στόχο την εξαγωγή κυκλοφοριακών δεδομένων.

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι σχετικά απλή. Οι συσκευές/δέκτες τεχνολογίας GPS είναι σε θέση, έπειτα από επικοινωνία με τουλάχιστον τέσσερις από τους δορυφόρους, να λάβουν το στίγμα τους. Αυτή η πληροφορία αποθηκεύεται μέχρι να διορθωθεί με τη βοήθεια διαφορικής πληροφορίας που υπολογίζεται από ειδικό σταθμό διαφορικής διόρθωσης και αποστέλλεται μέσω σταθμών εκπομπής στο κινούμενο όχημα. Πλέον, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θέσης του κινητού με μεγάλη ακρίβεια. Η τελική πληροφορία μεταδίδεται μέσω της κεραίας του οχήματος στον πλησιέστερο σταθμό βάσης και από εκεί στον επόμενο, μέχρι να καταλήξει στο ΚΔΚ. Αυτό, συγκεντρώνει και αποθηκεύει την πληροφορία σε αντίστοιχο εξυπηρετητή (server). Η πληροφορία διαχωρίζεται με κριτήριο τις οδικές αρτηρίες που ενδιαφέρουν το κέντρο και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό διαφόρων κυκλοφοριακών δεδομένων όπως του όγκου κινούμενων οχημάτων, της ταχύτητάς τους, κά. Συγκρίνοντας, τέλος, αυτές τις τιμές με τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου, οι οποίες συνήθως αναλογούν σε κίνηση ελεύθερης ροής, το ΚΔΚ είναι σε θέση να αποφανθεί για το βαθμό συμφόρησης του εκάστοτε προβληματικού οδικού άξονα.

Ο τρόπος αξιοποίησης της συγκεκριμένης πληροφορίας ποικίλλει, αντίστοιχα με τον επιθυμητό στόχο. Μεγάλη πυκνότητα κίνησης οχημάτων σε συνδυασμό με χαμηλή ταχύτητα, αποτελούν ένδειξη συμφόρησης του οδικού δικτύου, οπότε και το ΚΔΚ οφείλει να λάβει τα απαραίτητα αντίμετρα, κατάλληλη προσαρμογή των σηματοδοτών, ενημέρωση των φωτεινών πινακίδων επί του δρόμου κτλ. Από την άλλη πλευρά, απότομη μείωση της ταχύτητας των κινούμενων οχημάτων ενδέχεται να αποτελεί ένδειξη ατυχήματος, οπότε το ΚΔΚ οφείλει να ειδοποιήσει τις αρμόδιες υπηρεσίες.

Ο τρόπος λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος οδηγεί σε ένα ιδιαίτερος πρακτικό και ευέλικτο σύστημα καταγραφής της οδικής κίνησης. Σημαντικό πλεονέκτημά του αποτελεί το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος λειτουργίας του, καθώς δεν απαιτείται εγκατάσταση εξοπλισμού στο οδικό δίκτυο, αφού γίνεται χρήση του εξοπλισμού των οδηγών. Επιπλέον, οι μετρήσεις των διαφόρων στοιχείων κάθε οχήματος είναι αρκετά ακριβείς, καθώς προέρχονται από τους δορυφόρους (βλέπε παράρτημα Α).



Σχήμα 3.1. Τυπική δομή συστήματος καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων κάνοντας χρήση της τεχνολογίας GPS [10].

Πλεονεκτήματα: Η ακρίβεια της συγκεκριμένης τεχνικής είναι υψηλή, ενώ παρέχεται συνεχώς η θέση των κινούμενων οχημάτων κατά μήκος μιας διαδρομής. Επίσης, αποτελεί διαδεδομένη τεχνολογία, με σχετικά μεγάλο αριθμό χρηστών που συνεχώς αυξάνεται. Αυτό παρέχει σημαντικό αριθμό δυνητικά δειγματοληπτούμενων χρηστών. Τέλος, το λειτουργικό κόστος μετά την εγκατάσταση της απαραίτητης υποδομής είναι σχετικό μικρό.

Μειονεκτήματα: Η ποιότητα του δορυφορικού σήματος υποβαθμίζεται σημαντικά σε αστικές περιοχές με ψηλά κτίρια, γέφυρες κτλ, ή σε δασικές περιοχές με έντονη βλάστηση και ψηλά δένδρα, και μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σύνδεσης με το δορυφορικό σύστημα GPS. Επιπλέον, η ευρεία χρήση της τεχνολογίας από συγκεκριμένες κατηγορίες οδηγών (μεταφορείς, οδηγοί λεωφορείων κτλ.) δεν είναι αντιπροσωπευτική για το σύνολο των χρηστών. Απαιτείται, επομένως, εθελοντική συμμετοχή οδηγών για παροχή πρόσθετης κυκλοφοριακής πληροφορίας. Ανακύπτουν, έτσι, ζητήματα ιδιωτικότητας από τη χρήση αυτής της τεχνικής, καθώς απαιτείται αποστολή ιδιωτικής πληροφορίας προς το ΚΔΚ. Τέλος, το αρχικό κόστος εγκατάστασης της τεχνολογίας μπορεί να είναι υψηλό, καθώς εκτός από την ανάγκη εγκατάστασης συσκευών GPS, υπάρχει και η ανάγκη εγκατάστασης της απαραίτητης τηλεπικοινωνιακής υποδομής για μεταφορά της πληροφορίας στο ΚΔΚ.

3.1.2 Κινητά τηλέφωνα με ενσωματωμένο δέκτη GPS

Η χρήση των κινητών τηλεφώνων είναι ιδιαίτερως συχνή και, πλέον, τα τελευταία θεωρούνται αναντικατάστατα για την καθημερινότητα του ανθρώπου. Καθώς οι ανάγκες του χρήστη εξελίσσονται και οι απαιτήσεις αυξάνονται, τα κινητά τηλέφωνα έχουν εξελιχθεί σε συσκευές που ενσωματώνουν προηγμένη τεχνολογία, η οποία πολλές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές πέραν αυτών για τις οποίες εξαρχής δημιουργήθηκε. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η χρήση των ανιχνευτών GPS

που φέρουν ενσωματωμένους τα περισσότερα κινητά νέας γενιάς. Επομένως, πέραν της εκάστοτε ζητούμενης εξυπηρέτησης του κατόχου τους, τα κινητά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κόμβοι ανίχνευσης της θέσης του χρήστη και παραγωγής κυκλοφοριακής πληροφορίας για το ΚΔΚ.

Τα κινητά τηλέφωνα παρουσιάζουν σημαντικά προτερήματα, όπως η μεγάλη διεισδυτικότητά τους στον πληθυσμό αλλά και η δυνατότητα εύκολης συλλογής των δεδομένων που παράγουν, μέσω του δικτύου κινητών επικοινωνιών. Δεδομένου του υψηλού κόστους εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των παραδοσιακών μορφών καταγραφής κίνησης, όπως των επαγωγικών βρόχων, καθίσταται πολλά υποσχόμενη η προοπτική χρήσης κινητών τηλεφώνων με τεχνολογία GPS εντός κινούμενων οχημάτων, με στόχο την καταγραφή κίνησης.

Για τη διαχείριση χρηστών που φέρουν κινητό τηλέφωνο εντός οχημάτων, χρησιμοποιούνται δυο είδη δειγματοληψίας:

- Η χρονική δειγματοληψία, σύμφωνα με την οποία, τα κινητά τηλέφωνα των χρηστών έχουν προγραμματιστεί για αυτόματη εκπομπή προς το κέντρο ελέγχου δεδομένων κίνησης (θέση, κατεύθυνση, ταχύτητα κά), ανά σταθερά χρονικά διαστήματα διάρκειας T (περίοδος δειγματοληψίας).
- Η χωρική δειγματοληψία, σύμφωνα με την οποία, τα κινητά τηλέφωνα αποστέλλουν δεδομένα προς το κέντρο ελέγχου μόνο μετά τη διέλευσή τους από συγκεκριμένα τμήματα του οδοστρώματος.

Ωστόσο, εξαιτίας των ζητημάτων ιδιωτικότητας που ανακύπτουν αλλά και της υψηλότερης κατανάλωσης μπαταρίας από τη συνεχή δειγματοληψία των κινητών, προτιμάται η δεύτερη μέθοδος, η οποία και προσαρμόζεται στα σημεία ενδιαφέροντος του κέντρου ελέγχου. Προς τούτο, σε επιλεγμένα σημεία κατά μήκος του οδοστρώματος σχεδιάζονται εικονικά ευθύγραμμα τμήματα (VTL - Virtual Trip Line), τα οποία χαρακτηρίζονται από τις συντεταγμένες GPS της αρχής και του πέρατός τους. Ένα κινούμενο όχημα, έχοντας αποθηκευμένες αυτές τις συντεταγμένες, είναι σε θέση να διαπιστώσει πότε διέρχεται από κάθε VTL και κατ' επέκταση να αποστείλει στο κέντρο ελέγχου τα αντίστοιχα δεδομένα. Επομένως, η απρόσκοπτη και άμεση λειτουργία του δικτύου κινητών επικοινωνιών τρίτης και τέταρτης γενιάς, το οποίο αναλαμβάνει τη συγκέντρωση αυτών των μηνυμάτων και τη μεταφορά τους στο κέντρο ελέγχου, είναι καθοριστικής σημασίας.

Από την άλλη πλευρά, πέρα από τη χρήση κινητών με ενσωματωμένη τεχνολογία GPS, η συγκεκριμένη μέθοδος προϋποθέτει την ενεργοποίηση της τεχνολογίας κοντά στα σημεία των μετρήσεων αλλά και την αποδοχή εκ μέρους του χρήστη της αποστολής δεδομένων προς το κέντρο διαχείρισης. Είναι φανερό ότι, παρά τον μεγάλο αριθμό δυνητικών τερματικών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την καταγραφή κυκλοφορίας, ο πραγματικά διαθέσιμος αριθμός χρηστών είναι μικρότερος, αλλά και αυτός ακόμα μικρότερος από τον αριθμό διερχόμενων οχημάτων που θα κατέγραφε ένα παραδοσιακό σύστημα. Συνεπώς, τίθεται το ερώτημα κατά πόσο ο όγκος δεδομένων που συλλέγει με αυτόν τον τρόπο το ΚΔΚ επαρκεί για να παραχθεί μια ρεαλιστική και αντιπροσωπευτική εικόνα της κίνησης. Ωστόσο, έρευνες έχουν πιστοποιήσει τόσο την ακρίβεια της μεθόδου όσο και τα πλεονεκτήματα που έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα.

3.2 FCD προερχόμενα από δειγματοληψία κινητών τηλεφώνων

Η ευρεία χρήση κινητών τηλεφώνων εύλογα οδηγεί στο ερώτημα, κατά πόσο ο όγκος δεδομένων που αποστέλλεται στο τηλεφωνικό κέντρο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό κυκλοφοριακών δεδομένων, όπως η ταχύτητα κίνησης ενός οχήματος.

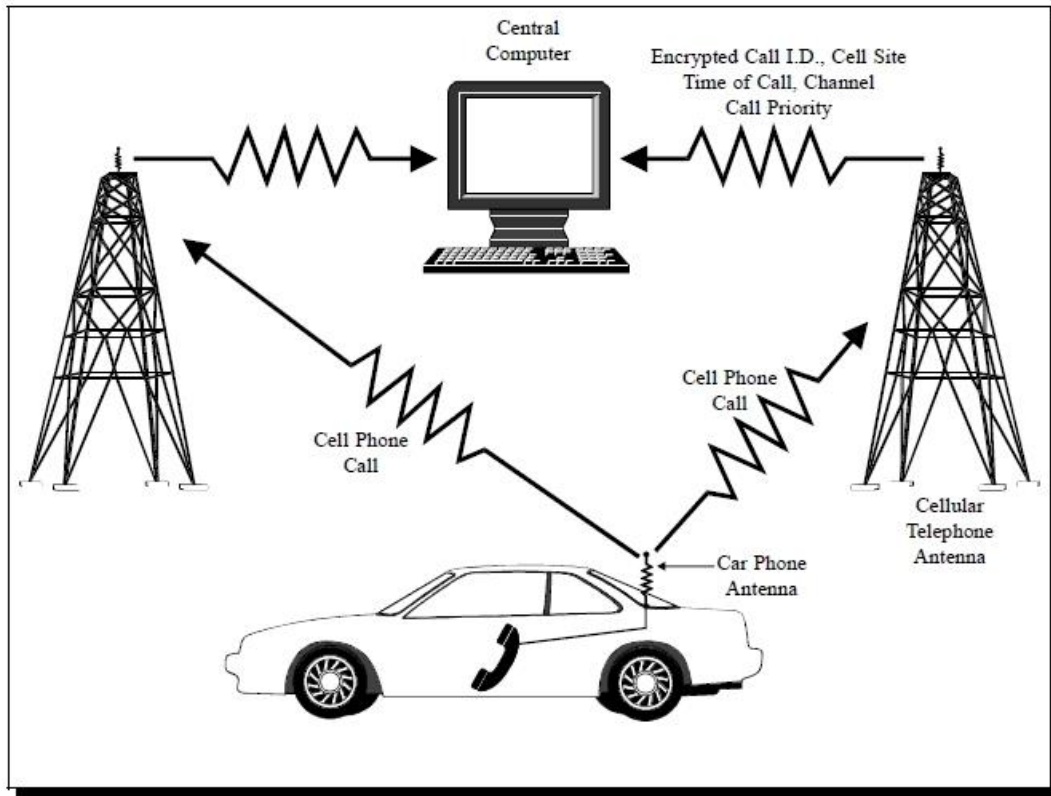
Τα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών διαμερίζονται σε μικρότερα, καθένα από τα οποία ονομάζεται και κυψέλη. Κάθε κυψέλη διαθέτει τουλάχιστον έναν σταθερό πομποδέκτη, τον σταθμό βάσης, ο οποίος παρέχει τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες εντός των ορίων της κυψέλης. Τα όρια αυτά καθορίζονται κυρίως από τις δυνατότητες της κεραίας εκπομπής του σταθμού βάσης (ισχύ εκπομπής, ύψος ιστού κεραίας κ.ά) αλλά και από τα τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά του παρακείμενου περιβάλλοντος (παρεμβολή από γειτονικές κυψέλες, ύπαρξη ψηλών κτιρίων κ.ά). Το κύριο πλεονέκτημα των κυψελωτών δικτύων έγκειται στη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων επικοινωνίας (καναλιών) σε κυψέλες που απέχουν κατάλληλα μεταξύ τους, παρέχοντας έτσι μεγάλη ευελιξία και δυνατότητα εξυπηρέτησης σημαντικού αριθμού χρηστών.

Ωστόσο, πρέπει να αποφεύγεται η διακοπή μιας σύνδεσης που βρίσκεται σε εξέλιξη, όταν ο χρήστης διασχίζει τα όρια της δικής του κυψέλης και εισέρχεται σε νέα, διαφορετικής συχνότητας. Η διαδικασία αυτή, που εκτελείται αυτόματα, ονομάζεται μεταγωγή κλήσης (handover) και προσφέρει στον χρήστη νέο κανάλι επικοινωνίας από τα διαθέσιμα κανάλια του νέου σταθμού βάσης, χωρίς τη διακοπή της σύνδεσης. Συνεπώς, για να μπορεί να ανιχνευθεί πότε πραγματοποιείται μια μεταγωγή αλλά και για την επιλογή του κατάλληλου σταθμού βάσης, το τηλεφωνικό κέντρο πρέπει να είναι σε θέση να εξακριβώσει τη θέση ενός κινητού. Αυτό γίνεται μέσω μιας διαδικασίας αυτόματης επικοινωνίας με το κινητό τηλέφωνο του χρήστη ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ακόμα και σε στιγμές όπου ο χρήστης δεν χρησιμοποιεί το κινητό τηλέφωνό του. Ωστόσο, για εξοικονόμηση της μπαταρίας του κινητού και τηλεπικοινωνιακών πόρων του συστήματος, συνήθως, η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται έπειτα από έναρξη κλήσης από την πλευρά του χρήστη. Σε αυτές ακριβώς τις περιπτώσεις στηρίζεται η πρόταση αξιοποίησης των δεδομένων που παράγονται κατά την επικοινωνία ενός σταθμού βάσης με ένα κινητό, με σκοπό την εξακρίβωση της θέσης του τελευταίου.

Η εξακρίβωση της θέσης ενός κινητού γίνεται από τη σύγκριση της στάθμης (ενέργειας) του σήματος που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης και αυτής που λαμβάνεται από ένα κινητό. Η διαφορά τους οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος, μέσω της οποίας υπολογίζεται η απόσταση ενός κινητού από τον σταθμό βάσης. Ωστόσο, η σχέση της εξασθένησης ισχύος λήψης ενός σήματος αναλογικά με το τετράγωνο της απόστασης ισχύει μόνο στον ελεύθερο χώρο, δηλαδή σε περιβάλλον απουσία εμποδίων κατά την κατεύθυνση διάδοσης του σήματος. Στην πραγματικότητα, και ειδικά σε αστικό περιβάλλον, λόγω πολλαπλών εμποδίων (ψηλά κτίρια, δένδρα κ.τ.λ.) που παρεμβάλλονται κατά την κατεύθυνση διάδοσης, είναι σύνηθες το φαινόμενο το σήμα να εξασθενεί, σε σύγκριση με τη διάδοση σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου. Επίσης, το σήμα ενδέχεται να φθάσει στον χρήστη από πολλαπλές διευθύνσεις έπειτα από ανακλάσεις πάνω σε αντικείμενα του περιβάλλοντος. Είναι, λοιπόν, φανερό ότι η εξάρτηση της εξασθένησης από την απόσταση δεν είναι τόσο απλή, οπότε καθίσταται δυσκολότερος ο υπολογισμός της ακριβούς θέσης ενός κινητού σε τέτοιο περιβάλλον. Διάφορες τεχνικές χρησιμοποιούνται ώστε να αναιρέσουν, εκ των υστέρων, τα δυσμενή αποτελέσματα των διαλείψεων και να οδηγήσουν σε ακριβέστερο προσδιορισμό της θέσης του κινητού. Ωστόσο, αν και βελτιώνουν την ακρίβεια, αυτή γενικά παραμένει σε μέτρια επίπεδα.

Η διαδικασία καταγραφής της θέσης ενός οχήματος με βάση την ανωτέρω τεχνική φαίνεται στο Σχ. 3.2. Συνοπτικά, έπειτα από έναρξη κλήσης χρήστη κινητού τηλεφώνου εντός οχήματος, το κυψελωτό δίκτυο εντοπίζει τη θέση του κινητού σε σχέση με τον πλησιέστερο σταθμό βάσης, με βάση τη διαδικασία που αναφέρθηκε. Η καταγραφή της θέσης του κινητού συνεχίζεται επί όσο χρονικό διάστημα κριθεί απαραίτητο (συνήθως 30-50sec.) ώστε να παραχθούν επαρκή τηλεφωνικά δεδομένα, τα οποία και μεταφέρονται μέσω του δικτύου στο κέντρο ελέγχου προς επεξεργασία. Η συνεχής καταγραφή και

ταυτοποίηση των χρηστών διευκολύνεται από την ειδική ταυτότητα που προσδίδεται σε κάθε νέα κλήση (phone call id). Αν κατά την ανωτέρω διάρκεια το κινητό μεταπηδήσει σε άλλο κανάλι παρακαείμενης κυψέλης, τότε η προηγηθείσα διαδικασία πρέπει να πραγματοποιηθεί από τον νέο σταθμό βάσης. Αφού η κυκλοφοριακή πληροφορία μεταφερθεί στο ΚΔΚ, τότε, με βάση τη θέση του κινητού κατά τις διάφορες χρονικές στιγμές μπορεί να υπολογισθούν πρόσθετα κυκλοφοριακά δεδομένα, όπως η ταχύτητά του.



Σχήμα 3.2. Αρχή λειτουργίας κυψελωτού συστήματος καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων [10].

Η ανάγκη χρησιμοποίησης του υπάρχοντος κυψελωτού δικτύου καθιστά σημαντική για τον πάροχο οδικής πληροφορίας τη συνεργασία του με τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο. Τα δεδομένα κίνησης που συλλέγει ο τελευταίος, πριν μεταφερθούν στο δίκτυο του παρόχου οδικών πληροφοριών, οφείλουν να υποστούν διαδικασία ανωνυμοποίησης ώστε να διασφαλιστεί η ιδιωτικότητα των χρηστών. Στη συνέχεια, τα κυκλοφοριακά δεδομένα απεικονίζονται γραφικά με κατάλληλα εργαλεία σε ένα χάρτη διαδρομών, κάτι που παρέχει καλύτερη εποπτεία στην πιθανή διαδρομή που ακολούθησε κάποιος κινητός χρήστης. Τέλος, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία και κάνοντας χρήση στατιστικών μοντέλων, ο πάροχος είναι σε θέση να εξάγει μια προσέγγιση της ταχύτητας κίνησης του χρήστη. Αυτή, είναι ακριβέστερη επί όση διάρκεια χρησιμοποιείται το κινητό, καθώς τότε, ο πλησιέστερος σταθμός βάσης επικοινωνεί με το κινητό με μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με όταν αυτό είναι ανενεργό (βλέπε Παράρτημα Β).

Πλεονεκτήματα: Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται σε μια συχνά χρησιμοποιούμενη συσκευή, όπως είναι το κινητό τηλέφωνο, οπότε είναι σε θέση να παρέχει άμεσα μεγάλο πλήθος δεδομένων κυκλοφοριακής κίνησης. Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητη η εθελοντική χρήση οδηγών, καθώς η μέθοδος αξιοποιεί το μεγάλο αριθμό των ήδη υπάρχοντων χρηστών. Τέλος, δεν απαιτείται εγκατάσταση ή αγορά πρόσθετου εξοπλισμού εντός του οχήματος, παράγοντας που μειώνει το κόστος της μεθόδου.

Μειονεκτήματα: Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η περιορισμένη της ακρίβεια, η οποία επηρεάζεται σημαντικά από την τοπογραφία του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, στα αστικά κέντρα,

εξαιτίας των δυσμενών συνθηκών διάδοσης (ψηλά κτίρια, δένδρα κτλ.), η ακρίβεια των μετρήσεων της θέσης ενός οχήματος έχει βρεθεί απλά επαρκής, ενώ η ταχύτητά του υπολογίζεται σε πολλές περιπτώσεις με σημαντικό σφάλμα. Επίσης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ειδική διαδικασία ανωνυμοποίησης των δεδομένων που συλλέγονται, ώστε να διασφαλιστεί η ιδιωτικότητα των τηλεφωνικών δεδομένων. Τέλος, καθώς η εγκατάσταση νέων σταθμών βάσης αποτελεί κοστοβόρα εργασία, η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι στενά εξαρτώμενη από το υπάρχον κυψελωτό δίκτυο και άρα από τους παρόχους τηλεπικοινωνιών.

3.3 Ανιχνευτές τεχνολογίας Bluetooth (Bluetooth traffic detectors)

Η τεχνολογία Bluetooth (πρότυπο 802.15.1 κατά IEEE) αποτελεί πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας στη ζώνη συχνοτήτων από 2.4 μέχρι 2.485GHz και επινοήθηκε από την εταιρεία Ericsson το 1994. Κατά βάση, πρόκειται για τρόπο επικοινωνίας κοντινής απόστασης (short-range communication) που συνοδεύεται από χαμηλή ισχύ εκπομπής. Συγκεκριμένα, ανάλογα με την αύξηση της ισχύος εκπομπής, αυξάνεται και η εμβέλεια κάλυψης, μέχρι το ανώτατο όριο το οποίο αντιστοιχεί σε απόσταση περίπου 100m για ισχύ εκπομπής 100mW.

Η αρχική ανίχνευση αλλά και η μετέπειτα αναγνώριση κάποιας συσκευής Bluetooth γίνεται μέσω της διευθυνσιοδότησης της συσκευής με μια διεύθυνση που ονομάζεται MAC Address (Media Access Control Address). Η διεύθυνση MAC απαρτίζεται από 6 byte δεδομένων, διαφορετικά για κάθε συσκευή, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κάθε επικοινωνία μεταξύ τερματικών Bluetooth. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αναγνώριση συγκεκριμένης συσκευής Bluetooth και, κατ' επέκταση, η εποπτεία της, καθώς αυτή κάνει χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Γενικά, καθώς η τεχνολογία Bluetooth δεν χρησιμοποιεί μεγάλη ισχύ εκπομπής και είναι απλή στη λειτουργία της, είναι οικονομικά προσιτή. Ο λόγος αυτός εξηγεί και τη χρήση της από μεγάλο αριθμό συσκευών, με κυριότερα τα κινητά τηλέφωνα. Επίσης, συσκευές Bluetooth συχνά χρησιμοποιούνται και εντός κινούμενου οχήματος, είτε μέσω Hands-free Bluetooth ακουστικών, ακουστικών, δηλαδή, που μεταφέρουν την ομιλία από τα ακουστικά του κινητού τηλεφώνου σε αυτά, είτε μέσω ειδικών ηχείων Bluetooth για ακόμα μεγαλύτερη άνεση. Πλέον, είναι αρκετά διαδεδομένο για τους κατασκευαστές αυτοκινήτων να παρέχουν, ενσωματωμένο στην κεντρική κονσόλα, πομπό Bluetooth για ασφαλέστερη επικοινωνία.

Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος ανιχνευτών Bluetooth εντός συγκεκριμένου τμήματος οδικού δικτύου εμφανίζει αρκετές ομοιότητες με τις τεχνολογίες που έχουν ήδη παρουσιασθεί. Κατά μήκος του οδοστρώματος τοποθετούνται, σε προκαθορισμένες θέσεις με προκαθορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους, οι ανιχνευτές/σταθμοί Bluetooth. Οι τελευταίοι, αποτελούν, ουσιαστικά, κατάλληλα σχεδιασμένες πλατφόρμες υλικού που παράγουν το σήμα στην επιθυμητή συχνότητα και το εκπέμπουν χρησιμοποιώντας ενσωματωμένη κεραία. Συνεπώς, μόλις κάποιος σταθμός ανιχνεύσει κινούμενο όχημα εντός του οποίου υπάρχει ενεργή συσκευή Bluetooth, ο επόμενος σταθμός, με βάση τη συγκεκριμένη MAC διεύθυνση του οχήματος, είναι σε θέση να ανιχνεύσει και να καταγράψει με τη σειρά του στοιχεία για το συγκεκριμένο όχημα, επιτρέποντας τον υπολογισμό δεδομένων όπως η ταχύτητά του, το μήκος του κ.ά.

Για την ακρίβεια των μετρήσεων, το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να φιλτράρει κατάλληλα τα μηνύματα των τερματικών συσκευών, ώστε να μπορεί να διαχωρίσει αυτά που λαμβάνονται από μια ενεργή συσκευή εντός οχήματος από τα αντίστοιχα μιας άλλης εκτός αυτού (πχ. ενός πεζού). Επίσης, δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο συσκευές που ενδέχεται να είναι ενεργές και να

χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα μέσα στο ίδιο όχημα, πχ. δυο άτομα που ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω των κινητών τους κάνοντας χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Τα ανωτέρω φαινόμενα είναι αρκετά συνήθη εξαιτίας της χρήσης της τεχνολογίας από αρκετούς πεζούς και εντείνονται στα αστικά κέντρα, οπότε και υποβαθμίζουν την ποιότητα των μετρήσεων [14].

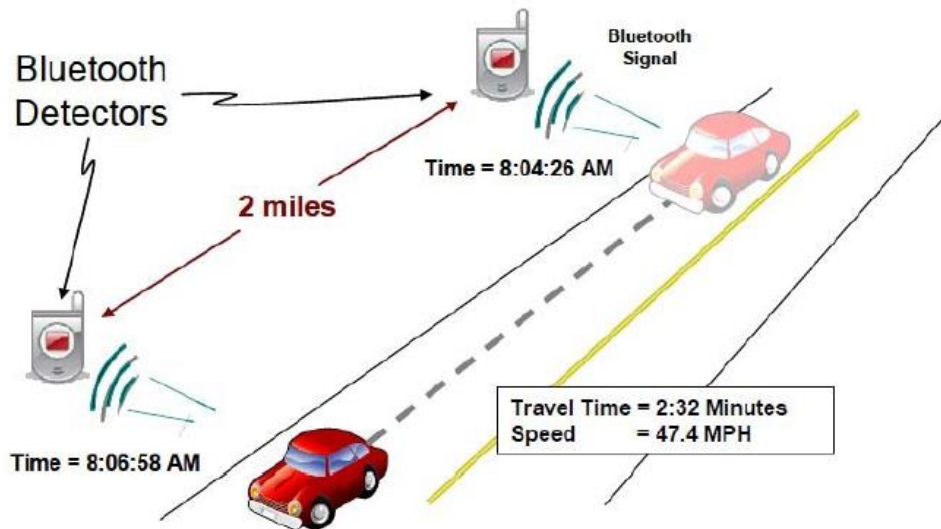


Figure 2 Bluetooth traffic monitoring operation concept

Σχήμα 3.3. Τρόπος λειτουργίας συστήματος ανιχνευτών Bluetooth προς καταγραφή κυκλοφοριακών δεδομένων [11].

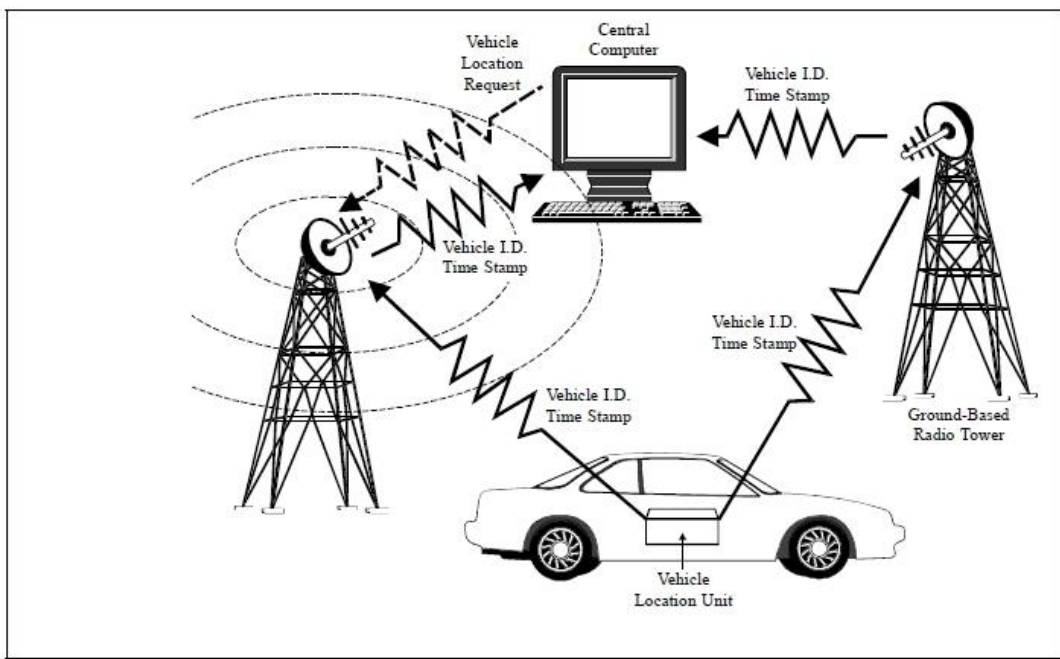
Πλεονεκτήματα: Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος ανιχνευτών Bluetooth αποτελεί το προσιτό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του. Δεν είναι αναγκαία η αγορά ούτε πολύπλοκου εξοπλισμού, όπως προηγμένων αισθητήρων, ούτε η χρονοβόρα και πολύπλοκη εγκατάστασή του, όπως στην περίπτωση των βρόχων επαγωγής εντός του οδοστρώματος. Επίσης, η χρήση πομπών που λειτουργούν με περιορισμένη ισχύ εκπομπής μειώνει περαιτέρω το κόστος λειτουργίας. Η τεχνολογία Bluetooth αποτελεί πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας κοντινής απόστασης, συνεπώς, παρέχει αρκετά ακριβείς μετρήσεις [11], συγκρινόμενες ακόμα και με αντίστοιχες που προέρχονται από GPS.

Μειονεκτήματα: Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αναγκαιότητα του τερματικού να παραμένει ενεργό κατά τη διάρκεια χρήσης της τεχνολογίας Bluetooth. Επίσης, η κατοχή συσκευής Bluetooth δεν προϋποθέτει τη χρήση της στο τμήμα του οδικού δικτύου όπου έχει εγκατασταθεί ένας ανιχνευτής. Είναι, επομένως, φανερό ότι μέχρι η συγκεκριμένη τεχνολογία να καταστεί περισσότερο διαδεδομένη, είναι μικρότερος στατιστικά ο αριθμός των υπό καταγραφή οχημάτων. Συνεπώς, διαθέτοντας μικρότερο δείγμα συγκριτικά με άλλες μεθόδους καταγραφής, το ΚΔΚ πρέπει να εφαρμόσει επ' αυτού ειδικά μαθηματικά εργαλεία στατιστικής ανάλυσης, ώστε να αποκομίσει πληρέστερη εικόνα. Ζητήματα ιδιωτικότητας ανακύπτουν και με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, καθώς κάθε MAC διεύθυνση που αποστέλλεται στο κέντρο ελέγχου αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο όχημα. Τέλος, όπως ήδη έχει αναφερθεί, η μικρή ακτίνα κάλυψης ενός ανιχνευτή Bluetooth οδηγεί στην αγορά και εγκατάσταση μεγάλου αριθμού τους, για εφαρμογές καταγραφής κυκλοφορίας σε μεγάλο τμήμα του οδικού δικτύου.

3.4 Συστήματα ραδιοπλοήγησης (radio navigation systems)

Ένα σύστημα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων αποτελεί έναν ακόμα εναλλακτικό τρόπο ανίχνευσης και παρακολούθησης αντικειμένων εξ αποστάσεως. Στηρίζεται στη χρήση ειδικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που ενσωματώνονται σε διάφορα αντικείμενα και δρουν ως αισθητήρες. Συγκεκριμένα, στα προς παρακολούθηση αντικείμενα ενσωματώνεται ηλεκτρονικό κύκλωμα που ονομάζεται ετικέτα (label ή tag) και το οποίο φέρει τις απαραίτητες πληροφορίες για την ταυτότητα των εν λόγω αντικειμένων. Η ετικέτα είναι σε θέση να απαντήσει και να μεταδώσει αυτές τις πληροφορίες στις ερωτήσεις μιας άλλης συσκευής, που ονομάζεται ανακριτής ή αναγνώστης (interrogator ή reader), και είναι αυτή που ελέγχει τη θέση του αντικειμένου. Για τις ανάγκες της επικοινωνίας, και οι δύο συσκευές είναι εφοδιασμένες με πομποδέκτες. Η συχνότητα στην οποία γίνεται η επικοινωνία ανάμεσα στους δύο αυτούς τύπους συσκευών καθορίζει και τη μέγιστη απόσταση ανάγνωσης μιας ετικέτας.

Οι ετικέτες μπορεί να είναι παθητικές, οπότε και χρησιμοποιούν την ισχύ των ραδιοκυμάτων που λαμβάνουν μετά από ερωτήσεις του ανακριτή, ώστε να μπορούν να εκπέμψουν τις δικές τους απαντήσεις. Μπορεί, επίσης, να είναι ενεργητικές, οπότε και φέρουν ενσωματωμένη μπαταρία και αποστέλλουν οι ίδιες, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, τα στοιχεία τους. Τέλος, μπορεί να είναι παθητικές υποβοηθούμενες από μπαταρία, οπότε και διαφέρουν από την προηγούμενη κατηγορία στο ότι αποστέλλουν απάντηση μόνο μετά από σχετική ερώτηση.



Σχήμα 3.4. Τρόπος λειτουργίας συστήματος ραδιοπλοήγησης για την καταγραφή κυκλοφοριακών δεδομένων [10].

Η ανωτέρω τεχνολογία εφαρμόζεται επιτυχώς και για την ανίχνευση κινούμενων οχημάτων. Ηλεκτρονικές ετικέτες εγκαθίστανται σε δοκιμαστικά οχήματα, τα οποία δειγματοληπτούνται από ένα δίκτυο κεραιών ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency - RF), δίκτυο το οποίο αναλαμβάνει το ρόλο του

ανακριτή. Συνεπώς, οι κεραιές έχουν τη δυνατότητα να αποστείλουν ερωτήσεις και να λάβουν απαντήσεις από τα δοκιμαστικά οχήματα, εξακριβώνοντας έτσι τη θέση τους. Αν τα τελευταία φέρουν ενεργητικές ετικέτες, είναι δυνατή η παρακολούθηση της πορείας τους κάθε χρονική στιγμή, ενόσω αυτά κινούνται εντός της εμβέλειας του δικτύου κεραιών. Η απόσταση ενός οχήματος από μια κεραιά εκπομπής υπολογίζεται προσεγγιστικά ως ακολούθως. Υπολογίζεται ο χρόνος που χρειάζεται η απάντηση μιας ετικέτας μέχρι να ληφθεί από τον πλησιέστερο σταθμό. Το γινόμενο της επί την ταχύτητα διάδοσης της απάντησης, η οποία είναι αυτή των ραδιοκυμάτων στην ατμόσφαιρα, παρέχει την πιθανή θέση του κινητού. Πιθανή, καθώς η διαδικασία αυτή παρέχει τη θέση ενός κινητού μόνο εντός κυκλικού δίσκου και, τελικά, πρέπει να επαναληφθεί άλλες 3 φορές. Δηλαδή, η ακριβής θέση ενός κινητού προϋποθέτει τη μέτρηση της απόστασής του από 4 κεραιές εκπομπής (μέθοδος τριγωνοποίησης). Τα στοιχεία που αποστέλλονται από τις ετικέτες φέρουν χρονοσφραγίδα και ειδική ταυτότητα (identification, id) για κάθε ετικέτα, άρα και για κάθε δοκιμαστικό όχημα. Συνεπώς, το ΚΔΚ είναι σε θέση, με βάση τη γνωστή θέση συγκεκριμένου οχήματος σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές αλλά και την εκ των προτέρων δεδομένη απόσταση των κεραιών που τις κατέγραψαν, να υπολογίσει τη μέση ταχύτητά του. Η συγκεκριμένη διαδικασία απεικονίζεται στο Σχ. 3.4.

Πλεονεκτήματα: Κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί το χαμηλό κόστος λειτουργίας της συγκριτικά με άλλες μεθόδους, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν κεραιές εκπομπής στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επίσης, βασίζεται σε μια ιδιαίτερα ώριμη τεχνολογία, οπότε η λειτουργία ενός παρόχου οδικών πληροφοριών καθίσταται άμεση και οικονομική σε περιοχές όπου ήδη λειτουργούν πάροχοι υπηρεσιών ραδιοπλοήγησης.

Μειονεκτήματα: Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η μέτρια ακρίβεια των μετρήσεων που παρέχει (σε σχέση πχ. με τη χρήση συσκευών GPS), καθώς η διάδοση των ραδιοκυμάτων στην ατμόσφαιρα υφίσταται ποικίλα φαινόμενα διαλείψεων. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί και ο μη αντιπροσωπευτικός, για τον γενικότερο πληθυσμό, τύπος οδηγών που χρησιμοποιεί την τεχνολογία, και ο οποίος εργάζεται κυρίως σε εταιρείες μεταφορών. Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί και η ανάγκη ενσωμάτωσης ετικετών σε νέο αριθμό χρηστών, για μεγαλύτερη διεισδυτικότητα της τεχνολογίας. Τέλος, οι πάροχοι οδικών πληροφοριών είναι στενά εξαρτημένοι, για τη συγκέντρωση των επιθυμητών κυκλοφοριακών δεδομένων που χρειάζονται, από τους παρόχους υπηρεσιών ραδιοπλοήγησης.

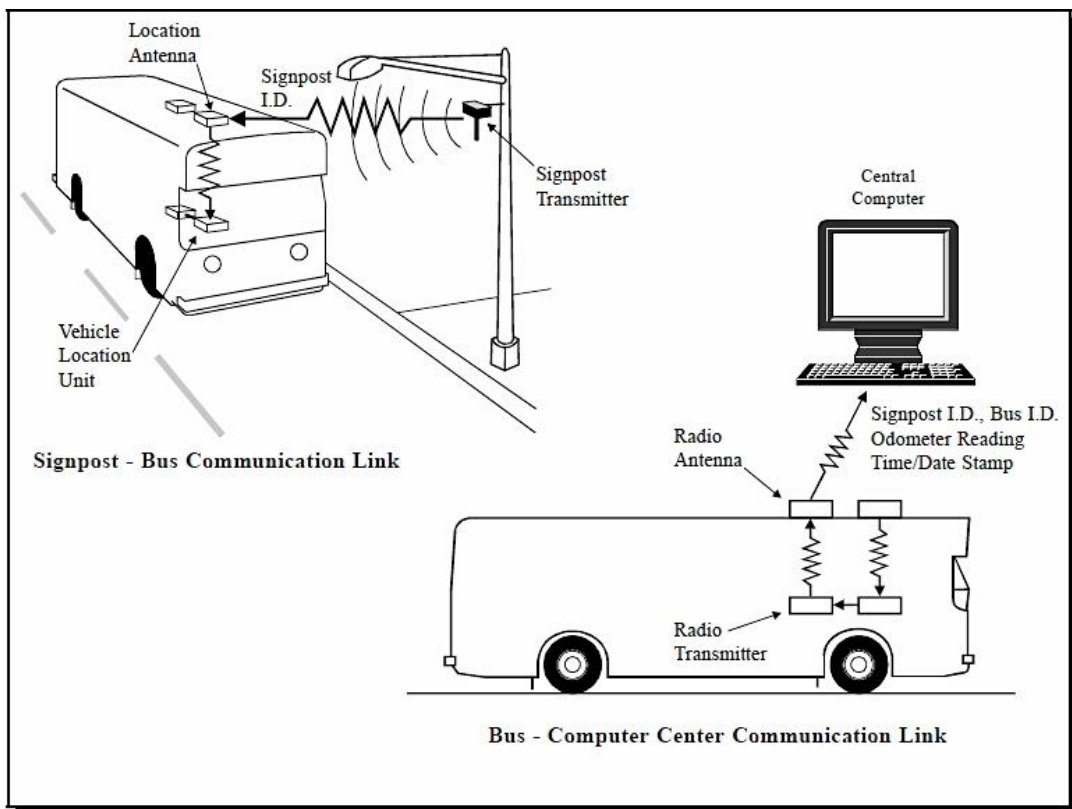
3.5 Αυτόματος εντοπισμός οχήματος βασισμένος σε πινακίδες (signpost-based automatic vehicle location)

Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως από οργανισμούς συγκοινωνιών και εταιρείες μεταφορών για την εποπτεία, τήρηση του ωρολογιακού προγράμματος και, γενικότερα, αποδοτικότερη χρήση του στόλου των οχημάτων τους. Τείνει να αντικατασταθεί από νεότερες τεχνολογίες εντοπισμού θέσης οχημάτων, όπως από συσκευές GPS, αν και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται, ειδικά σε μεγάλα αστικά κέντρα.

Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα τέτοιο σύστημα είναι:

- Ηλεκτρονικοί πομποί που εγκαθίστανται κυρίως σε πινακίδες σήμανσης ή στύλους φωτισμού
- Δέκτης, αισθητήρας παρακολούθησης του οδομέτρου, κεντρική μονάδα επεξεργασίας, πομπός RF, όλα εγκατεστημένα εντός του προς παρακολούθηση οχήματος
- Κέντρο συλλογής και επεξεργασίας της πληροφορίας

Η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει δύο στάδια. (i) Την επικοινωνία μεταξύ του ηλεκτρονικού πομπού και του οχήματος συγκοινωνίας και (ii) την επικοινωνία του οχήματος με το ΚΔΚ. Αρχικά, ο πομπός RF επί του οδοστρώματος εκπέμπει σήμα που περιλαμβάνει την ταυτότητά του (id code) και το οποίο λαμβάνεται από το κινούμενο προς τον πομπό όχημα. Η πληροφορία αυτή συγκεντρώνεται στην κεντρική μονάδα, λαμβάνει χρονοσφραγίδα και ενσωματώνεται σε ένα μήνυμα πληροφορίας που περιλαμβάνει εκτός αυτών, την ένδειξη οδομέτρου του οχήματος και της ταυτότητάς του, που συνήθως ταυτίζεται με τον αριθμό πινακίδας του. Στη συνέχεια, και με τη βοήθεια του τηλεπικοινωνιακού δικτύου ραδιοσυχνοτήτων, το πακέτο πληροφορίας μεταβιβάζεται στο κέντρο διαχείρισης του στόλου. Εκεί, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, πέρα από την επιτήρηση της θέσης και του δρομολογίου κάθε οχήματος, μπορούν να συναχθούν πρόσθετα δεδομένα κίνησης όπως η μέση ταχύτητά του κτλ.



Σχήμα 3.5. Διαδικασία επικοινωνίας οχήματος με σύστημα αυτόματου εντοπισμού [10].

Πλεονεκτήματα: Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί απλό και άμεσο τρόπο συλλογής δεδομένων κίνησης. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα ευέλικτη, καθώς διάφοροι τύποι αισθητήρων μπορεί να εγκατασταθούν εντός του οχήματος ώστε να επιτρέπουν την εποπτεία της γενικότερης λειτουργίας και απόδοσής του, όπως αισθητήρες για την πίεση των ελαστικών, την κατανάλωση καυσίμου, την καταμέτρηση των επιβατών σε ένα όχημα κτλ. Τέλος, αποτελεί μια αποδοτική εναλλακτική μέθοδο για τον εντοπισμό οχημάτων σε περιοχές όπου το σήμα GPS είναι ασθενές, όπως εντός σηράγγων.

Μειονεκτήματα: Το γεγονός ότι η τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως από εταιρείες μεταφορών και συγκοινωνιών αποτελεί μειονέκτημα για την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος που συγκεντρώνεται σε σχέση με την εικόνα της συνολικής κυκλοφορίας. Τα οχήματα μεταφορών εμφανίζουν συγκεκριμένο προφίλ οδήγησης, κάτι που δεν είναι αντιπροσωπευτικό για τη γενικότερη εικόνα των οδηγών. Ανάλογα, περιορίζεται και η εμβέλεια κάλυψης της συγκεκριμένης μεθόδου μόνο στους οδικούς άξονες κίνησης

του στόλου μεταφορών. Ακόμα, εμφανίζονται αυξημένες ανάγκες συντήρησης και ρύθμισης του εξοπλισμού, κυρίως των ηλεκτρονικών πομπών και αισθητήρων οδομέτρου, για την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων. Συμπερασματικά, αποτελεί πλέον μια παρωχημένη τεχνολογία, καθώς πολλές εταιρείες προτιμούν νεότερες, όπως χρήση συσκευών GPS, οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων με χαμηλότερο κόστος.

3.6 Συστήματα αυτόματης αναγνώρισης οχήματος (Automatic Vehicle Identification Systems - AVIS)

Τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για την ηλεκτρονική συλλογή διοδίων και για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως παροχή οδικών πληροφοριών στους χρήστες, επιτήρηση της οδικής κυκλοφορίας κτλ. Αποτελούνται, κυρίως, από 4 βασικούς παράγοντες:

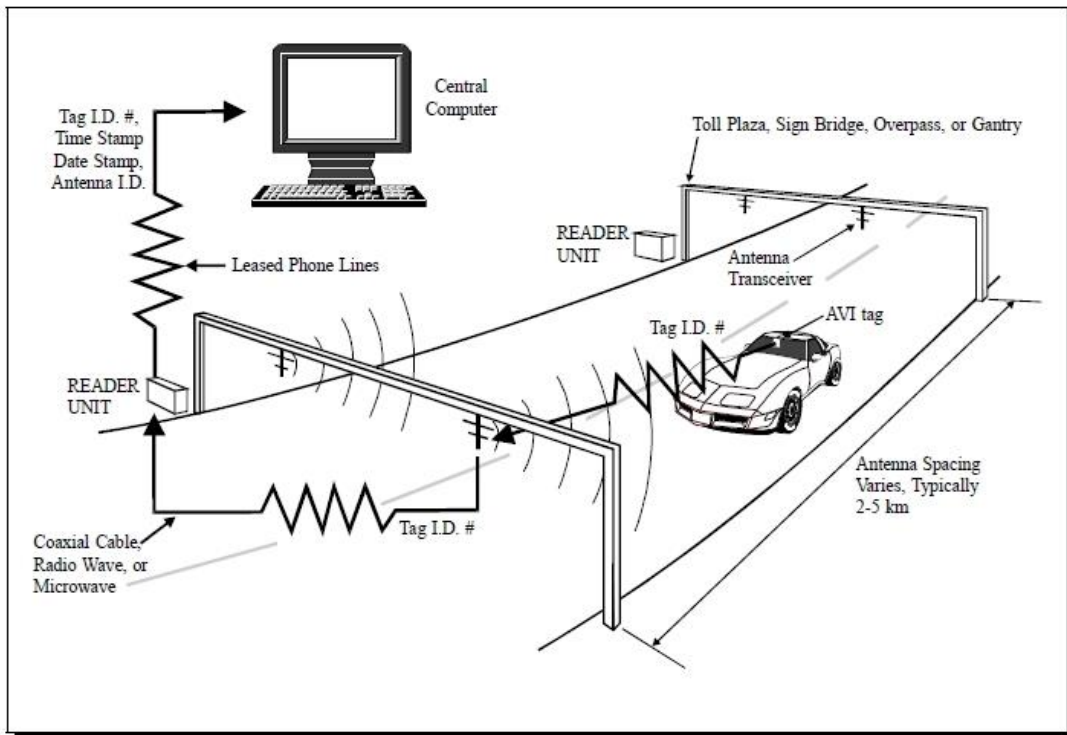
- Δοκιμαστικά οχήματα που φέρουν ηλεκτρονικούς αναμεταδότες
- Κεραίες επί του οδοστρώματος για αναγνώριση των δοκιμαστικών οχημάτων
- Ηλεκτρονικούς αναγνώστες πλησίον του οδοστρώματος
- Κεντρικό υπολογιστή για τη συλλογή των δεδομένων

Οι αναμεταδότες των δοκιμαστικών οχημάτων αποτελούν πομποδέκτες που φέρουν την ηλεκτρονική ταυτότητα (id) κάθε οχήματος, η οποία μπορεί να ταυτίζεται με τον αριθμό πινακίδας του. Οι κεραίες επί του οδοστρώματος εκπέμπουν ραδιοσήματα που λαμβάνονται από τα δοκιμαστικά οχήματα, μόλις αυτά εισέλθουν εντός της ακτίνας κάλυψης των κεραιών. Στη συνέχεια, τα ραδιοσήματα εκπέμπονται ελαφρώς τροποποιημένα, με βάση τη διαφορετική ηλεκτρονική ταυτότητα που φέρει κάθε δοκιμαστικό όχημα, για να συλλεγούν τελικά από την κεραία συλλογής επί του οδοστρώματος. Τα σήματα αυτά συγκεντρώνονται σε έναν ηλεκτρονικό αναγνώστη/ανιχνευτή, που βρίσκεται συνήθως τοποθετημένος στο άκρο του οδοστρώματος, και λαμβάνουν αντίστοιχη χρονοσφραγίδα και σφραγίδα ταυτότητας κεραίας. Το σύνολο των μετρήσεων που συλλέγονται από τους διάφορους αναγνώστες διαβιβάζεται στον κεντρικό υπολογιστή του ΚΔΚ, ο οποίος μετά από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, συνάγει κυκλοφοριακά στοιχεία όπως ταχύτητα, όγκο κίνησης κτλ. Στη διαδικασία αυτή συμβάλλει καθοριστικά η διακριτή ταυτότητα κάθε οχήματος και οι χρονοσφραγίδες από τα διάφορα σημεία από όπου αυτό διήλθε.

Συνήθως, οι κεραίες είναι εγκατεστημένες σε ήδη υπάρχοντες στύλους που βρίσκονται υπεράνω του οδοστρώματος και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για σηματοδότηση. Η θέση τους αυτή προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης της κυκλοφοριακής ροής τόσο ανά κατεύθυνση όσο και ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Κάθε τέτοια εγκατάσταση περιλαμβάνει στην άκρη του οδοστρώματος ηλεκτρονικό αναγνωριστή, ο οποίος παρέχει την πρόσθετη δυνατότητα αναζήτησης συγκεκριμένων οχημάτων έπειτα από σχετικό αίτημα του ΚΔΚ. Τέλος, η απόσταση μεταξύ των εγκατεστημένων κεραιών καθορίζεται από τον όγκο κίνησης του αντίστοιχου οδικού δικτύου. Σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου που εξυπηρετεί μεγάλο πλήθος οχημάτων, είναι αναγκαία η εγκατάσταση περισσότερων κεραιών και σε μικρότερες μεταξύ τους αποστάσεις, συγκριτικά με άλλο μικρότερης ροής χρηστών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην ηλεκτρονική συλλογή διοδίων (Electronic Toll Collection - ETC). Συνεπώς, το κέντρο καταγραφής δεδομένων είναι σε θέση να αξιοποιήσει το πλήθος των οχημάτων που ήδη φέρουν ηλεκτρονικούς αναμεταδότες, για την παραγωγή πληροφορίας κίνησης κατά τις διελεύσεις των οχημάτων από τα διόδια. Ωστόσο, η μεγάλη

απόσταση που μπορεί να απέχουν διαδοχικοί σταθμοί καθιστά αναγκαία την επέκταση του υπάρχοντος συστήματος με εγκατάσταση πρόσθετων κεραιών ραδιοσυχνότητας και αναγνωστών σε ενδιάμεσα σημεία.



Σχήμα 3.6. Διαδικασία ανίχνευσης οχήματος από AVIS για την καταγραφή κυκλοφοριακών δεδομένων [10].

Πλεονεκτήματα: Η συγκεκριμένη μέθοδος χαρακτηρίζεται τόσο από συνεχή κάλυψη της οδικής αρτηρίας στην οποία εφαρμόζεται όσο και από σημαντική ακρίβεια αναγνώρισης οχημάτων, ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες. Σε χαμηλές ταχύτητες, το ποσοστό αναγνώρισης είναι πολύ υψηλό, κάτι που εξηγεί και την καταλληλότητα αυτών των συστημάτων για ηλεκτρονική συλλογή διοδίων. Επιπλέον, το μέγεθος δεδομένων/δείγματος που μπορεί να συλλεγεί είναι μεγάλο, κάτι που επικουρεί την μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων για υπολογισμό συγκεκριμένης πληροφορίας κίνησης, όπως της ταχύτητας. Τέλος, αποτελεί μια μέθοδο που σε μεγάλο βαθμό είναι αυτοματοποιημένη, μη εξαρτώμενη άμεσα από τον ανθρώπινο παράγοντα, κάτι που μειώνει το κόστος λειτουργίας της και οδηγεί στην αποφυγή του ανθρώπινου λάθους.

Μειονεκτήματα: Η συγκεκριμένη τεχνολογία, ωστόσο, εμφανίζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Οι περιοχές κάλυψης εξαρτώνται από την εγκατάσταση κεραιών και αναγνωστών, κάτι το οποίο είναι οικονομικά ασύμφορο για πολλαπλές οδικές αρτηρίες, περιορίζοντας έτσι το εύρος κάλυψης της μεθόδου. Από την άλλη πλευρά, αποτελεί αναγκαία συνθήκη η εγκατάσταση ηλεκτρονικών αναμεταδοτών στο παρμπρίζ των οχημάτων, περιορίζοντας έτσι το μέγεθος του προς καταγραφή δείγματος. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι ηλεκτρονικοί αναμεταδότες έχουν μικρό κόστος. Επιπλέον, ανακύπτουν και ζητήματα ιδιωτικότητας, δεδομένου ότι κάθε όχημα που διαθέτει ηλεκτρονικό αναμεταδότη μεταδίδει τη δική του ταυτότητα, η οποία με τη σειρά της αντιστοιχεί στον κάτοχο του οχήματος. Τέλος, η διαρκής λειτουργία των κεραιών παρέχει πλήθος δεδομένων που πρέπει, όμως, να αποθηκευτούν και να μεταφερθούν, μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, πίσω στο ΚΔΚ. Ο

μεγάλος τους όγκος απαιτεί υπολογιστικό αποθηκευτικό χώρο αλλά και επαρκές τηλεπικοινωνιακό εύρος, στοιχεία που αμφότερα έχουν αξιόλογο κόστος.

3.7 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)

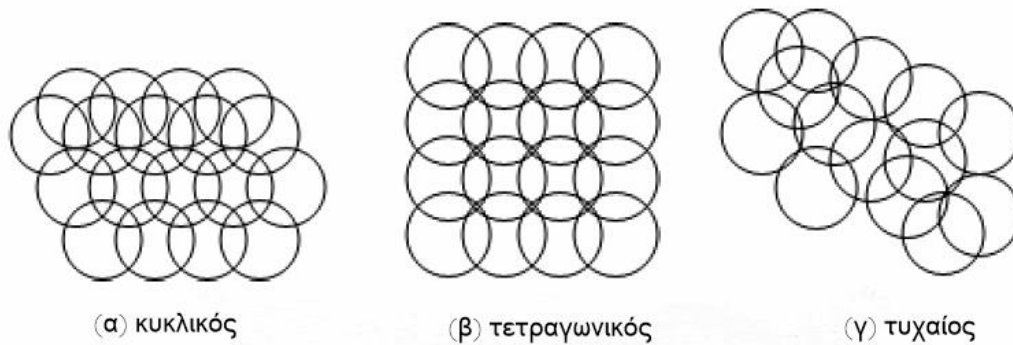
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια ταχύτατα αναδυόμενη τεχνολογία με πολλαπλές εφαρμογές. Αρχικά, υλοποιήθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς και, κυρίως, ως συστήματα επιτήρησης. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματά τους έγιναν γρήγορα αντιληπτά, κάτι που οδήγησε στην ευρεία χρήση τους σε διάφορους τομείς, όπως του περιβάλλοντος, της υγείας, της βιομηχανίας και αλλού. Η άμεση εφαρμογή και λειτουργία τους, το χαμηλό κόστος με το οποίο υλοποιούνται αλλά και η επεκτασιμότητα του συστήματος που προσφέρουν, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στη χρήση των WSN ως δομικό στοιχείο των ITS.

Η αρχή λειτουργίας των WSN στον τομέα των μεταφορών συνίσταται στη δικτύωση πολλών χαμηλού κόστους και κατανάλωσης αισθητήρων και στη συνεργασία τους για την ανίχνευση και παρακολούθηση διερχομένων οχημάτων. Η παρακολούθηση ενός οχήματος πραγματοποιείται έπειτα από την ανίχνευση κατάλληλου σήματος ή διαταραχής κατά τη διέλευσή του από το δίκτυο των αισθητήρων. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένας αισθητήρας σε ένα WSN είναι τα ακόλουθα:

- Το υποσύστημα υπολογισμού. Κάθε αισθητήρας φέρει μικροεπεξεργαστή για τον έλεγχο και τη λειτουργία του ιδίου και των πρωτόκολλων επικοινωνίας.
- Το υποσύστημα επικοινωνίας. Περιλαμβάνει τους πομποδέκτες που επιτρέπουν στον αισθητήρα να επικοινωνεί με το περιβάλλον και με τους υπόλοιπους αισθητήρες του δικτύου.
- Το υποσύστημα αίσθησης. Είναι διαφορετικό για κάθε τύπο αισθητήρα και αποτελεί τον διακριτό τρόπο με τον οποίο ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται το περιβάλλον, συλλέγει, δηλαδή, στοιχεία σχετικά με το διερχόμενο όχημα.
- Το υποσύστημα παροχής ενέργειας. Αποτελεί τη διάταξη που παρέχει την απαραίτητη τροφοδοσία για τη λειτουργία του αισθητήρα. Είναι, συνήθως, μπαταρία μεγάλης διάρκειας ζωής ενσωματωμένη στον αισθητήρα. Ωστόσο, μπορεί να αποτελεί και διάταξη ανανεώσιμης πηγής ενέργειας που καθιστά ενεργειακά αυτόνομο τον αισθητήρα.

Ο τύπος του αισθητήρα που θα επιλεγεί για να σχηματιστεί το WSN γενικά ποικίλλει και επιλέγεται με βάση τον στόχο του εκάστοτε συστήματος καταγραφής κίνησης και τους διαθέσιμους πόρους. Ωστόσο, αποφεύγεται η χρήση των λεγόμενων μη διακριτικών (intrusive) αισθητήρων, όπως είναι οι επαγωγικοί βρόχοι, οι μαγνητικοί αισθητήρες και άλλοι, καθώς η εγκατάστασή τους εντός του οδοστρώματος ή του πεζοδρομίου και η συντήρησή τους, αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες και απαιτούν τη διακοπή της κυκλοφορίας. Συνεπώς, προτιμώνται αισθητήρες που εγκαθίστανται και λειτουργούν πλησίον του οδοστρώματος ή πάνω σε αυτό σε ειδικές θήκες, όπως είναι οι ακουστικοί, οι υπερηχητικοί και άλλοι.

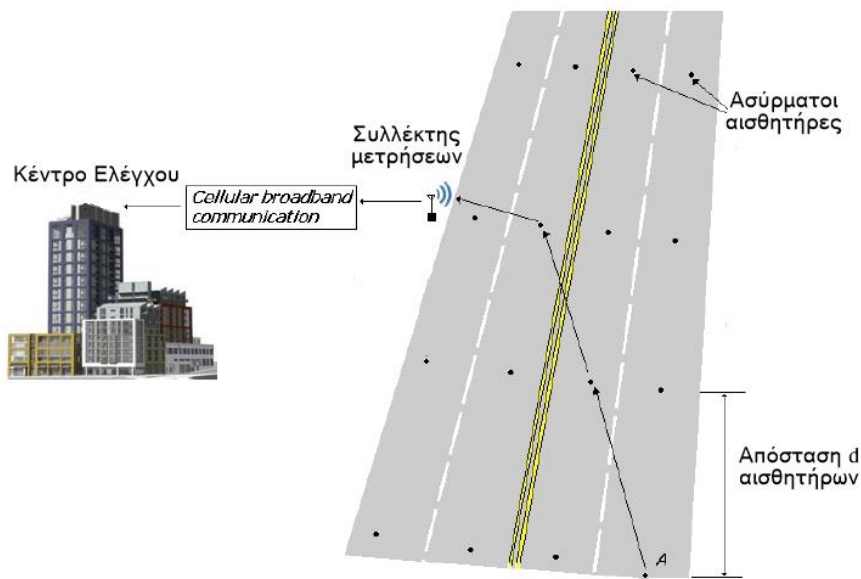
Χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις τρόποι, οι οποίοι και απεικονίζονται στο Σχ. 3.7, τοποθέτησης των αισθητήρων πάνω στο οδόστρωμα, (i) ο τριγωνικός, (ii) ο τετραγωνικός και (iii) ο τυχαίος.



Σχήμα 3.7. Τρόποι τοποθέτησης αισθητήρων σε ένα WSN.

Από τηλεπικοινωνιακή σκοπιά, οι αισθητήρες αποτελούν τους κόμβους ενός δικτύου και, συνεπώς, χρησιμοποιούνται παρεμφερώ, με τα δίκτυα επικοινωνιών, εργαλεία διαχείρισης του δικτύου και δρομολόγησης εντός αυτού. Η ανάγκη συνεργασίας των κόμβων και μετάδοσης στο ΚΔΚ των πληροφοριών που συλλέγει ο καθένας, οδηγεί στην κατανεμημένη δικτύωση (mesh networking) των κόμβων. Στα κατανεμημένα δίκτυα, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων γίνεται με δύο τρόπους. Είτε με τη μέθοδο της πλημμύρας, όπου κάθε κόμβος μεταδίδει την πληροφορία που φέρει σε όλους τους γειτονικούς του, είτε με τη μέθοδο της δρομολόγησης. Η τελευταία, συνίσταται στη μετάδοση του μηνύματος από κόμβο σε κόμβο μέχρι τον τελικό προορισμό και προτιμάται στα WSN, καθώς τελικό στόχο του συστήματος αποτελεί η συγκέντρωση του όγκου της πληροφορίας σε κατάλληλο συλλέκτη πλησίον του οδοστρώματος. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί αποδοτικότερα τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους του συστήματος. Για να επιτευχθεί όμως αυτό, πρέπει σε κάθε μετάδοση ο αρχικός κόμβος να επιλέγει τη συντομότερη διαδρομή προς τον τελικό προορισμό, κάτι που προϋποθέτει γνώση της γενικότερης τοπολογίας του δικτύου και εφαρμογή αλγορίθμων δρομολόγησης. Η γνώση αυτή, επικουρούμενη από κατάλληλους αλγόριθμους αυτοϊασης (self-healing algorithms), εκτός από αποδοτικό, καθιστά το σύστημα αξιόπιστο και ισχυρό (robust), καθώς αυτό μένει ανεπηρέαστο από τη διακοπή λειτουργίας κάποιου κόμβου ή την αναξιοπιστία μιας σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η ανάγκη ενσωμάτωσης σημαντικής υπολογιστικής δύναμης στους αισθητήρες αντισταθμίζεται από την εξοικονόμηση τηλεπικοινωνιακών πόρων αλλά και από την αξιοπιστία και ευελιξία που προσδίδεται στο σύστημα.

Η απόσταση d των αισθητήρων επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τον επιδιωκόμενο βαθμό ακρίβειας των μετρήσεων, τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους αλλά και τον όγκο κίνησης στο προς καταγραφή τμήμα του οδικού δικτύου. Ο συλλέκτης δεδομένων εγκαθίσταται στην άκρη του οδοστρώματος και συγκεντρώνει τον όγκο των μετρήσεων από τους αισθητήρες που ελέγχει. Αποτελεί την πύλη (gateway) ανάμεσα στο WSN και στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού. Το ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας εντός του WSN επιλέγεται συνήθως από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα των οικογενειών 802.11 και 802.15, όπου τα πρώτα είναι τα γνωστά πρωτόκολλα WI-FI, ενώ τα δεύτερα περιλαμβάνουν ενδιαφέρουσες παραλλαγές, όπως το Bluetooth και το Zigbee. Ο τρόπος μετάδοσης των μετρήσεων στο κέντρο επεξεργασίας γενικά ποικίλλει. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε το ήδη υπάρχον κυψελωτό τηλεφωνικό δίκτυο είτε το Διαδίκτυο, κάνοντας χρήση του πρωτοκόλλου IP, είτε ασύρματοι τρόποι επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων, όπως είναι η τεχνολογία Wimax.



Σχήμα 3.8. Τυπική αρχή λειτουργίας WSN για την καταγραφή κυκλοφοριακών δεδομένων [1].

Πλεονεκτήματα: Από τα προηγούμενα, διαπιστώνεται ότι ένα WSN αποτελεί ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο, ευέλικτο, και μικρού κόστους σύστημα για τη διεξαγωγή κυκλοφοριακών μετρήσεων. Μπορεί να αντιμετωπίσει άμεσα τη διακοπή λειτουργίας ενός κόμβου ή μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης και να λειτουργήσει ανεπηρέαστο από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Προσδίδει, επίσης, το χαρακτηριστικό της επεκτασιμότητας και της φορητότητας σε ένα σύστημα καταγραφής κυκλοφορίας, καθώς εύκολα προσαρμόζεται σε μικρές ή μεγάλες εφαρμογές, αλλά και εύκολα είναι σε θέση το ίδιο WSN να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά σημεία ενδιαφέροντος. Τέλος, παρέχει συνεχείς μετρήσεις πλήθους κυκλοφοριακών στοιχείων, ενώ η ευκολία εγκατάστασης και συντήρησής του είναι δεδομένη.

Μειονεκτήματα: Η ασύρματη φύση της επικοινωνίας εντός του WSN από μεγάλο πλήθος κόμβων, δημιουργεί υπολογίσιμο τηλεπικοινωνιακό φορτίο που καλείται να διαχειριστεί ο λειτουργός του WSN. Επιπλέον, τόσο το μικρό μέγεθος των αισθητήρων όσο και η ανάγκη για μικρή κατανάλωση ενέργειας θέτουν περιορισμούς στην υπολογιστική δύναμη των αισθητήρων. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι ανίχνευσης οχημάτων μικρής υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Ωστόσο, κάτι τέτοιο μπορεί να μειώσει την ακρίβεια ανίχνευσης οχημάτων του αλγορίθμου.

3.8 Σύγκριση νέων μεθόδων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθεται σύγκριση των προαναφερθέντων τεχνικών.

Τεχνική καταγραφής οχημάτων	Κόστος αγοράς εξοπλισμού	Κόστος εγκατάστασης	Ακρίβεια κυκλοφοριακών δεδομένων	Περιορισμοί	Ανάγκη στρατολόγησης οδηγών
Χρήση συσκευών Bluetooth	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτρια	Αριθμός χρηστών	Υποχρεωτική
Χρήση συσκευών GPS	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλή	Αριθμός χρηστών	Υποχρεωτική - μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπάρχοντες χρήστες
Χρήση κινητών τηλεφώνων	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλή	Αριθμός χρηστών και σταθμών κυψελωτής τηλεφωνίας	Καμία - χρησιμοποιούνται οι υπάρχοντες χρήστες
Χρήση συστημάτων ραδιο-πλοήγησης	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτρια	Αριθμός χρηστών και περιοχή κάλυψης ραδιοσυχνοτήτων	Υποχρεωτική
Συστήματα αυτόματης αναγνώρισης οχήματος	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλή	Αριθμός κεραιών και χρηστών με ραδιο-ετικέτες	Υποχρεωτική - μπορούν να χρησιμοποιηθούν πελάτες ηλεκτρονικών διοδίων
Αυτόματος εντοπισμός πινακίδων οχήματος	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλή	Αριθμός πινακίδων με εγκατεστημένους πομπούς και δοκιμαστικών οχημάτων, συγκεκριμένες διαδρομές στόλου	Καμία - χρησιμοποιείται ο στόλος οχημάτων εταιρειών συγκοινωνιών

Πίνακας 3.1. Σύγκριση νέων μεθόδων καταγραφής κυκλοφοριακών δεδομένων

3.9 Παράρτημα

A. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας GPS αποτελεί η ακρίβεια στον εντοπισμό της θέσης ενός κινητού και, κατ' επέκταση, στον υπολογισμό πρόσθετων κυκλοφοριακών δεδομένων που απορρέουν από αυτή, όπως της ταχύτητας κίνησης. Η σύγκριση των μετρήσεων που προέρχονται από συσκευές GPS με τις αντίστοιχες από επαγωγικούς βρόχους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Στην έρευνα που περιγράφεται εκτενέστερα στην [5], η σύγκριση της ταχύτητας οχημάτων παρουσίασε διαφορές που στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν υπερέβαιναν τα 2km/h. Στην [4], τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι οι επαγωγικοί βρόχοι τείνουν να υπερεκτιμούν την ταχύτητα των κινούμενων οχημάτων και, κατ' επέκταση, να υποτιμούν τον απαιτούμενο χρόνο για μια διαδρομή. Αντιθέτως, οι VTL ανιχνευτές παρείχαν μετρήσεις εγγύτερα στον πραγματικό χρόνο που αντιμετωπίζει ένας οδηγός. Η τεχνολογία GPS μπορεί να δώσει ακριβή αναπαρασταση των κυκλοφοριακών συνθηκών ακόμα και χρησιμοποιώντας μόνο κινητά τηλέφωνα εφοδιασμένα με ανιχνευτές GPS, ακόμα και με διεισδυτικότητα χρηστών μικρότερη του 5% [4,7,8].

Η ακρίβεια, ωστόσο, της μεθόδου εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της συσκευής GPS, από την τοπογραφία του περιβάλλοντος και από το ρυθμό λήψης μετρήσεων, ενώ παραμένει μέτρια σε περιπτώσεις εντοπισμού της θέσης ποδηλάτων συγκριτικά με άλλα οχήματα, όπως αυτοκίνητα και λεωφορεία [6]. Σημειώνεται, επίσης, ότι η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικουρικά, σε συνδυασμό με περισσότερο παραδοσιακές μεθόδους, όπως είναι οι επαγωγικοί βρόχοι, βελτιώνοντας την ακρίβεια των μετρήσεων. Η έρευνα που περιγράφεται στην [5] διαπιστώνει ότι η ακρίβεια των μετρήσεων και από τις 2 πηγές είναι παρεμφερής, αν και οι συσκευές GPS δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η χρήση επαγωγικών βρόχων σε περιπτώσεις μικρής διεισδυτικότητας δοκιμαστικών οχημάτων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων. Ανάλογα, σε περιπτώσεις επαγωγικών βρόχων εγκατεστημένων αραιά μεταξύ τους, ένα μικρό ποσοστό διεισδυτικότητας δοκιμαστικών οχημάτων μπορεί να έχει πολλαπλάσια επίδραση στη βελτίωση των μετρήσεων. Τέλος, και στις δυο περιπτώσεις εμφανίζεται ένα όριο, πάνω από το οποίο η βελτίωση στην ακρίβεια των μετρήσεων είναι πρακτικά ανεπαίσθητη και πραγματοποιείται με πολλαπλάσιο οικονομικό κόστος.

B. Διάφορες έρευνες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια για τη μελέτη της ακρίβειας των κυκλοφοριακών δεδομένων που παράγονται από τα κυψελωτά τηλέφωνα. Η ακρίβεια των μετρήσεων έχει αποδειχθεί επαρκής για απλές εφαρμογές και κανονικές συνθήκες κίνησης, ακόμα και συγκριτικά με μετρήσεις που προέρχονται από επαγωγικούς βρόχους [1]. Ωστόσο, μειώνεται αισθητά κατά τη διάρκεια ωρών αιχμής, ακριβώς, δηλαδή, τη στιγμή που είναι πιο επιτακτική η αξιοποίηση των μετρήσεων [2]. Επίσης, διαπιστώνεται στενή σχέση ανάμεσα στην εμβέλεια κάλυψης του σταθμού βάσης και της ακρίβειας των μετρήσεων. Όσο μικρότερη είναι η εμβέλεια κάλυψης τόσο εγγύτερα στον σταθμό βάσης θα βρίσκεται πιθανός χρήστης, και, άρα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης του. Συνεπώς, σε αστικές περιοχές με πυκνό δίκτυο σταθμών βάσης, η ακρίβεια των μετρήσεων πλησιάζει αυτή που προέρχεται από συσκευές GPS, ενώ υπολείπεται στις περιπτώσεις όπου το κινητό εξυπηρετείται από μακρινό σταθμό βάσης [3]. Αυτό θεωρείται και ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου, δηλαδή, η μεταβολή της ακρίβειας των μετρήσεων ανάλογα με την απόσταση του χρήστη από τον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί [1].

3.10 Βιβλιογραφία

- [1]. Hillel Bar-Gera (2007-02) - Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel
- [2]. Subbarao V.Wunnava (2006-12) - Travel Time Estimation Using Cell Phones (TTECP) for Highways and Roadways
- [3]. Byeonk-Seok Yoo, Seung-Pil Kang, Chang-Ho Park (2005) - Travel Time Estimation Using Mobile Data
- [4]. Juan C. Herrera, Daniel B. Work, Ryan Herring, Xuegang Ban, Quinn Jacobson, Alexander M. Bayen (2010) - Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment
- [5]. Daoqin Tong, Carolyn J. Merry, Benjamin Coifman (2005-11) - Traffic Information Deriving Using GPS Probe Vehicle Data Integrated with GIS
- [6]. Xiaoyung Zhao, Kenneth Carlingl, Johan Hakansson (2014) - Reliability of GPS based traffic data: an experimental evaluation
- [7]. Pierre-Emmanuel Mazare, Olli-Pekka Tossavainen, Alexandre M. Bayen, Daniel B. Work (2012) - Trade-offs between inductive loops and GPS probe vehicles for travel time estimation: A Mobile Century case study
- [8]. Various Authors (2008-08) - Mobile Century Using GPS Mobile Phones as Traffic Sensors: A Field Experiment
- [9]. Various Authors (2015-06) - Sensor Based Traffic Prediction and Accident Detection using GPS and GSM Technology
- [10]. Various Authors, FHWA (1998-03) - Travel Time Data Collection Handbook
- [11]. Stanley E. Young (2012-06) - Bluetooth Traffic Detectors for Use as Permanently Installed Travel Time Instruments
- [12]. Guillaume Leduc (2008) - Road Traffic Data: Collection Methods and Applications
- [13]. M.R. Friesen, R.D. McLeod (2014-01) - Bluetooth in Intelligent Transportation Systems: A Survey
- [14]. Li Jie, Henk van Zuylen, Liu Chunhua, Lu Shoufeng (2011) - Monitoring travel times in an urban network using video, GPS and Bluetooth

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΛΛΟΓΗ FCD ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ AIMSUN

Όπως έχει προαναφερθεί, για τη συλλογή FCD δεδομένων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, όπου καθεμία αξιοποιεί διαφορετική τεχνολογία και τηλεπικοινωνιακή υποδομή, όπως π.χ. Bluetooth, WIFI, κυψελωτό δίκτυο τηλεφωνίας κ.ά. Η ακρίβεια συλλογής των δεδομένων διαφέρει αντιστοίχως της τεχνικής που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, τα δύο βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ακρίβεια συλλογής, ανεξάρτητα της τεχνικής, αποτελούν το ποσοστό των χρησιμοποιούμενων δοκιμαστικών οχημάτων και η συχνότητα δειγματοληψίας των μετρήσεων.

Στη βιβλιογραφία, έχουν εντοπιστεί διάφορες μελέτες όπου έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιώντας πραγματικού χρόνου FCD δεδομένα από δοκιμαστικά οχήματα. Κύριο μειονέκτημα για την ασφαλή γενίκευση των συμπερασμάτων που εξάγονται σε επίπεδο δικτύου αποτελεί το ανεπαρκές ποσοστό των χρησιμοποιούμενων δοκιμαστικών οχημάτων. Η πλειοψηφία των μελετών, εξαιτίας της δυσκολίας κινητοποίησης υποψήφιων οδηγών, είτε καταφεύγει στη μελέτη περιορισμένου τμήματος του οδικού δικτύου, το οποίο συνήθως αποτελείται από λίγες μόνο λωρίδες, είτε περιορίζει τη μελέτη σε τμήματα αυτοκινητοδρόμων ή δρόμων ταχείας κυκλοφορίας που εμφανίζουν περισσότερο ομαλά και προβλέψιμα χαρακτηριστικά κίνησης σε σύγκριση με ένα αστικό δίκτυο.

Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων προσομοίωσης κυκλοφορίας, τα οποία αναλαμβάνουν την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης κυκλοφορίας σε ένα οδικό δίκτυο (traffic assignment). Ο καταμερισμός της κυκλοφορίας στο δίκτυο αφορά την επιλογή των διαδρομών εκείνων που συνδέουν τα ζεύγη προέλευσης-προορισμού. Αποτελεί, επιπλέον, το τέταρτο βήμα του συμβατικού μοντέλου πρόβλεψης της μεταφορικής ζήτησης. Η πρόβλεψη μεταφορικής ζήτησης είναι η διαδικασία εκτίμησης του αριθμού των οχημάτων ή των ανθρώπων που θα χρησιμοποιούν στο μέλλον ή που χρησιμοποιούν ήδη μία συγκεκριμένη υποδομή του μεταφορικού δικτύου, και περιλαμβάνει 4 στάδια-βήματα (four-step model ή Urban Transportation Planning (UTP)).

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του προγράμματος AIMSUN (έκδοση 8.1.4). Δημιουργήθηκε μία διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface - API) με σκοπό τη συλλογή FCD δεδομένων από δοκιμαστικά οχήματα που κινούνται εντός μέρους του οδικού δικτύου της Αθήνας. Συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε, και η οποία απεικονίζεται στα Σχ. 4.1 και 4.2, είναι το τμήμα της Λεωφόρου Κηφισίας από τον κόμβο στο ύψος της Αττικής οδού έως το αρχικό τμήμα της Λεωφόρου Βασιλίσσης Σοφίας, στο ύψος του Μεγάλου Μουσικής. Η διαπίστωση της δυνατότητας παροχής FCD δεδομένων ικανών να δώσουν ικανοποιητικής ακρίβειας εκτίμηση της υφιστάμενης κυκλοφορίας σε συνθήκες κορεσμού, αποτελεί σημαντική πληροφορία για τους συγκοινωνιολόγους μηχανικούς που αναλαμβάνουν τη διαχείριση του κυκλοφοριακού δικτύου. Ειδικότερα, η Λεωφόρος Κηφισίας περιέχει τμήματα όπου η κίνηση των οχημάτων είναι σχετικά ομαλή και συνεχής, και άλλα όπου εμφανίζονται συνθήκες κορεσμού. Το τρίωρο αιχμής εμφανίζεται κατά τις πρωινές ώρες, 7:00 π.μ.-10:00 π.μ., διάστημα για το οποίο διεξήχθη η προσομοίωση.

Σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης γίνεται προσπάθεια πιστής αναπαράστασης της πραγματικότητας. Ένα κυκλοφοριακό δίκτυο συνδέεται άμεσα με τις έννοιες της προσφοράς και της ζήτησης. Η προσφορά

είναι οι υφιστάμενες υποδομές του δικτύου ενώ η ζήτηση ο αριθμός των χρηστών που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν τις υποδομές αυτές. Χρησιμοποιώντας μοντέλα που περιγράφουν τη συσχέτιση και την αλληλεπίδραση της προσφοράς και της ζήτησης σε ένα κυκλοφοριακό δίκτυο, πραγματοποιείται ο καταμερισμός της κυκλοφορίας εντός αυτού. Ένα ζήτημα αποτελεί το επίπεδο λεπτομέρειας που επιζητείται, μακροσκοπική (macrosimulation) έναντι μικροσκοπικής (microsimulation) προσέγγισης. Επίσης, γίνεται διάκριση μεταξύ στατικών και δυναμικών μοντέλων, δηλαδή, γίνεται χρήση μοντέλων που είτε είναι χρονικά εξαρτώμενα μοντέλα, όπως ο δυναμικός καταμερισμός κυκλοφορίας στο δίκτυο (Dynamic Traffic Assignment - DTA), είτε μοντέλα όπου οι κύριες μεταβλητές είναι ανεξάρτητες του χρόνου, όπως ο στατικός καταμερισμός κυκλοφορίας στο δίκτυο (Static Traffic Assignment - STA). Για τις ανάγκες της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν μικροσκοπικά δυναμικά μοντέλα, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Ουσιαστικά, η προσομοίωση αποτελεί έναν νέο κόσμο που προσπαθεί να περιγράψει τις πραγματικές συνθήκες σε ένα δίκτυο. Για την ελαχιστοποίηση της απόκλισης από την πραγματικότητα έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου ως προς δύο κυκλοφοριακά μεγέθη, φόρτου και ταχύτητας, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από φωρατές εντός της περιοχής μελέτης για την επικαιροποίηση των κυκλοφοριακών δεδομένων.

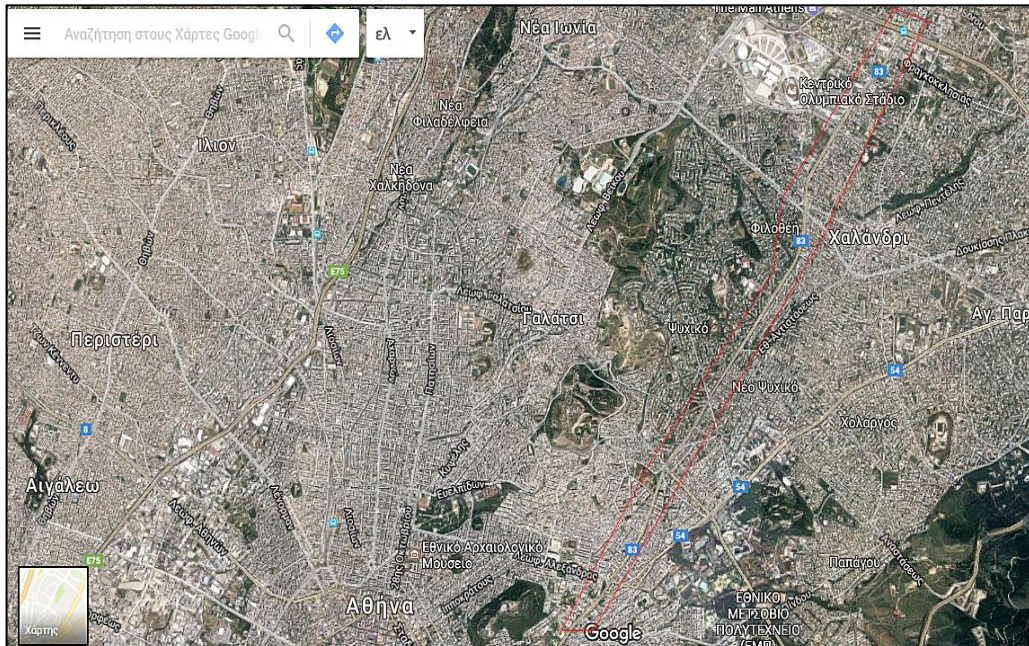


Σχήμα 4.1. Η περιοχή μελέτης στο προγραμματιστικό περιβάλλον του AIMSUN

4.1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN

Το κυκλοφοριακό δίκτυο της Αττικής, από το οποίο εξήχθη το υπο-δίκτυο μελέτης, έχει κατασκευαστεί έπειτα από πολυετή εργασία του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής του ΕΜΠ. Έχει δημιουργηθεί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια στη χάραξή του (λωρίδες και κατεύθυνση δρόμων και στροφών), στην ύπαρξη φωτεινής και κυκλοφοριακής σήμανσης και ειδικών λωρίδων για τα ΜΜΜ. Επίσης, χρησιμοποιεί ρεαλιστικά μοντέλα αναπαράστασης της κίνησης οχημάτων, ανάλογα με τις εκάστοτε κυκλοφοριακές συνθήκες (ελεύθερη ροή, κορεσμός κ.). Επιπλέον, για κάθε οδικό άξονα έχουν

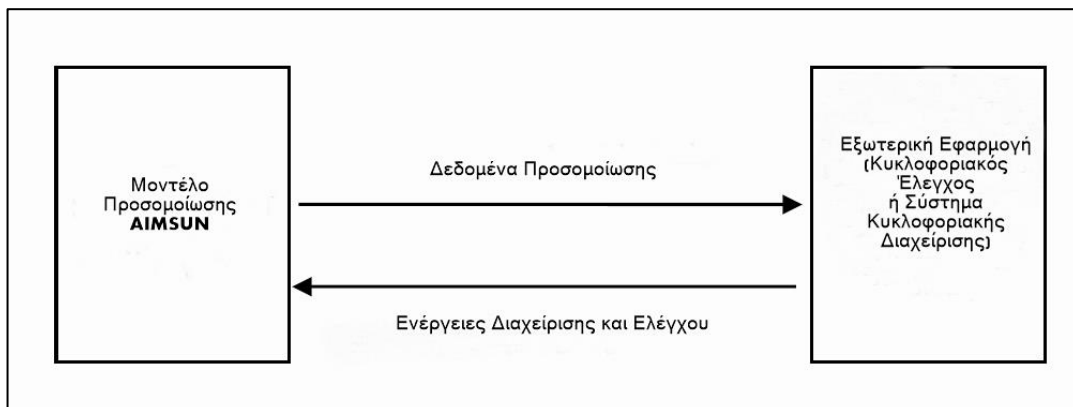
υπολογιστεί τα όρια ταχύτητας αλλά και η μέγιστη χωρητικότητά του. Τέλος, το μοντέλο περιέχει τις θέσεις και τα χαρακτηριστικά όλων των επαγωγικών βρόχων που είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο από το ΚΔΚ, ο αριθμός των οποίων ανέρχεται σε 18 για το συγκεκριμένο δίκτυο μελέτης.



Σχήμα 4.2. Η περιοχή μελέτης (Πηγή: Google Maps).

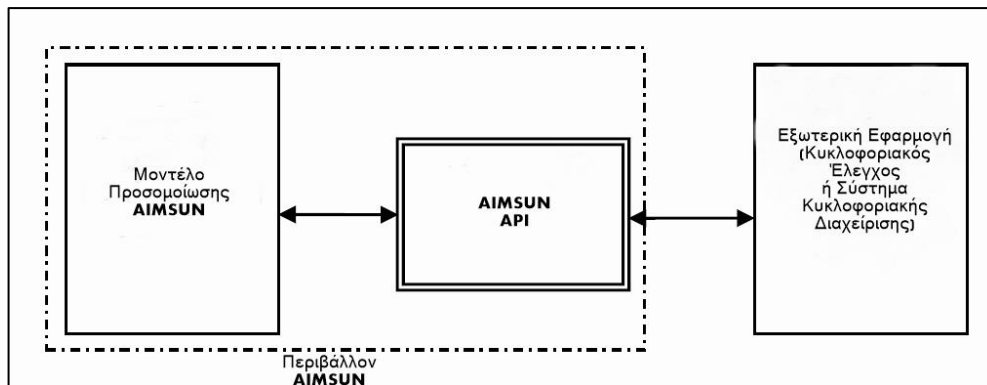
Η (κυκλοφοριακή) ζήτηση περιγράφεται από τον πίνακα προέλευσης-προορισμού που αναπαριστά τη μορφή των μετακινήσεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν εντός του δικτύου μέσα σε κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Η αναπαράσταση αυτή γίνεται από ένα δίκτυο κεντροειδών προέλευσης-προορισμού, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο αντίστοιχο κυκλοφοριακό δίκτυο, του οποίου περιγράφει τις μετακινήσεις και καθορίζει τον αριθμό των χρηστών που επιθυμούν να μετακινηθούν από μία περιοχή του δικτύου σε μία άλλη.

Το AIMSUN διαθέτει πληθώρα συναρτήσεων παροχής δεδομένων προσομοίωσης σε κάθε εξωτερική εφαρμογή που τα αιτείται. Αναλύοντας τα δεδομένα αυτά, η εξωτερική εφαρμογή μπορεί να αποφασίσει για τον τρόπο ελέγχου και τις διαχειριστικές ενέργειες που θα ασκήσει στο δίκτυο. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τις έτοιμες συναρτήσεις του AIMSUN μπορεί να μεταβάλλει δυναμικά διάφορα χαρακτηριστικά του δικτύου (πχ. τις φάσεις της φωτεινής σηματοδότησης σε περίπτωση φόρτου του δικτύου).



Σχήμα 4.3. Διαδικασία ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ του AIMSUN και μιας εξωτερικής εφαρμογής [1].

Για εφαρμογές που απαιτούν δεδομένα σε μικροσκοπικό επίπεδο, όπως κυκλοφοριακά μεγέθη συγκεκριμένων οχημάτων εντός του δικτύου (πχ. ταχύτητα), το AIMSUN παρέχει τη δυνατότητα χρήσης API για την εξαγωγή και τροποποίηση διαφόρων παραμέτρων της προσομοίωσης.

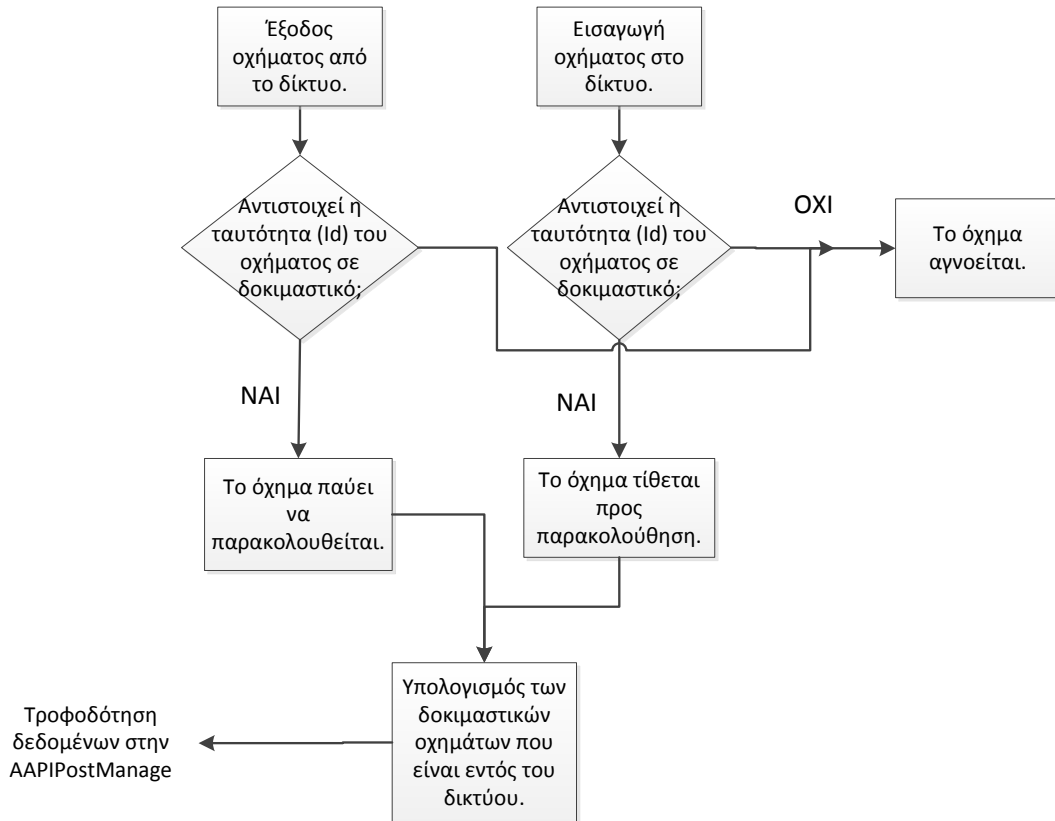


Σχήμα 4.4. Διαδικασία ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ του AIMSUN και μιας εξωτερικής εφαρμογής μέσω χρήσης API [1].

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.4, η API τοποθετείται λειτουργικά μεταξύ του μοντέλου προσομοίωσης και της εξωτερικής εφαρμογής, και φροντίζει για την επικοινωνία των δυο αυτών άκρων. Η επικοινωνία μεταξύ της API και του AIMSUN πραγματοποιείται αυτόματα, με ειδικές εσωτερικές διαδικασίες του προγράμματος. Η επικοινωνία, όμως, με την εξωτερική εφαρμογή οφείλει να πραγματοποιηθεί με ευθύνη του χρήστη. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού PYTHON και κάνοντας χρήση βιβλιοθηκών της συγκεκριμένης γλώσσας και έτοιμων συναρτήσεων του AIMSUN, δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας η API που παρέχεται στο παράρτημα.

Η λογική της API για τη συλλογή FCD δεδομένων είναι η ακόλουθη. Αρχικά, ανάλογα με το ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων κάθε σεναρίου, τίθεται και ο αντίστοιχος αριθμός οχημάτων που εισέρχονται στο δίκτυο προς παρακολούθηση. Η ενέργεια αυτή είναι απαραίτητη, ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η καταγραφή κυκλοφοριακών μεγεθών συγκεκριμένων οχημάτων. Τα δεδομένα που καταγράφονται περιλαμβάνουν την ταυτότητα κάθε οχήματος, τη θέση του εντός οδικού τμήματος, την ταυτότητα του τμήματος αυτού, τη στιγμιαία ταχύτητα (σε km/h) του οχήματος καθώς και τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Τα ανωτέρω δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακες. Τα οχήματα που εξέρχονται από το δίκτυο μελέτης τίθενται ως μη παρακολουθούμενα, ώστε να μη συλλέγονται μετρήσεις από αυτά, και αποθηκεύονται σε ξεχωριστό πίνακα. Οι προηγούμενες ενέργειες πραγματοποιούνται από τις συναρτήσεις AAPIEnterVehicle και AAPIExitVehicle, οι οποίες καλούνται κατά την είσοδο και έξοδο του οχήματος στο και από το δίκτυο, αντίστοιχα. Κάθε χρονική στιγμή κατά την οποία ανανεώνεται η προσομοίωση (ανά 0.8 δευτερόλεπτα), πραγματοποιείται έλεγχος για να διαπιστωθεί η ταυτότητα των οχημάτων που έχουν τεθεί προς παρακολούθηση και παραμένουν εντός του δικτύου. Μόνο για τα οχήματα αυτά και για τις στιγμές που καθορίζονται από την περίοδο δειγματοληψίας κάθε σεναρίου (κάθε $k \cdot Ts$ δευτερόλεπτα, όπου k φυσικός αριθμός), συλλέγονται τα κυκλοφοριακά μεγέθη που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επιπλέον, κάθε 15 λεπτά συλλέγονται οι συναθροισμένες (aggregated) μέσες ταχύτητες του κάθε φωρατή. Όλες αυτές οι ενέργειες πραγματοποιούνται κατά την κλήση της

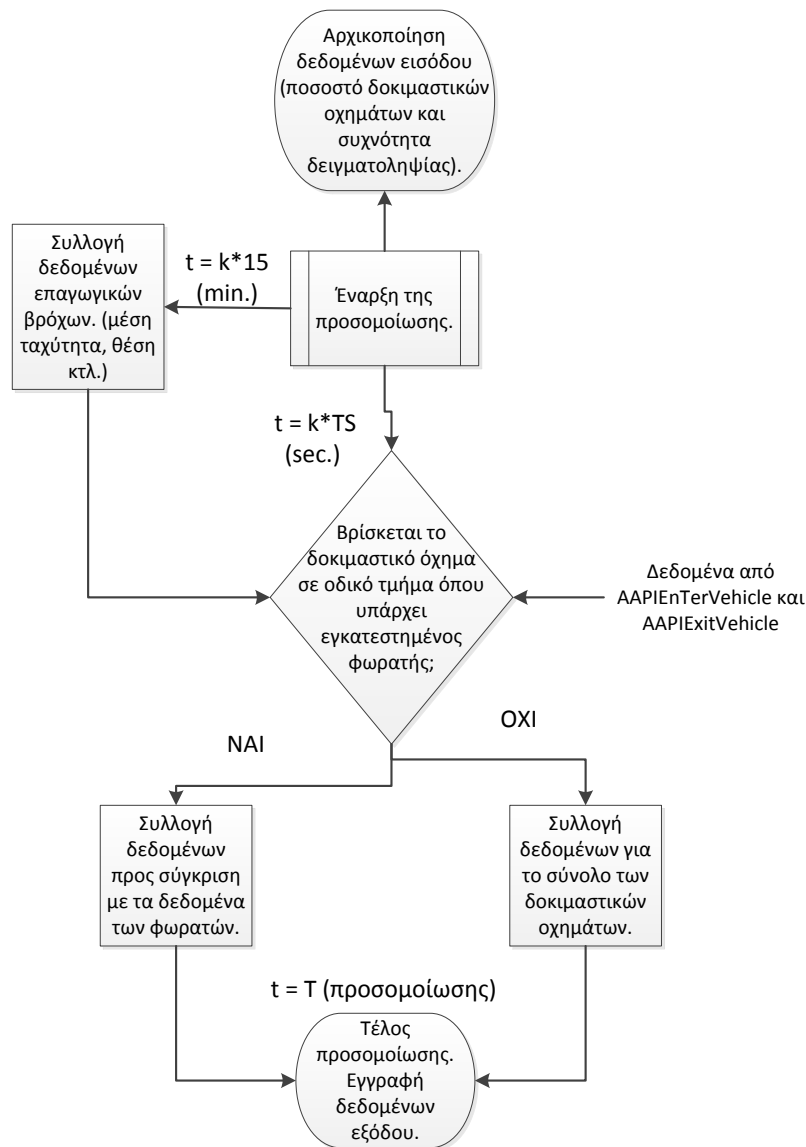
συνάρτησης AAPIPostManage, η οποία γίνεται αυτόματα στο τέλος κάθε κύκλου προσομοίωσης. Ταυτόχρονα, ανανεώνονται οι πίνακες στους οποίους αποθηκεύονται τα κυκλοφοριακά δεδομένα. Στο τέλος κάθε προσομοίωσης, οι πίνακες αποθηκεύονται σε αρχεία excel προς περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 4.5. Λογικό διάγραμμα συναρτήσεων AAPIEnterVehicle και AAPIExitVehicle.

Η σύγκριση της μεθόδου συλλογής δεδομένων FCD σε σχέση με την συλλογή τους από επαγωγικούς βρόχους είναι εύλογο να γίνει χρησιμοποιώντας κάποιο από τα βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη. Οι φωρατές του ΚΔΚ μετρούν τον όγκο της κυκλοφορίας (αριθμό οχημάτων ανά μονάδα χρόνου), την κατάληψη στο οδικό τμήμα αλλά και τη στιγμιαία ταχύτητα των οχημάτων που διέρχονται υπεράνω αυτών. Τελικά, επιλέχθηκε η ταχύτητα ενός οχήματος ως το μέγεθος ως προς το οποίο θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους, λόγω του ότι είναι το περισσότερο ρεαλιστικό κυκλοφοριακό μέγεθος προς συλλογή από δοκιμαστικό όχημα.

Επιπλέον, ενώ το AIMSUN παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της θέσης ενός οχήματος ως προς τις καρτεσιανές συντεταγμένες, επιλέχθηκε να συλλεχθεί η θέση εντός του τμήματος του δρόμου στον οποίο βρίσκεται. Αυτή η (σχετική) θέση είναι μονοδιάστατο μέγεθος και αντιστοιχεί στην απόσταση του οχήματος από την αρχή του οδικού τμήματος. Κατ' αυτό τον τρόπο είναι ευκολότερο να υπολογισθεί η απόσταση του οχήματος ως προς τη θέση των επαγωγικών βρόχων εντός του ίδιου τμήματος.

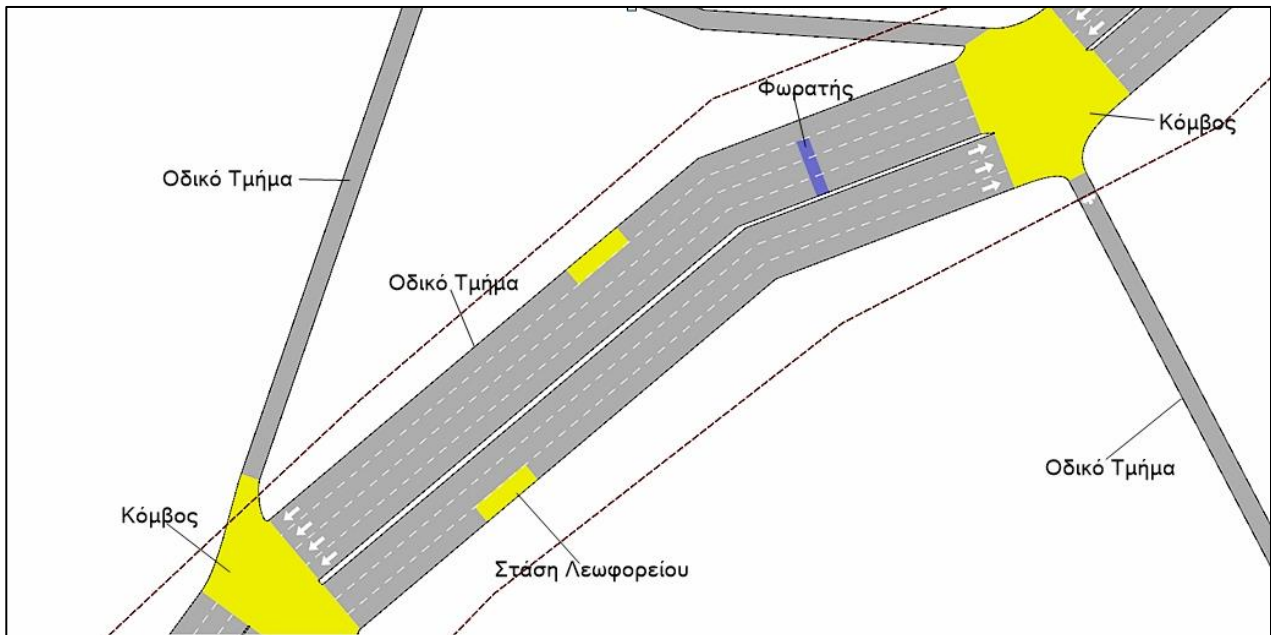


Σχήμα 4.6. Λογικό διάγραμμα συνάρτησης AAPIPostManage.

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση της μέσης ταχύτητας, όπως αυτή υπολογίζεται από τους φωρατές, με αυτή που υπολογίζεται από το σύνολο των δοκιμαστικών οχημάτων, απαιτείται κοινή βάση σύγκρισης. Η τιμή της μέσης ταχύτητας που υπολογίζει ένας φωρατής αποτελεί σημειακή μέτρηση στη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, δηλαδή, αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα των διερχομένων οχημάτων από το συγκεκριμένο σημείο του οδικού τμήματος όπου είναι εγκατεστημένος ο επαγωγικός βρόχος. Αντιθέτως, η ταχύτητα που συλλέγεται κατά τη δειγματοληψία των δοκιμαστικών οχημάτων ενδέχεται να αντιστοιχεί σε θέση οχήματος πλησίον της θέσης ενός φωρατή, ενδέχεται όμως και να αντιστοιχεί σε θέση εντός οδικού τμήματος που δεν φέρει εγκατεστημένο επαγωγικό βρόχο. Αν και κάθε μέτρηση της ταχύτητας ενός δοκιμαστικού οχήματος είναι σημαντική για την ακριβή πρόβλεψη της κυκλοφορίας στο σύνολο του οδικού δικτύου, η συσχέτιση της ταχύτητας ενός οχήματος εντός τμήματος οδικού δικτύου με την αντίστοιχη ταχύτητα του ίδιου οχήματος σε παρακείμενο οδικό τμήμα, ειδικά σε αστικό περιβάλλον, είναι συνήθως μικρή. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας εντός αστικού περιβάλλοντος, η οποία χαρακτηρίζεται από συχνή ύπαρξη φωτεινών σηματοδοτών, πινακίδων οδικής σήμανσης (stop, παραχώρηση προτεραιότητας κ.) αλλά και διασταυρώσεων, μη επιτρέποντας συχνά ελεύθερη ροή κίνησης. Επομένως, οι τιμές της ταχύτητας που θα συλλεχθούν πρέπει να αντιστοιχούν σε

θέσεις δοκιμαστικών οχημάτων, πλησιέστερες κατά το δυνατόν ως προς τις αντίστοιχες θέσεις των φωρατών.

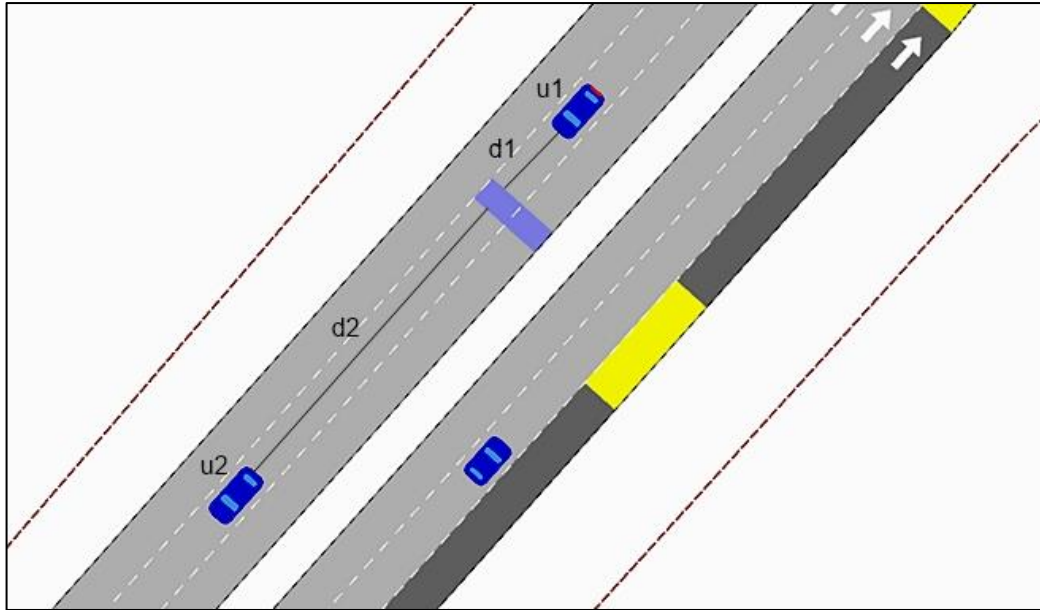
Βασικές δομικές μονάδες του προγράμματος για τη δημιουργία ενός οδικού δικτύου αποτελούν τα οδικά τμήματα (section) και οι κόμβοι (node). Οι συγκεκριμένες οντότητες παρουσιάζονται στο Σχ. 4.7 για την καλύτερη κατανόησή τους. Ένα οδικό τμήμα του μοντέλου της Αθήνας στο AIMSUN παρουσιάζει σχετικά ομαλές συνθήκες, έτσι ώστε δυο στιγμιαίες ταχύτητες ενός οχήματος σε δύο διαφορετικές θέσεις εντός του ίδιου οδικού τμήματος να εμφανίζουν μεταξύ τους συσχέτιση. Οι μετρήσεις της ταχύτητας που θα αξιοποιηθούν για την άμεση σύγκριση με την ταχύτητα που συλλέγουν οι φωρατές, αντιστοιχούν σε θέσεις των δοκιμαστικών οχημάτων μόνο εντός εκείνων των οδικών τμημάτων που φέρουν εγκατεστημένους φωρατές του ΚΔΚ. Γίνεται, επομένως, σαφές ότι δεν θα αξιοποιηθεί το πλήρες σύνολο των FCD μετρήσεων για τη σύγκριση με τη μέση ταχύτητα των φωρατών. Ωστόσο, είναι όλες αναγκαίες για την ακριβέστερη εκτίμηση της κυκλοφορίας εντός του οδικού δικτύου. Τέλος, και από τηλεπικοινωνιακή σκοπιά είναι αναγκαίο να υπολογιστεί το συνολικό μέγεθος των FCD δεδομένων.



Σχήμα 4.7. Τα δομικά οδικά στοιχεία ενός δικτύου στο AIMSUN.

Θεωρώντας το οδικό τμήμα της καθόδου του Σχ. 4.8 και καθορίζοντας ως u_1 τη στιγμιαία ταχύτητα ενός δοκιμαστικού οχήματος σε απόσταση d_1 δεξιά της θέσης του επαγωγικού βρόχου, και ως u_2 την αντίστοιχη ταχύτητα του οχήματος σε απόσταση d_2 αριστερά του επαγωγικού βρόχου, η ταχύτητα του οχήματος υπεράνω του σημείου όπου βρίσκεται εγκατεστημένος ο επαγωγικός βρόχος προκύπτει ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των δύο ταχυτήτων, με βάρη τις εναλλάξ αποστάσεις:

$$u_{avg} = \frac{u_1 d_2 + u_2 d_1}{d_1 + d_2} \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.8. Σενάριο για τον υπολογισμό της σχέσης (4.1).

Ακολουθώντας την ίδια λογική, ο τύπος γενικεύεται για n το πλήθος μετρήσεις. Έστω το διάνυσμα της ταχύτητας $\bar{u} = [u_1, u_2, \dots, u_n]$, όπου u_1, u_2, \dots, u_n οι ταχύτητες των οχημάτων που δειγματοληπτούνται εντός συγκεκριμένου οδικού τμήματος, και έστω το διάνυσμα των σχετικών αποστάσεων $\bar{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$, όπου d_1, d_2, \dots, d_n οι σχετικές αποστάσεις των οχημάτων από τον φωρατή. Έστω, επίσης, $\bar{u}_{\min \rightarrow \max}$ το διατεταγμένο κατά αύξουσα σειρά διάνυσμα της ταχύτητας, και $\bar{d}_{\max \rightarrow \min}$ το διάνυσμα των σχετικών αποστάσεων διατεταγμένο κατά φθίνουσα σειρά. Η μέση τιμή της ταχύτητας του φωρατή είναι ίση με:

$$u_{\text{avg}} = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_n]_{\max \rightarrow \min} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix}_{\min \rightarrow \max} \cdot \frac{1}{(d_1 + d_2 + \dots + d_n)} \Rightarrow$$

$$u_{\text{avg}} = \frac{\bar{d}_{\max \rightarrow \min} \cdot (\bar{u}_{\min \rightarrow \max})^T}{\sum_n d_i} \quad (4.2)$$

Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται ανά δεκαπέντε λεπτά για κάθε φωρατή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται δυνατή η άμεση σύγκριση της ταχύτητας που συλλέγει ο φωρατής με την αντίστοιχη ταχύτητα που προβλέπεται να έχει το δοκιμαστικό όχημα τη στιγμή που διέρχεται από τη θέση στην οποία είναι εγκατεστημένος ο επαγωγικός βρόχος.

4.2 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων προσομοίωσης

4.2.1 Μέτρα ακρίβειας μετρήσεων

Έστω η i -οστή μέτρηση της μέσης ταχύτητας που συλλέγεται με βάση την ανωτέρω διαδικασία από τα δοκιμαστικά οχήματα u_{fcd}^i , και u_{det}^i η μέτρηση της μέσης ταχύτητας του φωρατή που αντιστοιχεί στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η ακρίβεια των μετρήσεων της ταχύτητας των δοκιμαστικών οχημάτων ως προς τις αντίστοιχες τιμές των φωρατών, οι οποίες και θεωρούνται ως οι πραγματικές τιμές (ground truth) της ταχύτητας των κινητών, αξιολογείται με βάση τέσσερις τύπους σφαλμάτων.

(i) Το μέσο σφάλμα ταχύτητας, το οποίο ορίζεται ως ο μέσος όρος της διαφοράς του συνόλου (n) των μετρήσεων της ταχύτητας των δοκιμαστικών οχημάτων από τις αντίστοιχες μετρήσεις των φωρατών σύμφωνα με τη σχέση:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{det}^i - u_{fcd}^i) \quad (4.3)$$

Καθώς το μέσο σφάλμα εξαρτάται από την αλγεβρική διαφορά των δύο ταχυτήτων, αποτελεί μέτρο συστηματικότητας του σφάλματος. Έτσι, στην περίπτωση όπου οι τιμές είναι κατά κανόνα θετικές, οι μετρήσεις της ταχύτητας των δοκιμαστικών οχημάτων φανερώνουν συστηματική αισιοδοξία, ενώ στην περίπτωση όπου η διαφορά είναι κατά κανόνα αρνητική, υποδηλώνεται συστηματική αισιοδοξία, όσον αφορά τις μετρήσεις των δοκιμαστικών οχημάτων.

(ii) Το μέσο απόλυτο σφάλμα της ταχύτητας, το οποίο ορίζεται ως ο μέσος όρος του απολύτου της διαφοράς των μετρήσεων της ταχύτητας των δοκιμαστικών οχημάτων από τις αντίστοιχες μετρήσεις των φωρατών σύμφωνα με τη σχέση:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_{det}^i - u_{fcd}^i| \quad (4.4)$$

Ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος δεν αποδίδει έμφαση στην κατεύθυνση της πρόβλεψης (αισιόδοξη ή όχι), εκφράζει απλά ένα μέτρο ακρίβειας της μετρούμενης ταχύτητας.

(iii) Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της ταχύτητας, το οποίο ορίζεται ως ο μέσος όρος του τετραγώνου της διαφοράς των μετρήσεων της ταχύτητας των δοκιμαστικών οχημάτων από τις αντίστοιχες μετρήσεις των φωρατών σύμφωνα με τη σχέση:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{det}^i - u_{fcd}^i)^2 \quad (4.5)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αποδίδει μεγαλύτερη βαρύτητα στα μεγάλα σφάλματα, καθώς η διαφορά - σφάλμα υψώνεται στο τετράγωνο, και μικρότερη βαρύτητα στα μικρά σφάλματα.

(iv) Το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της ταχύτητας, το οποίο ορίζεται ως ο μέσος όρος του ποσοστιαίου σφάλματος των μετρήσεων της ταχύτητας των δοκιμαστικών οχημάτων από τις αντίστοιχες μετρήσεις των φωρατών σύμφωνα με τη σχέση:

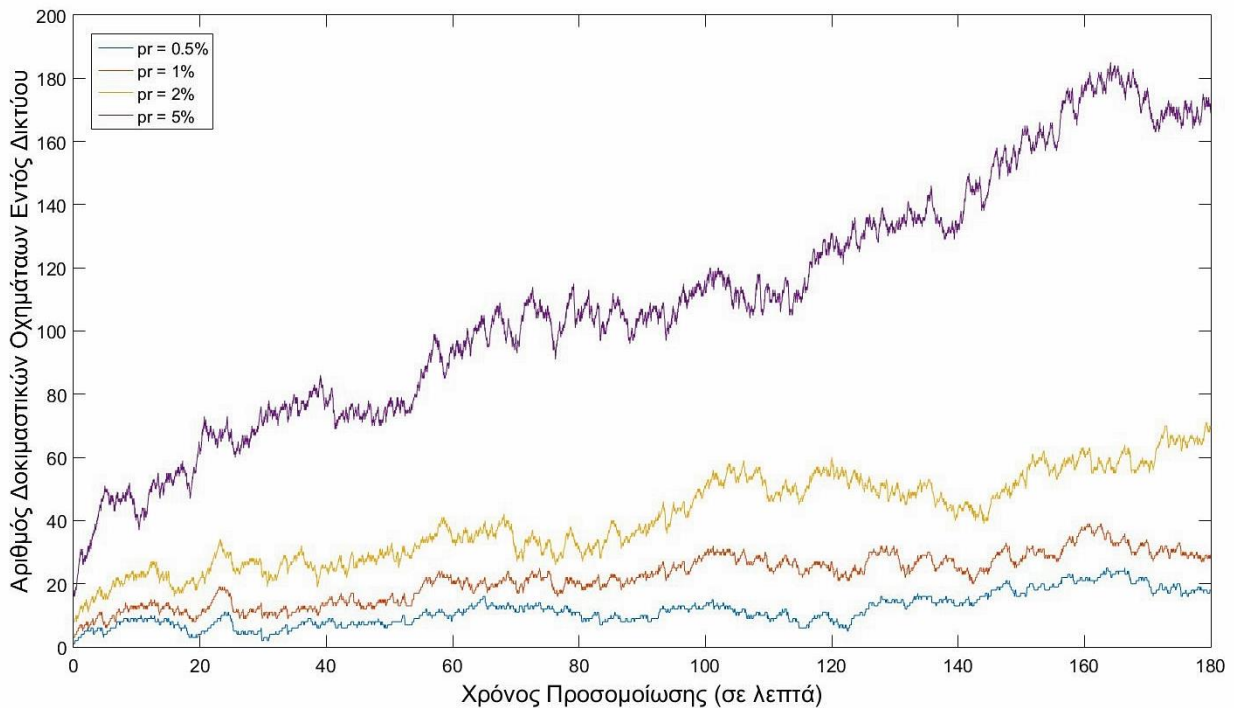
$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{u_{\text{det}}^i - u_{\text{fcd}}^i}{u_{\text{det}}^i} \right| \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος είναι ιδιαίτερα πρακτικός για τη διαχείριση μεγάλων τιμών, ενώ επιτρέπει και καλύτερη εποπτεία και συσχέτιση του σφάλματος με την τιμή αναφοράς μέσω του υπολογισμού ποσοστιαίων σφαλμάτων.

4.2.2 Επιλογή σεναρίων προσομοίωσης

Το διάνυσμα που περιέχει τις διαφορετικές τιμές για το ποσοστό (επί τοις εκατό) των δοκιμαστικών οχημάτων που εισέρχεται στο δίκτυο είναι το $\overline{pr} = [0.5, 1, 2, 5]$ ενώ το αντίστοιχο για τη συχνότητα δειγματοληψίας (σε Hz) είναι το $\overline{sf} = [1/30, 1/10, 1]$. Συχνότητα δειγματοληψίας 1/30Hz αντιστοιχεί σε μία μέτρηση ανά 30 δευτερόλεπτα, συχνότητα δειγματοληψίας 1Hz αντιστοιχεί σε μετρήσεις που συλλέγονται κάθε δευτερόλεπτο κοκ. Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν περιλαμβάνουν τα ζεύγη (sf, pr) = (0.5, 1), (sf, pr) = (1, 1), (sf, pr) = (1, 10), (sf, pr) = (1, 30), (sf, pr) = (2, 1), (sf, pr) = (2, 10), (sf, pr) = (2, 30), (sf, pr) = (5, 1) και (sf, pr) = (5, 10), συνολικά εννέα σενάρια. Η επιλογή αυτών των τιμών αντιπροσωπεύει ολόκληρο το φάσμα των πιθανών σεναρίων μιας πραγματικής εφαρμογής δειγματοληψίας δοκιμαστικών οχημάτων. Έτσι, όπως θα συζητηθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, οι μικρές συχνότητες δειγματοληψίας (1Hz) προσεγγίζουν το όριο δειγματοληψίας που επιτρέπει η τεχνολογία LTE, ενώ τα μεγάλα ποσοστά δοκιμαστικών οχημάτων (άνω των 5%) αποτελούν μη ρεαλιστικές τιμές για το άμεσο μέλλον, λαμβάνοντας υπόψη το αναγκαίο χρονικό διάστημα υιοθέτησης κάθε νέας τεχνολογίας. Συνδυασμός μεγάλης συχνότητας δειγματοληψίας με μικρό ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων ενδέχεται να μην επαρκεί για τον ακριβή υπολογισμό της κυκλοφοριακής ροής. Αντιθέτως, συνδυασμός μικρής συχνότητας δειγματοληψίας και σχετικά μεγάλου ποσοστού δοκιμαστικών οχημάτων δίνει μια ακριβέστερη εικόνα της κυκλοφορίας. Ίσως, όμως, αντιπροσωπεύει και μεγαλύτερο τηλεπικοινωνιακό φορτίο. Συνεπώς, είναι σημαντικό να διαπιστωθεί μέσα από την εργασία, μια ποιοτική σχέση ανάμεσα στη μεταβολή των δύο βασικών μεγεθών εισόδου του συστήματος (sf, pr) και στη σύγκλιση των δεδομένων που συλλέγονται ως προς αυτά των φωρατών.

Το ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων υπολογίζεται ως το ποσοστό των οχημάτων που τίθενται προς παρακολούθηση κατά την είσοδό τους στο δίκτυο, σε σύγκριση με το συνολικό αριθμό των οχημάτων που εισέρχεται σε αυτό. Το ποσοστό αυτό διαφέρει ελαφρώς από το αντίστοιχο ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων που βρίσκονται εντός του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή. Το γεγονός αυτό είναι απόρροια της δυνατότητας που έχουν τα οχήματα να κινούνται ελεύθερα στο πρόγραμμα, αλλά και να διαθέτουν προορισμούς που αντιστοιχούν σε κεντροειδή εκτός του δικτύου. Έτσι, πολλά από τα δοκιμαστικά οχήματα αναπόφευκτα εξέρχονται του δικτύου έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, έχει γίνει η γραφική αναπαράσταση του αριθμού των δοκιμαστικών οχημάτων που βρίσκονται εντός του κυκλοφοριακού δικτύου για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.9. Η μεταβολή του αριθμού των δοκιμαστικών οχημάτων εντός του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για όλα τα ποσοστά δοκιμαστικών οχημάτων pr .

	$pr = 0.5\%$	$pr = 1\%$	$pr = 2\%$	$pr = 5\%$
Min	1	3	8	16
Max	25	39	71	185
Mean	11.61	21.77	40.35	109.2

Πίνακας 4.1. Βασικά στατιστικά δεδομένα για τον αριθμό των δοκιμαστικών οχημάτων εντός του δικτύου για κάθε pr .

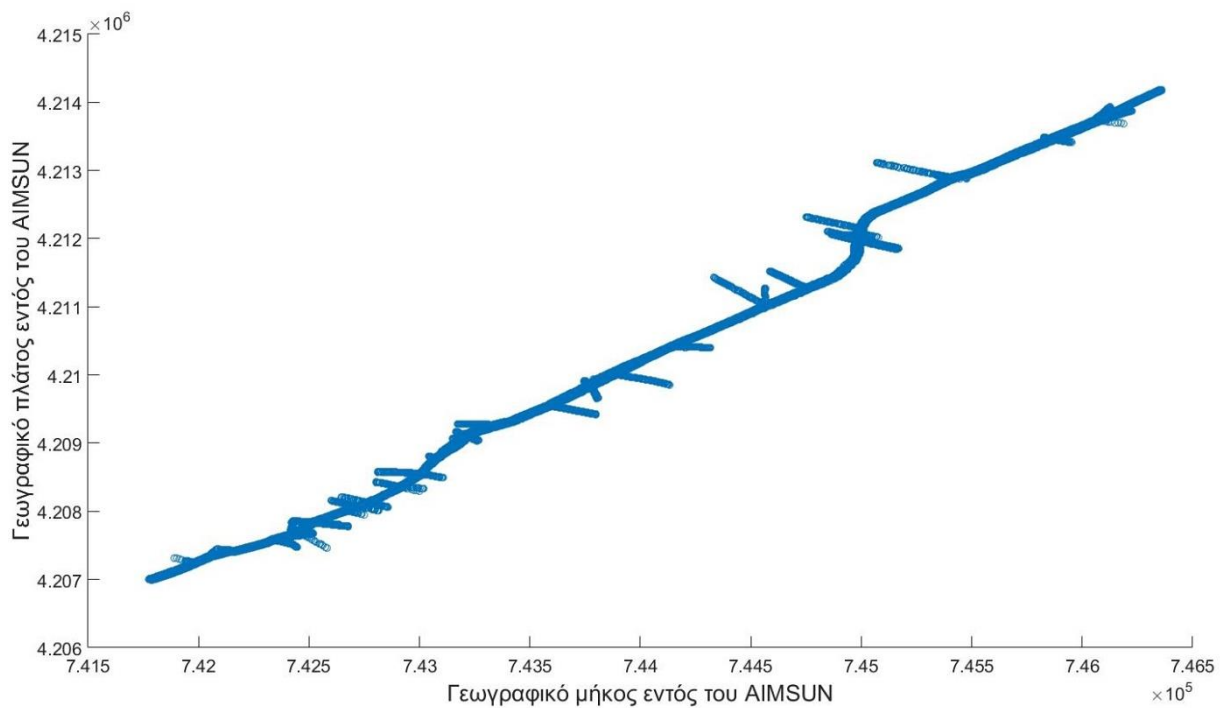
4.2.3 Μεθοδολογία επεξεργασίας αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν ομαδοποιήθηκαν ανά φωρατή και ανά δεκαπεντάλεπτο, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της μέσης ταχύτητας, όπως αυτή υπολογίζεται από την σχέση (4.2), με αυτή που προκύπτει από τα δεδομένα που συλλέγονται από τους φωρατές. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα τέσσερα είδη σφάλματος ανά δεκαπέντε λεπτά για κάθε φωρατή και για τη συνολική διάρκεια της προσομοίωσης. Επιπλέον, το συνολικό σφάλμα στη μέτρηση της μέσης ταχύτητας κάθε φωρατή για το τρίωρο της προσομοίωσης υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των σφαλμάτων των επιμέρους δεκαπενταλέπτων. Τέλος, ο μέσος όρος του σφάλματος για το σύνολο των φωρατών δίνει το τελικό μέσο σφάλμα του κάθε σεναρίου, ενώ η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε σενάριο.

Όλες οι μετρήσεις έχουν στρογγυλοποιηθεί στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο, ενώ πολλαπλές μετρήσεις ταχύτητας που αντιστοιχούν στο ίδιο ακινητοποιημένο όχημα έχουν αγνοηθεί. Στις περιπτώσεις όπου ένα όχημα έχει ακινητοποιηθεί, μόνο η πρώτη μέτρηση του μηδενισμού της ταχύτητας λαμβάνεται υπόψη και οι υπόλοιπες αγνοούνται μέχρι το όχημα να κινηθεί και πάλι. Στις ελάχιστες περιπτώσεις κατά τις οποίες παρατηρήθηκε έλλειψη μετρήσεων σε κάποιο δεκαπεντάλεπτο για κάποιον φωρατή, η μέση τιμή της ταχύτητας συμπληρώθηκε ως ο μέσος όρος της μέσης τιμής των ταχυτήτων του

προηγούμενου και του επόμενου δεκαπενταλέπτου. Τέλος, στις περιπτώσεις όπου η έλλειψη μετρήσεων ταχύτητας αντιστοιχούσε στο πρώτο ή στο τελευταίο δεκαπεντάλεπτο, τότε ως μέση ταχύτητα χρησιμοποιήθηκε η τιμή του δεύτερου και του προτελευταίου δεκαπενταλέπτου αντίστοιχα.

Με βάση τα σφάλματα που υπολογίστηκαν, οι επαγωγικοί βρόχοι ομαδοποιήθηκαν σε δύο σύνολα. Αν και ο συγκεκριμένος διαχωρισμός έγινε κατόπιν της επεξεργασίας των δεδομένων, η θέση των φωρατών εντός του δικτύου αλλά και οι κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούσαν στα οδικά τμήματα όπου αυτοί ήταν εγκατεστημένοι, θα μπορούσε να οδηγήσει στο ίδιο συμπέρασμα. Το πρώτο σύνολο αποτελείται από φωρατές που εμφάνισαν μικρό σχετικά βαθμό σφάλματος (ΜΑΡΕ), μικρότερο του 6%, ενώ το δεύτερο εμφάνισε αντίθετα αποτελέσματα, με μεγάλο βαθμό σφαλμάτων, άνω του 30%. Η αντιδιαμετρική αυτή συμπεριφορά θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.



Σχήμα 4.10. Η εικόνα του δικτύου προσομοίωσης όπως προέκυψε έπειτα από απεικόνιση των στιγμάτων θέσης των δοκιμαστικών οχημάτων για $pr = 2\%$ και $sf = 1Hz$.

4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

4.3.1 Πρώτη κατηγορία φωρατών

Η συγκεκριμένη κατηγορία φωρατών είναι κατά κύριο λόγο εγκατεστημένη είτε σε οδικά τμήματα στην άνοδο της Λεωφόρου Κηφισίας, πάνω από το ύψος της Λεωφόρου Αλεξάνδρας, είτε σε οδικά τμήματα στα οποία απουσιάζει φωτεινή σηματοδότηση. Τα τμήματα στην άνοδο της Λεωφόρου Κηφισίας παρουσιάζουν μικρότερη ροή οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 7.00 - 10.00 π.μ. από τα τμήματα στην κάθοδο της Λεωφόρου Κηφισίας, ειδικά καθώς η κίνηση των οχημάτων απομακρύνεται από το κέντρο της Αθήνας. Από την άλλη πλευρά, τμήματα στα οποία απουσιάζει φωτεινή σηματοδότηση ή σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας, χαρακτηρίζονται από μικρές αυξομειώσεις στην ταχύτητα των χρηστών, ειδικά για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο τα τμήματα αυτά δεν έχουν κορεστεί. Συνεπώς, στα τμήματα αυτά επικρατούν οδηγικές συνθήκες που επιτρέπουν στους χρήστες να προσαρμόσουν την ταχύτητά τους κατά βούληση και, έτσι, η μέση χωρική ταχύτητα των τμημάτων αυτών προσεγγίζει την ταχύτητα ελεύθερης ροής.

Στον Πίν. 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές των σφαλμάτων της πρώτης ομάδας φωρατών για το σύνολο των σεναρίων που προσομοιώθηκαν. Η γραφή dxxx αντιστοιχεί στο φωρατή (detector) αριθμού xxx, ενώ οι συντμήσεις pr και sf στο ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων (penetration rate) και στη συχνότητα δειγματοληψίας (sampling frequency), αντίστοιχα.

Συμπεράσματα

i) Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίν. 4.2 είναι ότι οι FCD μετρήσεις, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων (πχ. d308), υποτιμούν την τιμή της μετρούμενης ταχύτητας, όπως διαφαίνεται και από τις τιμές που λαμβάνει το ME. Αυτό οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού της μέσης ταχύτητας, ο οποίος λαμβάνει υπόψη ένα μεγάλο πλέγμα μετρήσεων σε όλο το μήκος του οδικού τμήματος όπου είναι εγκατεστημένος κάποιος φωρατής. Έτσι, σε οδικά τμήματα όπου υπάρχει φωτεινή σηματοδότηση, μετρήσεις με μηδενικές ή πολύ χαμηλές ταχύτητες εμφανίζονται συχνά στον προσδιορισμό της μέσης ταχύτητας. Οι φωρατές, αντιθέτως, είναι συνήθως τοποθετημένοι σε σημεία που απέχουν ικανοποιητική απόσταση από φωτεινούς σηματοδότες, ώστε να μην επηρεάζονται από το μήκος της ουράς που σχηματίζεται εκεί κατά τη διάρκεια του κόκκινου. Κατ' επέκταση, οι μετρήσεις χαμηλών ταχυτήτων επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό τη μέση ταχύτητα που υπολογίζεται στους φωρατές, από την αντίστοιχη ταχύτητα που υπολογίζεται με χρήση του τύπου 4.2. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στις περισσότερες των περιπτώσεων υποτιμάται η μέση ταχύτητα που υπολογίζεται από τα FCD δεδομένα.

ii) Ένα δεύτερο συμπέρασμα που εξάγεται είναι η καλή ακρίβεια που διαπιστώνεται σε οδικά τμήματα που χαρακτηρίζονται από το κυκλοφοριακό περιβάλλον που περιγράφηκε προηγουμένως. Το υψηλότερο MAPE που παρατηρείται, περίπου 6%, όπως και το MAE, 3.6km/h, είναι μικρά για εφαρμογές συγκοινωνιολογικής φύσης. Συνεπώς, σε οδικούς άξονες που απουσιάζει η φωτεινή σηματοδότηση ή η πολύ υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας ή και τα δύο (όπως είναι οι εθνικές οδοί, η Αττική Οδός, ή ακόμα και τμήματα δρόμων ταχείας κυκλοφορίας εντός πόλεων), ακόμα και ένα μικρό ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων (πχ. 0.5%) είναι ικανό να δώσει αρκετά ακριβή εικόνα της κυκλοφορίας.

pr = 0.5, sf = 1	d275	d280	d284	d290	d291	d292	d302	d308	d348	Μέσο Σφάλμα
ME	1.08	0.77	0.89	0.04	2.74	0.69	2.42	-2.24	1.99	0.931111
MAE	3.31	1.35	2.3	1.59	4.08	4.79	2.96	5.56	3.3	3.248889
MSE	15.71	3.04	7.22	3.88	53.59	49.24	12.38	41.56	15.06	22.40889
MAPE	4.91	2.93	3.43	2.57	9.68	7.61	4.27	8.31	4.77	5.386667
pr = 1, sf = 1										
ME	1.32	0.483	0.93	0.5	1.9	3.12	1.66	-1.67	2.06	1.144778
MAE	2.64	1.45	1.93	1.91	3.2	5.21	2.02	3.53	3.44	2.814444
MSE	10.99	3.55	5.83	5.21	27.55	118.57	5.94	21.01	20.38	24.33667
MAPE	3.91	3.16	2.88	3.1	7.42	8.7	2.92	5.28	4.98	4.705556
pr = 1, sf = 1/10										
ME	1.63	-0.17	1.18	0.07	1.89	3.81	1.67	-2.45	2.36	1.11
MAE	2.9	1.76	2.25	2.63	3.35	6.15	2.16	2.85	3.59	3.071111
MSE	12.8	4.92	9.18	10.7	23.29	154.5	6.96	12.17	22.43	28.55
MAPE	4.29	3.82	3.35	4.26	7.52	10.22	3.12	4.27	5.2	5.116667
pr = 1, sf = 1/30										
ME	1.47	-0.63	0.56	1.74	2.29	2.55	1.43	-2.19	2.72	1.104444
MAE	4.1	2.5	3.74	3.21	3.34	6.63	2.12	3.28	3.63	3.616667
MSE	25.97	8.19	18.45	13.85	22.44	180.33	6.5	14.77	22.25	34.75
MAPE	6.09	5.45	5.6	5.19	7.42	11.03	3.05	4.91	5.25	5.998889
pr = 2, sf = 1										
ME	0.36	0.38	1.09	0.77	1.37	2.74	0.29	-2.77	2.11	0.704444
MAE	1.87	1.13	1.87	1.57	2.03	3.69	1.4	2.88	2.61	2.116667
MSE	4.97	2.07	4.75	4.55	10.1	85.13	2.94	10.98	14.35	15.53778
MAPE	2.77	2.45	2.79	2.54	4.62	6.33	2.01	4.3	3.78	3.51
pr = 2, sf = 1/10										
ME	0.57	0.28	1.13	0.48	1.47	3.38	0.18	-2.91	2.22	0.755556
MAE	2	1.34	1.97	1.36	2.22	4.1	1.49	3.02	2.72	2.246667
MSE	5.67	2.83	6.44	4.2	10.09	104.57	3.73	12.14	14.96	18.29222
MAPE	2.98	2.91	2.92	2.2	4.9	7.03	2.15	4.52	3.94	3.727778
pr = 2, sf = 1/30										
ME	0.59	0.11	0.95	0.71	0.39	3.35	-0.16	-2.1	1.92	0.64
MAE	3.24	2.7	2.61	1.92	1.46	4.85	2.34	3.1	2.67	2.765556
MSE	13.73	9.42	10.36	5.8	3.16	123.94	7.89	11.41	13.3	22.11222
MAPE	4.82	5.87	3.89	3.11	2.91	8.22	3.37	4.63	3.86	4.52
pr = 5, sf = 1										
ME	0.01	0.06	0.66	0.83	2.28	4.16	0.47	-2.2	0.98	0.805556
MAE	0.8	0.34	0.92	1.01	2.5	4.32	1.31	2.28	1.15	1.625556
MSE	1.1	0.23	1.13	1.28	39.13	127.4	3.09	6.53	1.85	20.19333
MAPE	1.18	0.74	1.38	1.64	6.53	7.46	1.89	3.41	1.66	2.876667
pr = 5, sf = 1/10										
ME	0.08	0.13	0.74	0.91	2.24	4.51	0.44	-2.09	1.12	0.897778
MAE	0.86	0.4	1.02	1.08	2.58	4.51	1.37	2.16	1.28	1.695556
MSE	1.3	0.32	1.58	1.64	43.24	150.2	3.28	6.44	2.19	23.35444
MAPE	1.27	0.88	1.51	1.75	6.77	7.83	1.98	3.24	1.86	3.01

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης για την πρώτη ομάδα φωρατών.

Θεωρώντας ως βάση αναφοράς τις τιμές σφάλματος για το πρώτο σενάριο, δηλαδή το σενάριο με ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων ίσο με 0.5% και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 1Hz, υπολογίζεται το ποσοστό επί τοις εκατό της βελτίωσης ή επιδεινώσης του σφάλματος καθόσον αυξάνεται το ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων και/ή συχνότητα της δειγματοληψίας. Ένα αρνητικό ποσοστό υποδηλώνει μείωση του σφάλματος και κατ' επέκταση αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων.

	pr = 1 sf = 1/30	pr = 1 sf = 1/10	pr = 1 sf = 1	pr = 2 sf = 1/30	pr = 2 sf = 1/10	pr = 2 sf = 1	pr = 5 sf = 1/10	pr = 5 sf = 1
ME	18.62	19.21	22.95	-31.26	-18.85	-24.34	-3.58	-13.48
MAE	11.32	-5.47	-13.37	-14.88	-30.85	-34.85	-47.81	-49.97
MSE	55.07	27.4	8.6	-1.32	-18.37	-30.66	4.22	-9.89
MAPE	11.37	-5.01	-12.64	-16.09	-30.8	-34.84	-44.12	-46.6

Πίνακας 4.3. Κανονικοποίηση των σφαλμάτων για τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης ως προς τις τιμές σφαλμάτων για $pr = 0.5\%$ και $sf = 1\text{Hz}$.

Με τη βοήθεια, ωστόσο, του Πίν. 4.4. μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω η κυκλοφοριακή αποτύπωση.

	pr = 1 sf = 1/30	pr = 1 sf = 1/10	pr = 1 sf = 1	pr = 2 sf = 1/30	pr = 2 sf = 1/10	pr = 2 sf = 1	pr = 5 sf = 1/10	pr = 5 sf = 1
pr = 0.5 sf = 1	11.37	-5.01	-12.64	-16.09	-30.8	-34.84	-44.12	-46.6
pr = 1 sf = 1/30		-14.71	-21.56	-24.65	-37.86	-41.49	-49.82	-52.05
pr = 1 sf = 1/10			-8.04	-11.66	-27.14	-31.4	-41.17	-43.78
pr = 1 sf = 1				-3.94	-20.78	-25.41	-36.03	-38.87
pr = 2 sf = 1/30					-17.53	-22.35	-33.41	-36.36
pr = 2 sf = 1/10						-5.84	-19.26	-22.83
pr = 2 sf = 1							-14.25	-18.04
pr = 5 sf = 1/10								-4.43

Πίνακας 4.4. Ποσοστό μεταβολής του MAPE για κάθε σενάριο προσομοίωσης.

iii) Είναι φανερό ότι αυξάνοντας τη συχνότητα δειγματοληψίας, συλλέγοντας, δηλαδή, κυκλοφοριακά δεδομένα συχνότερα, βελτιώνεται η αξιοπιστία των μετρήσεων. Έτσι, με τριπλασιασμό της συχνότητας από το 1/30Hz στο 1/10Hz παρατηρείται μείωση του σφάλματος κατά 14.71% και 17.53% για ποσοστά δοκιμαστικών οχημάτων ίσα με 1% και 2%, αντίστοιχα. Ανάλογη μείωση παρατηρείται κατά τον δεκαπλασιασμό της συχνότητας δειγματοληψίας από το 1/10Hz στο 1Hz, κατά 8.04%, 5.84% και 4.43% για ποσοστά δοκιμαστικών οχημάτων ίσα με 1% και 2% και 5%, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται, όμως, ότι το κέρδος στην αξιοπιστία των μετρήσεων είναι μεγαλύτερο στις περιπτώσεις που αυξάνεται η συχνότητα δειγματοληψίας από μια μικρή αρχική τιμή (1/30Hz) και λιγότερο όταν η αρχική τιμή της συχνότητας είναι ήδη σχετικά υψηλή (1/10Hz). Τέλος, η αύξηση κατά 30 φορές της συχνότητας δειγματοληψίας από

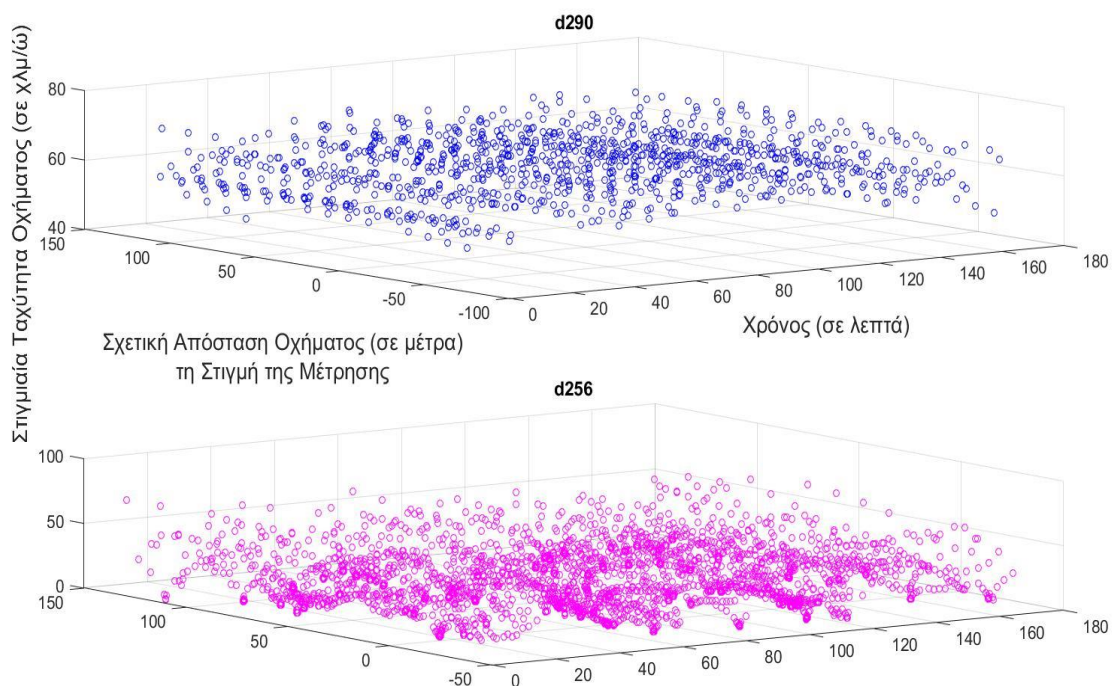
μια αρχική τιμή 1/30Hz απευθείας στην τιμή του 1Hz οδηγεί σε μείωση του MAPE κατά 21.56% και 22.35% για ποσοστά δοκιμαστικών οχημάτων ίσα με 1% και 2%, αντίστοιχα.

iv) Βελτιωτικά ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιδρά και η αύξηση του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων για όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Διπλασιασμός του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων από 0.5% σε 1% επιφέρει μείωση του MAPE κατά 12.64% (για συχνότητα 1Hz). Εκ νέου διπλασιασμός του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων από 1% σε 2% οδηγεί σε μείωση του MAPE κατά 25.41%, 27,14 και 24.65% για συχνότητα δειγματοληψίας 1Hz, 1/10Hz και 1/30Hz, αντίστοιχα. Τέλος, πρόσθετη αύξηση του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων κατά 2.5 φορές, από 2% σε 5%, μειώνει περαιτέρω το MAPE κατά 18,04% και 19.26% για συχνότητα δειγματοληψίας 1Hz και 1/10Hz, αντίστοιχα. Παρατηρείται, επίσης, ότι το κέρδος που επιφέρει στην ακρίβεια των μετρήσεων η αύξηση του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων είναι μεγαλύτερο στις περιπτώσεις όπου αυτό είναι αρχικά ανεπαρκές να δώσει μια ακριβή εικόνα της κυκλοφορίας (περίπτωση 0.5%). Αντίθετα, το κέρδος μειώνεται όσο το διαθέσιμο ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων μεγαλώνει, καθώς σταδιακά παράγεται ακριβέστερη κυκλοφοριακή πληροφορία. Για τη συγκεκριμένη ομάδα φωρατών, όπου είναι εγκατεστημένη σε οδικά τμήματα που χαρακτηρίζονται από ομαλές κυκλοφοριακές συνθήκες, το συμπέρασμα αυτό είναι ήδη εμφανές από χαμηλά ποσοστά δοκιμαστικών οχημάτων, της τάξης του 2%.

v) Τέλος, παρατηρείται ότι μεταξύ των δύο αυτών τρόπων αύξησης της ακρίβειας των μετρήσεων, δηλαδή, της αύξησης της συχνότητας δειγματοληψίας και της αύξησης του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων, ο δεύτερος οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση του MAPE. Ενδεικτικά, η αύξηση της συχνότητας κατά 30 φορές από $sf = 1/30\text{Hz}$ σε $sf = 1\text{Hz}$ διατηρώντας το ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων σταθερό στο $pr = 1\%$ βελτιώνει το MAPE κατά 21.56%, ενώ, αντιθέτως, διπλασιασμός μόνο του pr , από $pr = 1\%$ σε $pr = 2\%$, διατηρώντας τη συχνότητα δειγματοληψίας σταθερή στα 1/30Hz, βελτιώνει το MAPE κατά 24.65%. Ομοίως, δεκαπλασιασμός της συχνότητας δειγματοληψίας από $sf = 1/10\text{Hz}$ σε $sf = 1\text{Hz}$ για $pr = 1\%$ μειώνει το MAPE κατά 8.04%, ενώ διπλασιασμός μόνο του pr βελτιώνει το MAPE κατά 27.14%, και πενταπλασιασμός του, κατά 41.17%. Επιπλέον, αύξηση του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων επιτρέπει συνήθως και μείωση του MAPE με ταυτόχρονη μείωση, εντός ορίων, της συχνότητας δειγματοληψίας. Ενδεικτικά, η μετάβαση από $sf = 1\text{Hz}$ για $pr = 1\%$ σε $sf = 1/30\text{Hz}$ για $pr = 2\%$ βελτιώνει το MAPE κατά 3.94%, ενώ η μετάβαση από $sf = 1/10\text{Hz}$ για $pr = 1\%$ σε $sf = 1/30\text{Hz}$ για $pr = 2\%$ μειώνει το MAPE κατά 11.66%. Διαφαίνεται, ωστόσο, ότι όσο περισσότερο μειώνεται η συχνότητα δειγματοληψίας (με παράλληλη αύξηση του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων) σε σχέση με την αρχική της τιμή τόσο περισσότερο αντισταθμίζεται η μείωση του MAPE, λόγω της μείωσης της sf , από την αύξηση του pr . Δηλαδή, για την επίτευξη δεδομένου MAPE είναι αναγκαία η κατάλληλη αύξηση του pr και άρα η ενσωμάτωση περισσότερων οδηγών, όταν ταυτόχρονα επιχειρείται μείωση της συχνότητας δειγματοληψίας, που με τη σειρά της οδηγεί σε μείωση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου, όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο. Περίπτωση μη επαρκούς αύξησης του pr ύστερα από μείωση της συχνότητας δειγματοληψίας, από $sf = 1\text{Hz}$ σε $sf = 1/30\text{Hz}$, αποτελεί η περίπτωση του διπλασιασμού του pr , από $pr = 0.5\%$ σε $pr = 1\%$, κατά την οποία το MAPE αυξάνεται κατά 11.37%. Για τη μείωση του MAPE της συγκεκριμένης περίπτωσης, είναι αναγκαία περαιτέρω αύξηση του pr (πχ. για $pr = 2\%$, όντως βελτιώνεται το MAPE κατά 16.09%).

4.3.2 Δεύτερη κατηγορία φωρατών

Η συγκεκριμένη κατηγορία φωρατών βρίσκεται κατά κύριο λόγο εγκατεστημένη σε οδικά τμήματα που εμφανίζουν φαινόμενα έντονης οδικής συμφόρησης. Η συμφόρηση αυτή οφείλεται είτε στην έλλειψη της απαιτούμενης χωρητικότητας του οδικού τμήματος για την εξυπηρέτηση της εισερχόμενης σε αυτό ροής οχημάτων είτε στην ύπαρξη φωτεινού σηματοδότη πριν ή μετά τον φωρατή είτε, κυρίως, στο συνδυασμό και των δύο φαινομένων. Τα συγκεκριμένα οδικά τμήματα βρίσκονται κυρίως στην κάθοδο της Λεωφόρου Κηφισίας, η οποία και εμφανίζει φαινόμενα συμφόρησης κατά τις πρωινές ώρες αιχμής, και στα νοτιότερα οδικά τμήματα της ανόδου, τα οποία αποτελούν σημαντικούς κόμβους για τη μετακίνηση των οδηγών από το κέντρο και τα νότια προάστια της Αθήνας προς τη Λεωφόρο Κατεχάκη και Μεσογείων. Κύριο χαρακτηριστικό των μετρήσεων ταχύτητας εντός των συγκεκριμένων οδικών τμημάτων αποτελεί η έντονη διασπορά τους. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.11, είναι εμφανής η διαφορά στη διασπορά ανάμεσα στις μετρήσεις της ταχύτητας που συγκεντρώνονται από το οδικό τμήμα όπου είναι εγκατεστημένος ο φωρατής d290, ο οποίος ανήκει στην πρώτη κατηγορία φωρατών, από τη διασπορά των μετρήσεων του οδικού τμήματος του φωρατή d256, φωρατή που αποτελεί μέλος της δεύτερης ομάδας. Ακόμα ένα χαρακτηριστικό αυτής της ομάδας φωρατών είναι οι αρκετά χαμηλές ταχύτητες κίνησης οχημάτων που συλλέγονται. Μάλιστα, πολλές από αυτές είναι μηδενικές και αντιστοιχούν σε ακινητοποιημένα οχήματα που αποτελούν μέρος ουράς εντός του οδικού τμήματος.



Σχήμα 4.11. Αντιπαραβολή των μετρήσεων των ταχυτήτων που συγκεντρώνονται σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης εντός των οδικών τμημάτων που φέρουν τον d290, της πρώτης κατηγορίας φωρατών, και τον d256 της δεύτερης.

pr = 0.5 sf = 1	d252	d254	d255	d256	d258	d259	d261	d273	d281	Μέσο Σφάλ.
ME	9.1	8.13	9.42	10.02	11.97	4.07	11.1	2.49	0.61	7.43
MAE	11.14	16.13	9.42	10.02	14.4	11.63	11.1	4.95	3.83	10.29
MSE	200.21	337.94	124.45	121.37	228.51	196.24	172.56	36.67	27.41	160.6
MAPE	20.06	37.63	51.64	36.64	48.51	49.65	35.01	26.44	15.7	35.7
pr = 1 sf = 1										
ME	10.81	10.21	10.11	9.48	9.43	9.11	11.48	2.77	3.45	8.54
MAE	11.06	12.37	10.11	9.48	11.7	9.46	11.48	4.27	4.22	9.35
MSE	192.89	204.87	141.51	104.35	163	130.37	164.77	26.47	48.39	130.74
MAPE	19.96	28.86	55.41	35.88	39.22	36.19	37.05	25.33	16.51	32.71
pr = 1, sf = 1/10										
ME	10.36	16.19	12.82	13.37	13.35	13.33	16.06	3.06	3.54	11.34
MAE	11.13	19.57	12.82	13.37	16.49	13.33	16.06	4.48	4.22	12.39
MSE	192.06	426.15	221.7	191.3	321.92	232.39	292.17	32.27	50.93	217.88
MAPE	20.08	45.45	70.61	51.38	55.25	51.97	52.83	27.86	17.51	43.66
pr = 1 sf = 1/30										
ME	13.33	21.8	14.05	16.7	20.48	15.22	19.01	3.21	4.13	14.21
MAE	13.51	28.56	14.05	16.77	20.48	15.22	19.01	4.71	6.11	15.38
MSE	389.08	863.25	263.5	340.03	450.26	264.02	381.78	31.07	101.94	342.77
MAPE	24.48	66.29	77.82	60.06	69.19	62.23	66.06	28.84	22.29	53.029
pr = 2 sf = 1										
ME	13.04	11.82	9.56	11.57	13.19	9.08	11.56	2.66	2.81	9.48
MAE	13.04	11.82	9.56	11.57	13.19	9.08	11.56	3.82	3.47	9.68
MSE	204.05	162.36	123.66	145.79	187.01	103.78	164.87	26.7	34.46	128.08
MAPE	23.44	27.35	52.61	41.76	44.51	35.48	36.73	24.12	14.01	33.33
pr = 2 sf = 1/10										
ME	13.27	20.37	12.47	15.32	17.71	12.79	17.25	3.01	3.23	12.82
MAE	13.27	20.37	12.47	15.32	17.71	12.79	17.25	4.4	4.32	13.1
MSE	216.14	466.38	208.22	257.96	343.09	188.55	336.85	34.59	48.78	233.4
MAPE	23.88	46.8	68.84	54.8	59.59	51.23	56.41	27.33	17.25	45.13
pr = 2 sf = 1/30										
ME	13.16	28.6	14.55	18.7	22.2	16.71	20.2	3.39	3.91	15.71
MAE	13.16	28.6	14.55	18.7	22.2	16.71	20.2	4.81	5.26	16.02
MSE	224.88	889.37	273.72	399.53	531.57	326.51	423.37	35.88	74.49	353.26
MAPE	23.68	65.83	80.99	66.01	75.3	66.59	69.17	28.53	20.29	55.15
pr = 5 sf = 1										
ME	10.85	15.88	8.85	10.97	12.16	9.63	11.49	2.59	3.1	9.50
MAE	10.85	15.88	8.85	10.97	12.16	9.63	11.49	3.48	3.19	9.61
MSE	134.94	266.36	107.62	123.45	157.68	110.22	150	22.12	29.05	122.38
MAPE	19.5	36.73	48.5	40.39	41.05	38.4	37.49	23.67	13.22	33.22
pr = 5 sf = 1/10										
ME	11.12	21.39	11.96	14.48	16.79	13.91	16.42	2.92	3.73	12.52
MAE	11.12	21.39	11.96	14.48	16.79	13.91	16.42	3.79	3.73	12.62
MSE	138.13	483.5	190.33	213.56	295.33	232.86	297.56	26.99	42.01	213.36
MAPE	19.99	49.51	66.03	53.25	56.85	54.91	54.37	26.25	15.57	44.08

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη δεύτερη ομάδα φωρατών.

Συμπεράσματα

i) Με βάση τον Πίν. 4.5, όπως και στην περίπτωση της πρώτης κατηγορίας φωρατών παρατηρείται συστηματική υποτίμηση της μετρούμενης ταχύτητας σε σχέση με την πραγματική, όπως υποδηλώνεται από τις τιμές των ME. Το μέγεθος, ωστόσο, των λαθών είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις της πρώτης ομάδας. Ειδικά τα MAPE και ειδικά για τα σενάρια που χαρακτηρίζονται από μικρή συχνότητα δειγματοληψίας είναι εξαιρετικά υψηλά.

	pr = 1 sf = 1/30	pr = 1 sf = 1/10	pr = 1 sf = 1	pr = 2 sf = 1/30	pr = 2 sf = 1/10	pr = 2 sf = 1	pr = 5 sf = 1/10	pr = 5 sf = 1
pr = 0.5 sf = 1	48.55	22.3	-8.36	54.5	26.41	-6.62	23.48	-6.95
pr = 1 sf = 1/30		-17.67	-38.31	4.01	-14.9	-37.14	-16.87	-37.36
pr = 1 sf = 1/10			-25.8	26.33	3.36	-23.65	0.96	-23.92
pr = 1 sf = 1				68.61	37.95	1.9	34.75	1.54
pr = 2 sf = 1/30					-18.18	-39.56	-20.08	-39.78
pr = 2 sf = 1/10						-26.13	-2.31	-26.39
pr = 2 sf = 1							32.24	-0.35
pr = 5 sf = 1/10								-24.64

Πίνακας 4.6. Ποσοστό μεταβολής του MAPE για κάθε σενάριο προσομοίωσης.

ii) Από τον Πίν. 4.6 γίνεται, επίσης, φανερό ότι ο αποτελεσματικότερος τρόπος αύξησης της ακρίβειας των μετρήσεων για τη συγκεκριμένη ομάδα φωρατών αποτελεί η αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας. Ενδεικτικά, τριπλασιασμός της sf από την τιμή sf = 1/30Hz στην τιμή sf = 1/10Hz βελτιώνει το MAPE κατά 17.67% και 18.18% για ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων pr = 1% και pr = 2%, αντίστοιχα. Ανάλογη βελτίωση του MAPE διαπιστώνεται και κατά την αξιοποίηση μεγάλων συχνοτήτων δειγματοληψίας. Έτσι, ο δεκαπλασιασμός της sf από sf = 1/10Hz σε sf = 1Hz οδηγεί σε μείωση του MAPE κατά 25.8%, 26.13% και 24.64% για ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων pr = 1%, pr = 2% και pr = 5%, αντίστοιχα. Παρατηρείται, αντιθέτως, μικρή μεταβολή του MAPE στις περιπτώσεις αύξησης του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων με παράλληλη διατήρηση σταθερής της συχνότητας δειγματοληψίας. Κατά περίπτωση, η μεταβολή αυτή είναι είτε θετική είτε αρνητική. Συγκεκριμένα, αύξηση του pr από pr = 1% σε pr = 2% και pr = 5% για sf = 1/10Hz επιδρά αρνητικά στον MAPE αυξάνοντάς τον κατά 3.36% και 0.96%, αντίστοιχα. Αντίθετα, αύξηση του pr από pr = 0.5% σε pr = 1%, pr = 2% και pr = 5% για sf = 1Hz βελτιώνει τον MAPE κατά 8,36%, 6,62% και 6,95%, αντίστοιχα. Στην ίδια περίπτωση φαίνεται ανώφελη η αύξηση του ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων από pr = 2% σε pr = 5%, καθώς η μείωση του MAPE είναι πρακτικά ασήμαντη, μόλις 0.35%. Μάλιστα, το μικρότερο MAPE επιτυγχάνεται στο σενάριο με pr = 1% και sf = 1Hz.

iii) Καθίσταται, λοιπόν, σαφές ότι απαιτείται πρόσθετη επεξεργασία δεδομένων για την αύξηση της ακρίβειας των ήδη συλλεχθέντων μετρήσεων ώστε να καταστούν αξιόπιστες. Ο τρόπος υπολογισμού της μέσης ταχύτητας της σχέσης (4.2) βασίζεται στην αξιοποίηση όλων των μετρήσεων εντός του οδικού τμήματος όπου είναι εγκατεστημένος κάποιος φωρατής. Αν και με τη χρήση βαρών αποδίδεται

μεγαλύτερη σημασία στις κοντινές ως προς τον φωρατή μετρήσεις, μετρήσεις χαμηλής ή μηδενικής ταχύτητας εντός του τμήματος λαμβάνονται υπόψη ακόμα και αν απέχουν κάποιες δεκάδες μέτρα από τη θέση του φωρατή. Ένας τρόπος, λοιπόν, συλλογής περισσότερο αντιπροσωπευτικών ως προς την πραγματικότητα μετρήσεων αποτελεί η χρήση μικρότερων αποστάσεων εκατέρωθεν της θέσης του φωρατή. Έτσι, μόνο οι μετρήσεις δοκιμαστικών οχημάτων εντός αυτής της εμβέλειας θα λαμβάνονται υπόψη για τη σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις του φωρατή. Αυτή η διαδικασία, ωστόσο, περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον διαθέσιμο αριθμό μετρήσεων, γεγονός που ενδέχεται να επιδράσει αρνητικά σε σενάρια τα οποία δεν χαρακτηρίζονται από επαρκώς υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας. Είναι αναγκαίος, λοιπόν, ένας επαναληπτικός αλγόριθμος που θα προσαρμόζει την κατάλληλη απόσταση γύρω από τη θέση ενός φωρατή εντός της οποίας θα αξιοποιούνται οι FCD μετρήσεις, με στόχο τη βελτιστοποίηση του MAPE. Επιπλέον, ο αλγόριθμος αυτός θα λειτουργεί υπό τον περιορισμό της ύπαρξης κατάλληλου αριθμού μετρήσεων εντός της περιοχής και εντός του χρονικού παραθύρου κατά τη διάρκεια του οποίου γίνεται η συνάθροιση αυτών.

iv) Η μεγάλη, ωστόσο, διασπορά των μετρήσεων που παρατηρείται και στο Σχ. 4.11 δυσχεραίνει την εξαγωγή ρεαλιστικής κυκλοφοριακής εικόνας όταν αυτή προέρχεται από μικρό ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων. Για να καταστεί η κυκλοφοριακή εικόνα αξιόπιστη πρέπει είτε το δείγμα να είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό της πραγματικής εικόνας είτε αυτό να είναι επαρκώς μεγάλο. Στην περίπτωση της πρώτης κατηγορίας φωρατών, η μικρή διασπορά των μετρήσεων επιτρέπει ακόμα και μικρά ποσοστά δειγματοληψίας να παράγουν αντιπροσωπευτικό δείγμα της κυκλοφορίας. Δηλαδή, η διασπορά των μετρήσεων επηρεάζει την αντιπροσωπευτικότητα ενός δείγματος, η οποία σε περιπτώσεις μετρήσεων μικρής διασποράς επιτυγχάνεται με μικρό δείγμα, ενώ σε περιπτώσεις μετρήσεων μεγάλης διασποράς το δείγμα πρέπει να είναι μεγάλο. Συμπεραίνεται, επομένως, ότι για τη δεύτερη ομάδα φωρατών ένα ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων της τάξης του 5% δεν έχει επιτύχει την αναγκαία αντιπροσωπευτικότητα που επιτυγχάνει το ίδιο ποσοστό δοκιμαστικών οχημάτων στους φωρατές της πρώτης ομάδας. Μάλιστα, είναι ενδεικτικό ότι η τυχαιότητα της επιλογής των δοκιμαστικών οχημάτων από το AIMSUN είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική για τη γενικότερη κυκλοφοριακή εικόνα στην περίπτωση του $pr = 1\%$ παρά σε αυτή του 2% ή 5%. Συνεπώς, σε οδικά τμήματα που εμφανίζουν παρόμοιες οδικές συνθήκες με αυτά στα οποία είναι εγκατεστημένοι οι επαγωγικοί βρόχοι της δεύτερης κατηγορίας, συμπεραίνεται ότι η βελτίωση του MAPE εξαρτάται κυρίως από τη αντιπροσωπευτικότερη επιλογή των δοκιμαστικών οχημάτων και τη συχνότητα με την οποία αυτά δειγματοληπτούνται.

4.4 Παράρτημα

A. Ακολουθεί η API, ονόματι *ProbeVehicleAPI*, που δημιουργήθηκε για τη συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων από τα δοκιμαστικά οχήματα που κινούνται εντός του δικτύου AIMSUN. Κατεβλήθη προσπάθεια, κυρίως, για τη σύνταξη ευανάγνωστου κώδικα και λιγότερο για τη μέγιστη αποδοτικότητα αυτού.

```
import sys
from AAPI import *
from PyANGKernel import *
import csv

model = GKSystem.getSystem().getActiveModel()

#---- Variable Declarations ----#
```



```

ProbeVehicleInfo = [ [], [], [], [], [], [], [] ] # probe vehicle id, system entrance time, vehicle speed, section
# id, vehicle position, position in x coordinates, position in y coordinates
DetectorInfo = [ [], [], [] ] # detector id, section id, detector position
VehicleInfoEntranceTime = []
VehicleInfoExitTime = []
VehicleInfoEnter = []
VehicleInfoExit = []
RelativeDistance = []
DetectorId = []
SectionId = []
VehicleSpeed = []
TimeStamp = []
NumberOfProbeVehicles = []
ProbeVehicles = []
TotalTime = []
DetMes = [[], [], []]
#-----#

#---- Initial Inputs ----#
SamplingFreq = 10.0 # sampling period in seconds [1, 10, 30]
SamplingTime = 0.0 # sampling time in seconds
DetInterval = AKIDetGetIntervalDetection ()
DetTime = AKIDetGetIntervalDetection ()
#-----#

def AAPILoad():
    return 0

def AAPIIInit():
    print DetInterval
    print DetTime
    global DetInfo, DetInfo2

    a = AKIDetGetNumberDetectors() # get the number of detectors
    for i in range(a):
        DetInfo = AKIDetGetPropertiesDetector(i) # get properties for all of the detectors
        DetectorInfo[0].append(DetInfo.Id) # detector id
        DetectorInfo[1].append(DetInfo.IdSection) # section id where the detector is situated
        DetectorInfo[2].append(round(DetInfo.InitialPosition,2))
        # detector relative position inside the section (distance from the start of the section)
    return 0

def AAPIManage(time, timeSta, timeTrans, acycle):
    return 0

def AAPIPostManage(time, timeSta, timeTrans, acycle):
    global SamplingFreq, SamplingTime, TimeStamp
    global ProbeVehicleInfo, VehicleInfoEnter, VehicleInfoExit
    global DetectorInfo, DetectorId, SectionId, DetInfo
    global VehicleSpeed, RelativeDistance
    global DetMes, DetInterval, DetTime

```

```

NumberOfProbeVehicles.append(len(ProbeVehicles))
TotalTime.append(round(((time - AKIGetDurationTransTime())/60.0),3))

If (SamplingTime <= (time - AKIGetDurationTransTime()) and (time - AKIGetDurationTransTime())>=0):
# take measurements only at specific intervals, when sampling time is a multiple of sampling period
  for id in VehicleInfoEnter:
# collect properties for every probe vehicle that has enter the system
    if id not in VehicleInfoExit: # but has not yet exit it, eg. it is still inside
      AKIVehSetAsTracked(id) # set the above vehicles as tracked
      VehicleInfo1 = AKIVehTrackedGetInf(id) # get the tracked vehicle info
      ProbeVehicleInfo[0].append(VehicleInfo1.idVeh) # probe vehicle id
      ProbeVehicleInfo[1].append(round(((time - AKIGetDurationTransTime())/60.0),3))
      # time of the measurement in minutes
      ProbeVehicleInfo[2].append(round(VehicleInfo1.CurrentSpeed,2))
      # probe vehicle speed in km/h
      ProbeVehicleInfo[3].append(VehicleInfo1.idSection)
      # section id in where the probe vehicle is
      ProbeVehicleInfo[4].append(round(VehicleInfo1.CurrentPos,2))
      # probe vehicle relative position inside the section (distance from the start of the section)
      ProbeVehicleInfo[5].append(VehicleInfo1.xCurrentPos)
      ProbeVehicleInfo[6].append(VehicleInfo1.yCurrentPos)
      for row in range(len(DetectorInfo[1])): # for every section that contains a detector
        if VehicleInfo1.idSection == DetectorInfo[1][row]:
          # if the probe vehicle is in the same section
          RelativeDistance.append(round(VehicleInfo1.CurrentPos-float(DetectorInfo[2][row]),2))
          # calculate the relative distance between the vehicle and the detector
          DetectorId.append(DetectorInfo[0][row]) # get the detector id
          SectionId.append(DetectorInfo[1][row]) # get the detector section id
          VehicleSpeed.append(round(VehicleInfo1.CurrentSpeed,2))
          # get the speed of this specific probe vehicle
          TimeStamp.append(round(((time - AKIGetDurationTransTime())/60),3))
          # get the time in minutes
      SamplingTime = SamplingTime + SamplingFreq # set the new sampling time

if (DetTime <= (time - AKIGetDurationTransTime()) and DetTime>=0):
  for id in DetectorInfo[0]:
    DetMes[0].append(id)
    DetMes[1].append(round(((time - AKIGetDurationTransTime())/60.0),3))
    DetMes[2].append(round(AKIDetGetSpeedAggregatedbyId(id, 0),2))
  DetTime = DetTime + DetInterval
return 0

def AAPIFinish():

#---- Printing ----#
  AKIPrintString( "AAPIFinish" )

# print ("entrance vehicle id", VehicleInfoEnter)
# print ("entrance vehicle time", ProbeVehicleInfo[1])
# print ("exit vehicle id", VehicleInfoExit)

```

```

# print ("exit vehicle time", VehicleInfoExitTime)
# print ("all vehicles", ProbeVehicleInfo[0])
# print ("section id", ProbeVehicleInfo[3])
# print ("section pos", ProbeVehicleInfo[4])
# print AKIDetGetNumberDetectors()
# print ("Detector Id", DetInfo[0])
# print ("Detector Section Id", DetInfo[1])
# print AKIGetDurationTransTime() # = 10800
# print AKIInfNetGetUnits() # if 1 = metric units (km/h)
#-----#

#---- Writing to files ----#
#-- Measurements for all the Probe Vehicles in road sections that contain detectors ---#
file = "Detector_Id.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Detector Id\n")
for row in DetectorId:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()

file = "Detector_Section_Id.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Detector Section Id\n")
for row in SectionId:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()

file = "Vehicle_Speed.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Vehicle Speed\n")
for row in VehicleSpeed:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()

file = "Time_Stamp.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Time Stamp\n")
for row in TimeStamp:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()

file = "Relative_Distance.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Relative Distance\n")
for row in RelativeDistance:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")

```

```

Results.close()

#--- Measurements from Detectors---#
file = "DetMes_id.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Detector id\n")
for row in DetMes[0]:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()

file = "DetMes_time.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Time Stamp\n")
for row in DetMes[1]:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()

file = "DetMes_speed.xlsx"
Results = open(file, "w+") # open a new file to write
Results.write("Aggregated Speed\n")
for row in DetMes[2]:
    Results.write(str(row))
    Results.write("\n")
Results.close()
#-----#
    return 0

def AAPIUnLoad():
    AKIPrintString( "AAPIUnLoad" )
    return 0

def AAPIEnterVehicle(idveh, idsection):
    global ProbeVehicleInfo
    global VehicleInfoEnter
    global VehicleInfoEntranceTime

    if (idveh % 100) == 0: # penetration rate of vehicles, x%200 = 0.5%, x%100 = 1%, x%50 = 2%, x%20 = 5%
        AKIVehSetAsTracked (idveh) # set the above vehicles as tracked
        VehicleInfo = AKIVehTrackedGetInf (idveh) # get the vehicle info of the tracked vehicles
        VehicleInfoEnter.append(VehicleInfo.idVeh) # probe vehicle id that enters the system
        ProbeVehicleInfo[0].append(VehicleInfo.idVeh) # probe vehicle id
        ProbeVehicleInfo[1].append(round(((VehicleInfo.SystemEntranceT-
AKIGetDurationTransTime())/60.0),3)) # probe vehicle entrance time in minutes
        ProbeVehicleInfo[2].append(round(VehicleInfo.CurrentSpeed,2)) # probe vehicle speed in km/h
        ProbeVehicleInfo[3].append(VehicleInfo.idSection) # probe vehicle entrance section id
        ProbeVehicleInfo[4].append(round(VehicleInfo.CurrentPos,2))
        # probe vehicle relative position inside the section (distance from the start of the section)
        ProbeVehicleInfo[5].append(VehicleInfo.xCurrentPos)
        ProbeVehicleInfo[6].append(VehicleInfo.yCurrentPos)

```

```

    ProbeVehicles.append(VehicleInfo.idVeh)
    VehicleInfoEntranceTime.append(round(((VehicleInfo.SystemEntranceT-
AKIGetDurationTransTime())/60.0),3)) # probe vehicle entrance time in minutes
    return 0

```

```

def AAPIExitVehicle(idveh, idsection):

```

```

    global VehicleInfoldEnter
    global VehicleInfoldExit
    global VehicleInfoldExitTime

```

```

    for id in VehicleInfoldEnter: # check to see if the vehicle that exits the system is a probe
        if idveh == id:
            VehicleInfoldExit.append(id) # probe vehicle id that exits the system
            ProbeVehicles.remove(idveh)
            VehicleInfoldExitTime.append(round(((AKIGetCurrentSimulationTime()-
AKIGetDurationTransTime())/60.0),3)) # probe vehicle exit time from the system
    return 0

```

B. Το πλήθος των μετρήσεων που συλλέχθηκε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ανήλθε σε εκατοντάδες χιλιάδες, όπως θα αναλυθεί και εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο. Συνεπώς, ήταν αναγκαία η δημιουργία κατάλληλων συναρτήσεων στο Matlab για την αυτοματοποίηση των απαιτούμενων υπολογισμών. Έτσι, δημιουργήθηκαν τέσσερις συναρτήσεις υπολογισμού των μέτρων ακριβείας των μετρήσεων, μία για κάθε σχέση των (4.3) - (4.6), συναρτήσεις δημιουργίας των γραφικών παραστάσεων του παρόντος κεφαλαίου, συνάρτηση διαγραφής ταυτόσημων, ως προς τη θέση και την ταυτότητα του οχήματος, μηδενισμών της ταχύτητας, και, τέλος, συνάρτηση υπολογισμού της σχέσης (4.2), ο κώδικας της οποίας, ενδεικτικά, παρουσιάζεται ακολούθως.

```

function avgspd = WeightedAverageSpeed(RelativeDistance,VehicleSpeed)
a = [abs(RelativeDistance), VehicleSpeed];
a = sortrows(a);
dist = a(:,1);
speed = a(:,2);
dist = sort(dist,'descend');
b = transpose(dist) * speed;
avgspd = b/sum(dist);
end

```

4.5 Βιβλιογραφία

- [1]. Aimsun 8 API Manual (2015-03) - TSS - Transport Simulation Systems
- [2]. Aimsun 8 Scripting Manual (2015-03) - TSS - Transport Simulation Systems
- [3]. Aimsun 8 User's Manual (2014-07) - TSS - Transport Simulation Systems
- [4]. Aimsun 8 Dynamic Simulators User's Manual (2014-07) - TSS - Transport Simulation Systems
- [5]. Aimsun 8 Macroscopic Modelling Manual (2013-11) - TSS - Transport Simulation Systems

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LTE ΚΑΙ V2X ΤΥΠΟΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

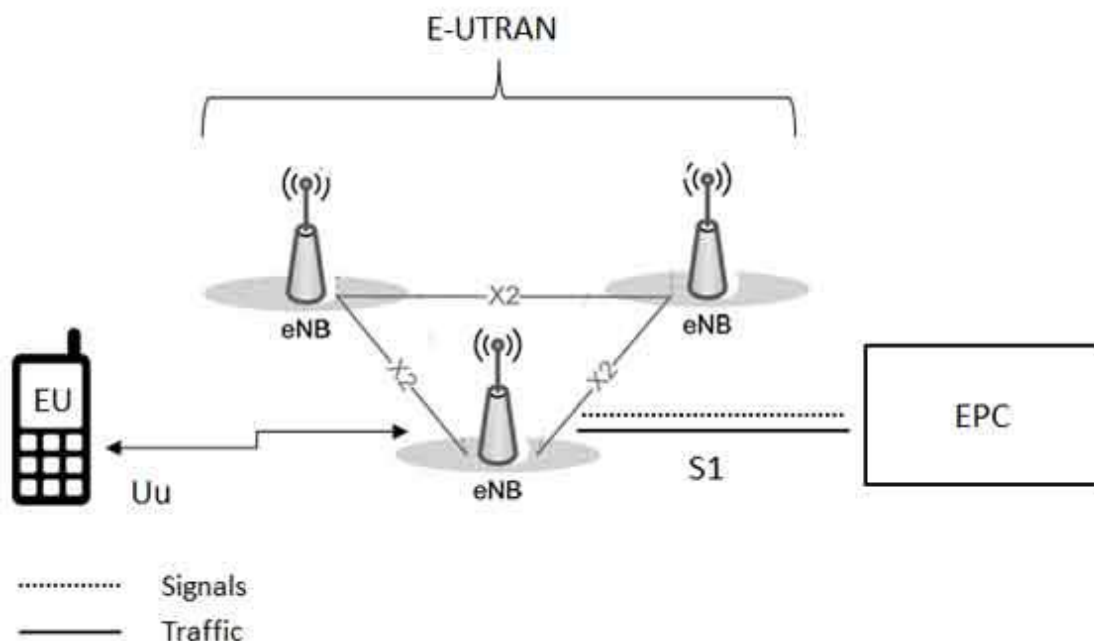
5.1 Η τεχνολογία LTE

Η τεχνολογία LTE (Long-Term Evolution) αποτελεί σειρά προτύπων που στοχεύει στη συνεχή εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς (3G), με απώτερο στόχο την κάλυψη των προδιαγραφών της ITU (International Telecommunication Union) σχετικά με τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G). Καθώς οι απαιτήσεις αυτές έχουν κριθεί ιδιαίτερα υψηλές και σε συνδυασμό με τη μεγάλη αναβάθμιση, μέσω της LTE τεχνολογίας, των κυψελωτών δικτύων σε δίκτυα 4G, η τεχνολογία LTE και, κυρίως, η εξέλιξή της, LTE-Advanced (όπως είθισται να ονομάζονται όλες οι LTE εκδόσεις ύστερα από την 10η έκδοση), έχουν χαρακτηριστεί ως αληθινά 4G (True 4G). Πλέον, ο όρος LTE χρησιμοποιείται για να αναφερθεί στο σύνολο των τεχνολογιών που προσδιορίζουν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς και αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την έρευνα που διεξάγεται στα συστήματα κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G).

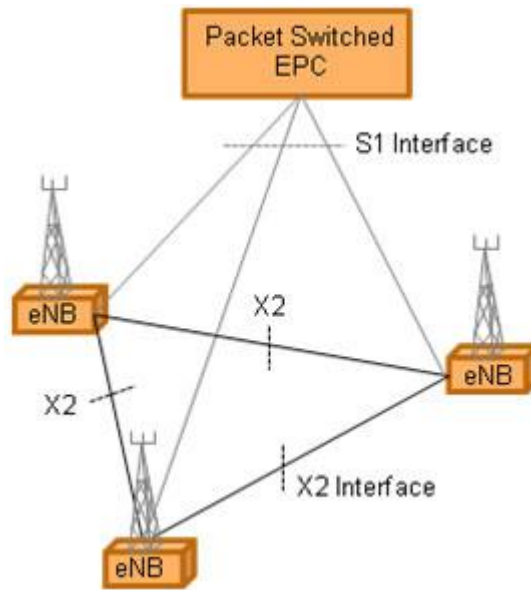
Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου LTE είναι απλή και αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- Τις τερματικές συσκευές (UE - User Equipment)
- Το ραδιοδίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN - Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network)
- Το δίκτυο κορμού (EPC - Evolved Packet Core)

Το E-UTRAN αποτελείται από πλήθος σταθμών βάσης eNB (evolved Node B) που συνδέονται μεταξύ τους μέσω των λογικών διεπαφών X2, και με το EPC μέσω των διεπαφών S1. Τα τερματικά τεχνολογίας LTE επικοινωνούν με τους eNB μέσω του ραδιοδιαύλου Uu. Το EPC, όπως υπονοείται και από την ονομασία του, αποτελεί δίκτυο μεταγωγής πακέτων, σε αντίθεση με το δίκτυο κορμού των δικτύων κινητών επικοινωνιών δεύτερης γενιάς (GSM), που αποτελεί δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος.



Σχήμα 5.1. Η αρχιτεκτονική του LTE E-UTRAN [www.tutorialspoint.com].



Σχήμα 5.2. Γενική αρχιτεκτονική της υποδομής ενός LTE δικτύου [www.3gpp.org].

Με βάση την κατεύθυνση της πληροφορίας σε ένα δίκτυο LTE διακρίνονται τρεις ροές μετάδοσης δεδομένων:

- Μετάδοση δεδομένων στην κάτω ζεύξη (Downlink), η οποία αφορά μετάδοση δεδομένων από τον eNB προς το UE.
- Μετάδοση δεδομένων στην άνω ζεύξη (Uplink), στην οποία η ροή μετάδοσης της πληροφορίας γίνεται από το UE προς τον eNB.
- Μετάδοση δεδομένων στην παράπλευρη ζεύξη (Sidelink), η οποία επιτρέπει άμεση επικοινωνία μεταξύ δύο UE χωρίς την παρέμβαση eNB. Μια τέτοια εφαρμογή αποτελεί και η επικοινωνία οχήματος με eNB, όπως θα αναλυθεί στην υποενότητα 5.3.

Στο φυσικό στρώμα, η τεχνολογία LTE υποστηρίζει τόσο πολυπλεξία συχνότητας FDD (Frequency Division Duplex), αμφίδρομη (Full Duplex) ή μονόδρομη (Half Duplex), όσο και πολυπλεξία χρόνου TDD (Time Division Duplex). Με βάση τον τρόπο μετάδοσης της πληροφορίας, διακρίνονται τρεις τύποι πλαισίων (frames), με τον πρώτο τύπο να αντιστοιχεί σε μετάδοση δεδομένων με χρήση FDD, τον δεύτερο σε πλαίσια που μεταδίδονται με χρήση TDD πολυπλεξίας, και τον τρίτο για δευτερεύουσες διεργασίες της κυψέλης. Στο παρόν, θα αναλυθεί ο πρώτος τύπος διάρθρωσης των πλαισίων, λαμβάνοντας ως δεδομένη την αποστολή δεδομένων με χρήση FDD πολυπλεξίας, ωστόσο, η τεχνολογία LTE διαθέτει ελάχιστες εφαρμογές που απαντώνται μόνο στον ένα από τους δύο τρόπους πολυπλεξίας.

Η βασική χρονική μονάδα στην τεχνολογία LTE δίνεται (σε δευτερόλεπτα) από τη σχέση:

$$T_s = 1 / (15000 \cdot 2048) \quad (5.1)$$

ενώ η συνολική χρονική διάρκεια ενός πλαισίου είναι:

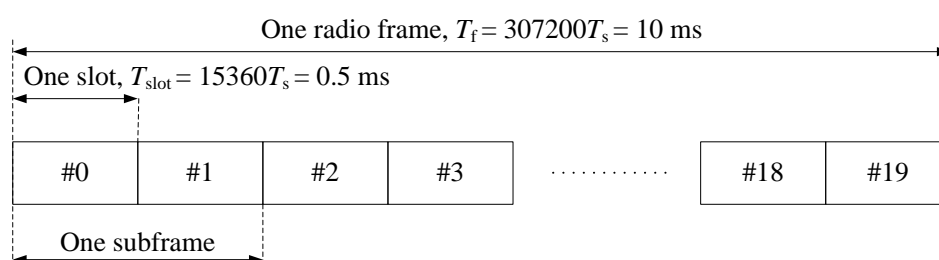
$$T_f = 307200 \cdot T_s = 10 \text{ms} \quad (5.2)$$

Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 20 χρονοσχισμές (Time Slots) διάρκειας:

$$T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s = 0.5 \text{ ms} \quad (5.3)$$

Δύο συνεχόμενες χρονοσχιστές συνιστούν ένα υποπλαίσιο (subframe) διάρκειας 1 ms. Συνεπώς, ένα πλαίσιο αποτελείται από 10 υποπλαίσια.

Η μικρότερη μονάδα δεδομένων ανά χρονοσχιστή που μπορεί να διατεθεί σε κάποιον χρήστη ονομάζεται συστάδα πόρων (RB - Resource Block) και αποτελείται από $N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$ υποφέροντα στο πεδίο της συχνότητας και $N_{\text{symb}}^{\text{UL}}$ σύμβολα στο πεδίο του χρόνου. Το άθροισμα των RB μιας χρονοσχιστής αποτελεί το πλέγμα πόρων (Resource Grid) και εκφράζει τον συνολικό όγκο δεδομένων που διακινείται στη ζεύξη για τη συγκεκριμένη χρονοσχιστή. Κάθε RB αποτελείται από υπομονάδες που ονομάζονται στοιχειώδεις πόροι (RE - Resource Elements) και αντιστοιχούν σε ένα υποφέρον στο πεδίο της συχνότητας και σε ένα σύμβολο στο πεδίο του χρόνου αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3. Δομή πλαισίου τύπου 1 (FDD) στο πεδίο του χρόνου [1].

Κάθε RB αντιστοιχεί σε 180kHz στο πεδίο της συχνότητας και σε 0.5ms στο πεδίο του χρόνου και μπορεί να αποτελείται από 12 υποφέροντα των 15kHz ή 24 υποφέροντα των 7.5kHz. Συνεπώς, κάθε RE καταλαμβάνει 7.5kHz ή 15kHz στο πεδίο της συχνότητας. Τέλος, ο αριθμός των συμβόλων καθορίζεται από το κυκλικό πρόθεμα της τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται.

Ζεύξη Downlink	$\Delta f_{\text{SC}}^{\text{DL}}$	$N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$	$N_{\text{symb}}^{\text{DL}}$	$N_{\text{RE}}^{\text{DL}}$
Κανονικό Κυκλικό Πρόθεμα	15kHz	12	7	84
Εκτεταμένο Κυκλικό Πρόθεμα	15kHz	12	6	72
	7.5kHz	24	3	72
Ζεύξη Uplink	$\Delta f_{\text{SC}}^{\text{UL}}$	$N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$	$N_{\text{symb}}^{\text{UL}}$	$N_{\text{RE}}^{\text{UL}}$
Κανονικό Κυκλικό Πρόθεμα	15kHz	12	7	84
Εκτεταμένο Κυκλικό Πρόθεμα	15kHz	12	6	72

Πίνακας 5.1. Τιμές για τα RB, RE και τα σύμβολα πληροφορίας ανάλογα με τη ζεύξη και την τιμή του κυκλικού προθέματος [1].

Ο αριθμός RB στο πλέγμα πόρων ποικίλλει και εξαρτάται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης που διαθέτει ο κάθε eNB. Όπως φαίνεται και από τον Πίν. 5.2 που ακολουθεί, μεγαλύτερα εύρη ζώνης διαθέτουν περισσότερα RB.

Εύρος Ζώνης (MHz)	N^{RB} ($\Delta f_{RB} = 180\text{kHz}$)	N_{sc}^{RB} ($\Delta f_{sc} = 15\text{kHz}$)	Χρησιμοποιούμενο $\Delta f_{RG} = \Delta f_{RB} N^{RB}$ (MHz)
1.4	6	72	1.08
3	15	180	2.7
5	25	300	4.5
10	50	600	9
15	75	900	13.5
20	100	1200	18

Πίνακας 5.2. Τιμές για το διαθέσιμο εύρος ζώνης αποστολής δεδομένων σε μία χρονοσχημή [1].

5.2 Υπολογισμός θέσης UE

Η δυνατότητα υπολογισμού κυκλοφοριακών δεδομένων αξιοποιώντας την υποδομή των LTE δικτύων προϋποθέτει τη δυνατότητα αυτών των δικτύων (i) εύρεσης της θέσης ενός τερματικού (UE positioning) και (ii) υποστήριξης της κινητικότητάς του (UE mobility). Τα δίκτυα LTE διαθέτουν τέτοιο μηχανισμό και παρέχουν, μάλιστα, τη δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης ενός κινητού με 8 μεθόδους. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στους παρόχους διαφόρων υπηρεσιών να χρησιμοποιήσουν μέθοδο της επιλογής τους με βάση κριτήρια ακρίβειας μετρήσεων, κόστους κ.ά. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα συνδυασμού μεθόδων για ακριβέστερο υπολογισμό της θέσης ενός UE.

Οι 8 τρόποι εξακρίβωσης της θέσης ενός UE τους οποίους υποστηρίζει η τεχνολογία LTE μέχρι και την νεότερη έκδοσή της (14), είναι οι ακόλουθοι:

- Χρήση παγκόσμιων συστημάτων δορυφορικής πλοήγησης GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Υποστηρίζεται πλήθος τέτοιων συστημάτων όπως GPS, Galileo, GLONASS κ.ά. Βασίζονται στην ύπαρξη ενσωματωμένων στα κινητά τηλέφωνα δεκτών GNSS, οι οποίοι είναι σε θέση να υπολογίσουν τη θέση του UE.
- Υπολογισμός στην κάτω ζεύξη OTDOA (Downlink Positioning - Observed Time Difference of Arrival). Η μέθοδος στηρίζεται στη λήψη σημάτων στο UE από πολλαπλούς eNb. Βασικό στοιχείο στη διαφορετική χρονική σφραγίδα κάθε σήματος και με τη βοήθεια μετρήσεων από τους eNb, το UE είναι σε θέση να υπολογίσει τη σχετική του θέση (απόσταση) από τους eNb, και με δεδομένη τη θέση αυτών, τελικά, τη δική του.
- Βελτιωμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούν τη μοναδική ταυτότητα κάθε κυψέλης E-CID (Enhanced Cell ID). Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στον εντοπισμό του πρωταρχικού (primary) eNb που εξυπηρετεί κάποιο UE, η θέση του οποίου απαιτείται να προσδιοριστεί. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τόσο μετρήσεις από άλλα UE εντός της κυψέλης όσο και από τον πρωταρχικό eNb, προσδιορίζεται η θέση του UE που εκκίνησε την εφαρμογή.
- Υπολογισμός στην άνω ζεύξη UTDOA (Uplink Positioning - Uplink Time Difference of Arrival). Η μέθοδος αυτή προσομοιάζει την OTDOA. Πολλαπλές μετρήσεις ενός UE συλλέγονται από διάφορες μονάδες υπολογισμού θέσης LMU (Location Measurement Units). Οι διαφορετικές χρονικές στιγμές άφιξης των σημάτων βοηθούν τις LMU να υπολογίσουν τη θέση του UE.
- Χρήση βαρομετρικών αισθητήρων (Barometric Sensor Positioning). Η μέθοδος αυτή μπορεί να συγκεντρώσει πληροφορίες που σχετίζονται με το ύψος του κινητού και να δώσει έναν αξιόπιστο υπολογισμό της κάθετης συνιστώσας (z) της θέσης του. Για τον πλήρη υπολογισμό της θέσης του τερματικού, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός αυτής της τεχνικής με άλλες μεθόδους.
- Χρήση πληροφορίας από ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN Positioning). Ενεργά τερματικά εντός WLAN, κατά την επικοινωνία τους με τα access points, παράγουν μηνύματα που περιέχουν χρήσιμη για την εξακρίβωση της θέσης ενός UE πληροφορία, όπως access point ids. Αφού

συγκεντρωθεί αυτή η πληροφορία και συγκριθεί με ανάλογη πληροφορία (πχ. θέσεις των access point με βάση τα id τους) εντός βάσεων δεδομένων, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της θέσης των UE.

- Χρήση συσκευών τεχνολογίας Bluetooth (Bluetooth Positioning). Όπως και με τη μέθοδο WLAN Positioning, η πληροφορία που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός UE τεχνολογίας Bluetooth και ενός Bluetooth access point, σε συνδυασμό με τη γνωστή θέση των τελευταίων, παρέχει τη δυνατότητα εξακρίβωσης της θέσης του τερματικού.
- Χρήση συστήματος επίγειων ραδιοπομπών TBS (Terrestrial Beacon System). Αποτελεί τεχνική που στηρίζεται στην αξιοποίηση επίγειου δικτύου ραδιοπομπών που εκπέμπουν σήματα αποκλειστικά για εφαρμογές υπολογισμού της θέσης των UE.

Οι προηγούμενες τεχνικές μπορούν να βασίζονται εξ ολοκλήρου στον υπολογισμό της θέσης ενός UE από το ίδιο το UE, οπότε και ονομάζονται UE-based. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιούν μετρήσεις και πληροφορία από το UE, αλλά ο υπολογισμός της τελικής του θέσης να γίνεται σε κεντρικό server του E-SMLC (Evolved Serving Mobile Location Centre), οπότε και ονομάζονται UE-assisted, E-SMLC-based. Αντίστοιχα, τεχνικές υποβοηθούμενες από τους eNB ονομάζονται eNB-assisted. Τέλος, μέθοδοι που χρησιμοποιούν επικουρικά δεδομένα από LMUs αλλά ο τελικός υπολογισμός της θέσης του UE γίνεται στο E-SMLC, ονομάζονται LMU-assisted, E-SMLC-based.

Μέθοδος	UE-based	UE-assisted, E-SMLC-based	eNB- assisted	LMU-assisted, E-SMLC-based
GNSS	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
OTDOA	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
E-CID	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι
UTDOA	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι
Barometric	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
WLAN	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
Bluetooth	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
TBS	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι

Πίνακας 5.3. Μονάδα υπολογισμού τελικής θέσης ενός UE ανάλογα της χρησιμοποιούμενης τεχνικής [2].

Η σειρά των διεργασιών που λαμβάνει χώρα κατά την προσπάθεια προσδιορισμού της θέσης ενός UE παρουσιάζεται στο Σχ. 5.4, ενώ στη συνέχεια εξηγείται συντόμως η διαδικασία. Αξίζει να τονιστεί ότι δεν συμπεριλαμβάνεται στο διάγραμμα η διαδικασία ενεργοποίησης ενός ανενεργού UE και τα σχετικά με αυτή σήματα που ανταλλάσσονται μεταξύ του UE και του E-UTRAN.

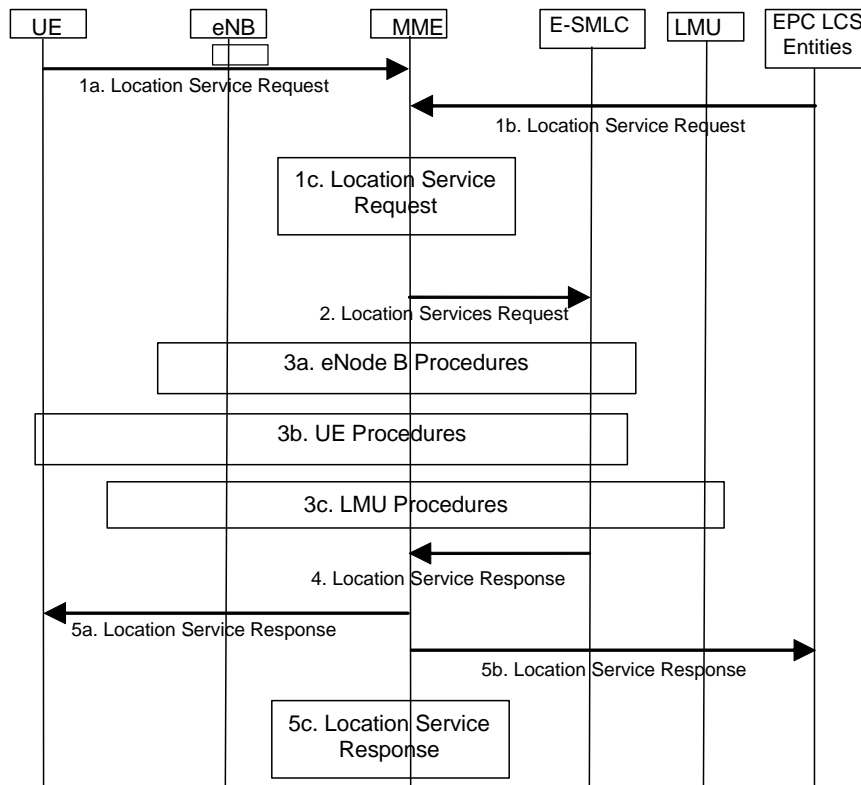
1. Η διαδικασία εκκινεί έπειτα από αίτημα παροχής υπηρεσιών θέσης (location service request). Αυτό μπορεί να γίνει ύστερα από αίτημα του UE στο αντίστοιχο MME που του αναλογεί (1a), είτε από αίτημα του δικτύου κορμού για την εύρεση ενός UE (1b) είτε, τέλος, από το ίδιο το MME (1c).

2. Το αίτημα διαβιβάζεται από το MME στο E-SMLC που εκκινεί τη διαδικασία υπολογισμού της θέσης του ζητούμενου UE.

3. Στη συνέχεια εκκινούνται και διεκπεραιώνονται οι διαδικασίες εντοπισμού της θέσης του UE με τη βοήθεια της αντίστοιχης υποδομής. Έτσι, για τη συλλογή βοηθητικών μετρήσεων και πληροφορίας θέσης, το E-SMLC επικοινωνεί με τον ανάλογο eNB (3a). Για την παροχή πληροφορίας θέσης ή τη συλλογή μετρήσεων από το UE, εκκινείται επιπλέον της 3a ή αντί αυτής, η διαδικασία 3b. Τέλος, στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης της τεχνικής UTDOA, απαιτείται η συλλογή και η επεξεργασία μετρήσεων από πολλαπλά UE στο LMU, οπότε και εκκινεί και η διαδικασία 3b επιπλέον της 3a.

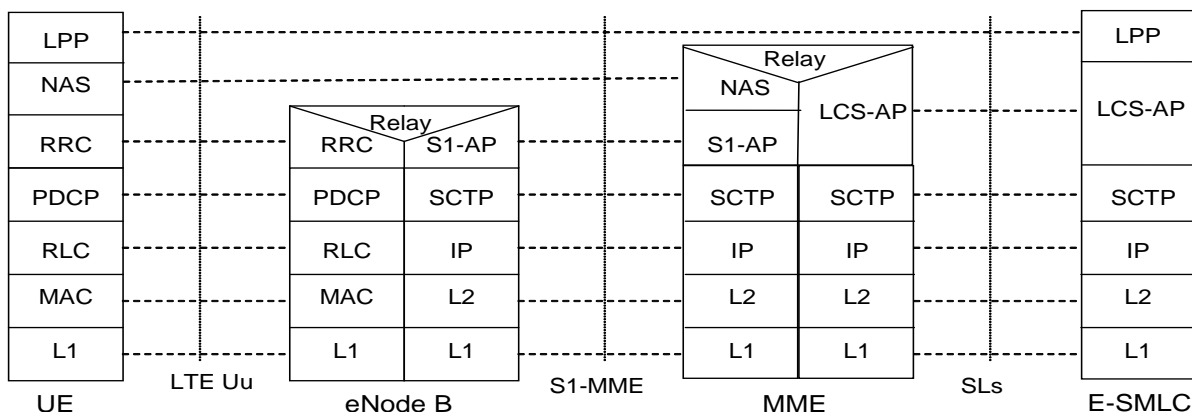
4. Το E-SMLC διαβιβάζει πίσω στο MME το αποτέλεσμα της αναζήτησης της θέσης του UE υπό μορφή μηνύματος απάντησης υπηρεσίας παροχής θέσης (location service response).

5. Η απάντηση διαβιβάζεται στην αντίστοιχη οντότητα που προκάλεσε την αποστολή της. Έτσι, είτε αποστέλλεται στο UE, αν αυτό εκκίνησε τη διαδικασία (5a), είτε στο EPC είτε παραμένει στη διάθεση του MME προς κατάλληλη χρήση.

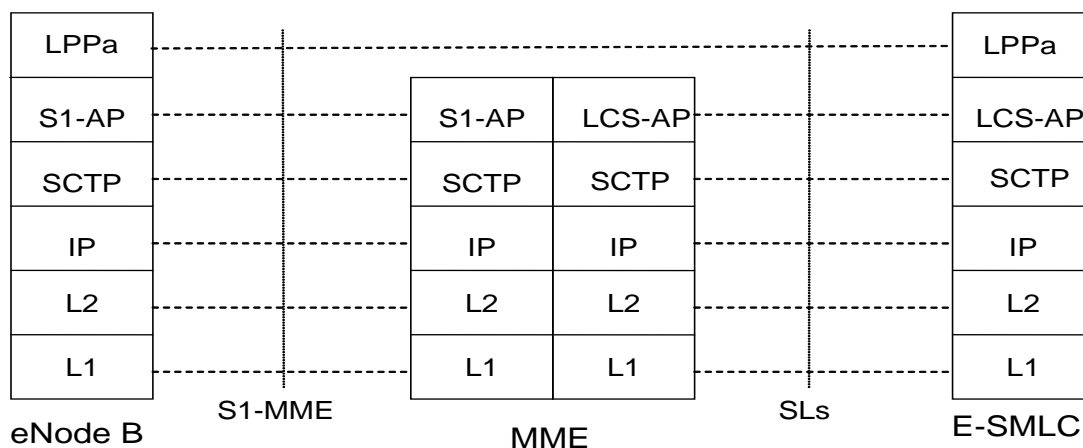


Σχήμα 5.4. Διαδικασία εύρεσης της θέσης ενός UE [2].

Για την υποστήριξη της ανωτέρω διαδικασίας έχουν αναπτυχθεί τα ανάλογα πρωτόκολλα στο επίπεδο εφαρμογής (L5). Αυτά είναι τα LPP (LTE Location Protocol) και LPPa (LPP Annex), τα οποία αποτελούν Point-to-Point πρωτόκολλα μεταξύ του επιπέδου L5 ενός UE και του αντίστοιχου επιπέδου του E-SMLC. Η βασική διαφορά τους έγκειται στις οντότητες που εξυπηρετούν. Το LPP είναι πρωτόκολλο που τερματίζεται υποχρεωτικά σε κάποιο UE (UE-terminated protocol). Χρησιμοποιείται, συνεπώς, για την αποστολή δεδομένων από και προς το UE. Αντιθέτως, το LPPa είναι πρωτόκολλο τερματιζόμενο σε κάποιον eNB (eNB-terminated protocol). Βρίσκει, επομένως, εφαρμογή στην επικοινωνία μεταξύ eNB και E-SMLC, όταν το E-SMLC έχει ανάγκη τη συλλογή μετρήσεων και πληροφορίας θέσης (πχ. τεχνική UTDOA).



Σχήμα 5.5. Στοιβά UE-τερματιζόμενων πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της θέσης ενός UE [2].



Σχήμα 5.6. Στοιβά eNB-τερματιζόμενων πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της θέσης ενός UE [2].

Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα λειτουργούν εγκαθιδρύοντας συνδιαλλαγές (transactions) μεταξύ ενός server, όπως το E-SMLC, με κάποιο UE ή κάποιον eNB. Οι συνδιαλλαγές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν πολλαπλές διαδικασίες (procedures), έκαστη των οποίων έχει συγκεκριμένο στόχο και περιλαμβάνει ανταλλαγή μηνυμάτων (πχ. αίτημα - απάντηση). Οι διαδικασίες μπορεί να εκτελούνται σειριακά ή ακόμα και παράλληλα και οι βασικοί τους στόχοι για το LPP είναι οι εξής:

- Ανταλλαγή δυνατοτήτων θέσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει ανταλλαγή μηνυμάτων που αποσκοπούν στην ενημέρωση των οντοτήτων που μετέχουν στην επικοινωνία, σχετικά με τους υποστηριζόμενους τρόπους υπολογισμού θέσης.
- Μεταφορά βοηθητικών δεδομένων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη μετάδοση βοηθητικών δεδομένων θέσης σε μία από τις δύο οντότητες, ώστε να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της θέσης της ίδιας ή της άλλης οντότητας.
- Μεταφορά πληροφορίας θέσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη μετάδοση της θέσης και των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της στην αιτούμενη οντότητα.
- Διαχείριση σφαλμάτων.
- Διαδικασία διακοπής επικοινωνίας.

Το LPPa ορίζει μόνο δύο διαδικασίες:

- Διαδικασίες σχετιζόμενες με ένα UE. Αφορούν την αποστολή μετρήσεων και δεδομένων θέσης στο αντίστοιχο E-SMLC, για τον υπολογισμό της θέσης ενός UE.
- Διαδικασίες μη σχετιζόμενες με ένα UE. Αποσκοπούν στην ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ eNB και E-SMLC για λόγους πέραν του υπολογισμού θέσης (πχ. για θέματα συγχρονισμού).

5.3 Επικοινωνία Τύπου V2X

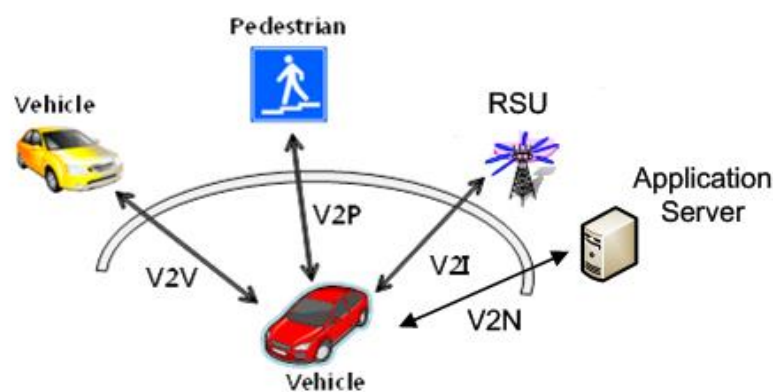
Η αποστολή δεδομένων από ένα όχημα προς κάποιον σταθμό βάσης αποτελεί μία μόνο μορφή επικοινωνίας από αυτές που συμπεριλαμβάνουν το όχημα ως το ένα άκρο της ζεύξης. Σύμφωνα με την 3GPP, ορίζονται τέσσερις εφαρμογές επικοινωνίας αυτού του τύπου, ενώ οποιαδήποτε μορφή επικοινωνίας συμπεριλαμβάνει ένα όχημα ορίζεται ως επικοινωνία οχήματος προς οτιδήποτε (Vehicle to Everything - V2X).

(i) Επικοινωνία οχήματος με άλλο όχημα (Vehicle to Vehicle communication - V2V). Η επικοινωνία αυτού του τύπου αποσκοπεί στην ανταλλαγή μηνυμάτων για V2V εφαρμογές μεταξύ ενός ή περισσότερων οχημάτων. Η αποστολή των μηνυμάτων γίνεται υπό τη μορφή ευρυεκπομπής (broadcast), ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ενημέρωσης όλων των οχημάτων που μπορούν να υποστηρίξουν τέτοιες εφαρμογές και βρίσκονται εντός εμβέλειας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η συνεργασία των οχημάτων με στόχο τη μεγαλύτερη ασφάλειά τους και την ταχύτερη μετακίνηση.

(ii) Επικοινωνία οχήματος με δικτυακή υποδομή (Vehicle to Infrastructure communication - V2I). Η επικοινωνία αυτού του τύπου αναφέρεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ ενός οχήματος και μιας μονάδας εγκατεστημένης στην άκρη του οδοστρώματος (Road Stationary Unit - RSU). Η τελευταία, μπορεί είτε να είναι εγκατεστημένη σε σταθμό βάσης πλησίον του οδοστρώματος, οπότε και αποτελεί RSU eNB τύπου, είτε να αποτελεί ένα οποιοδήποτε UE με δυνατότητα εξυπηρέτησης V2I εφαρμογών, οπότε και αποτελεί RSU τύπου UE. Οι RSU οφείλουν να προσφέρουν κάλυψη σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο τμήμα του οδικού δικτύου. Μέσω των V2I μηνυμάτων, παρέχεται η δυνατότητα καλύτερης εποπτείας των οχημάτων που μπορούν να υποστηρίξουν V2I εφαρμογές από τον διαχειριστή του δικτύου, καθώς και η αμεσότερη εξυπηρέτηση καταστάσεων ανάγκης.

(iii) Επικοινωνία οχήματος με δίκτυο (Vehicle to Network communication - V2N). Πρόκειται για την από άκρο σε άκρο επικοινωνία, στο επίπεδο εφαρμογής, μεταξύ του server εφαρμογών ενός οχήματος και του αντίστοιχου του δικτύου, με σκοπό την εξυπηρέτηση κάποιας V2N εφαρμογής. Αυτού του τύπου η επικοινωνία προϋποθέτει την επικοινωνία του οχήματος με RSU, η οποία θα φροντίσει να προωθήσει το αίτημα στο δίκτυο κορμού και από εκεί στον αντίστοιχο εξυπηρετητή.

(iv) Επικοινωνία οχήματος με πεζό (Vehicle to Pedestrian communication - V2P). Αυτού του είδους η επικοινωνία αποσκοπεί, κυρίως, στην προστασία των πεζών, μέσω μηνυμάτων που τους αποστέλλει όχημα με δυνατότητα V2P εφαρμογών. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου ένας πεζός χρήστης διαθέτει UE που υποστηρίζει V2X εφαρμογές, η επικοινωνία μπορεί να είναι αμφίδρομη και να ενημερώνει, ως μέτρο ασφαλείας, τα παρακείμενα οχήματα για τη θέση του.



Σχήμα 5.7. Οι τέσσερις μορφές επικοινωνίας V2X [4].

Ο συνδυασμός των τεσσάρων μορφών επικοινωνίας και η αποτελεσματική αξιοποίησή τους από τον πάροχο του δικτύου είναι δυνατή να προσδώσει σε αυτό ευφυΐα και χαρακτηριστικά συναίσθησης. Η

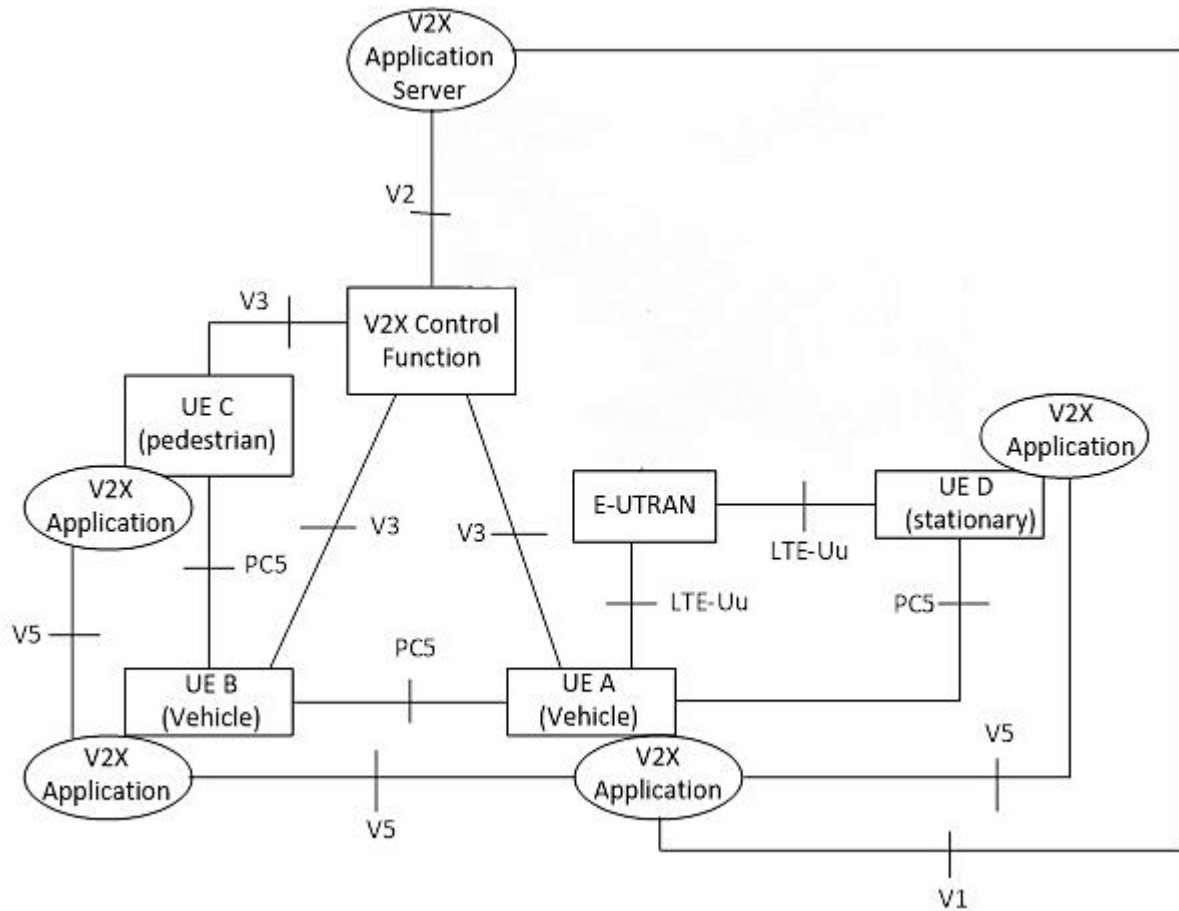
δυνατότητα των χρηστών να συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον τους και να τις μοιράζονται με άλλες οντότητες προσφέρει πολλαπλά οφέλη τόσο για τη μεγαλύτερη ασφάλειά τους όσο και για την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του οδικού δικτύου. Στην πρώτη κατηγορία, εμπίπτουν εφαρμογές πέδησης έκτακτης ανάγκης, έγκαιρης ενημέρωσης του οχήματος για επερχόμενο ατύχημα κ.ά. Στη δεύτερη περίπτωση, απαντώνται εφαρμογές όπως αυτές της αυτοματοποιημένης στάθμευσης και του συνεργατικού προσαρμοζόμενου Cruise Control (Cooperative Adaptive Cruise Control).

Οι τέσσερις αυτές μορφές επικοινωνίας αποτελούν επικοινωνίες σημείου προς σημείο, δηλαδή, μια επικοινωνία V2P αφορά την απευθείας επικοινωνία οχήματος και πεζού, χωρίς τη διαμεσολάβηση άλλων οντοτήτων. Εντούτοις, με τη διαμεσολάβηση του δικτύου είναι δυνατή η εξυπηρέτηση εφαρμογών τις οποίες δεν είναι σε θέση να επιτελέσουν εξαρχής δύο συσκευές. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, στην περίπτωση όπου μια από τις δύο συσκευές δεν έχει δυνατότητα αποστολής V2P μηνυμάτων αλλά υποστηρίζει V2I εφαρμογές, μπορεί να μεταβιβάσει στην RSU το αίτημά της και αυτή, εφόσον υποστηρίζει V2X εφαρμογές, να φροντίσει να ενημερώσει τα παρακείμενα οχήματα ή τους πεζούς αποστέλλοντας V2I ή V2P μηνύματα, αντίστοιχα.

Από τα προηγούμενα, γίνεται σαφές ότι η αποστολή κυκλοφοριακών δεδομένων προς το ΚΔΚ εμπίπτει στην κατηγορία των V2I εφαρμογών, καθώς πρέπει πρώτα να συγκεντρωθούν τα δεδομένα στους σταθμούς βάσης του LTE δικτύου και έπειτα να αποσταλούν στο ΚΔΚ προς περαιτέρω επεξεργασία. Πρέπει, επίσης, να διευκρινιστεί ότι, αν και η τεχνολογία LTE παρέχει μηχανισμούς για την εξακρίβωση της θέσης ενός UE μέσω κατάλληλων πρωτοκόλλων, όπως αυτά αναλύθηκαν στην υποενότητα 5.2, αντιμετωπίζει διαφορετικά τις περιπτώσεις ενός απλού UE σε σχέση με UE με δυνατότητα V2X εφαρμογών. Για παράδειγμα, διαφορετικά αντιμετωπίζεται ένα UE που μπορεί να αποτελεί το προσωπικό κινητό τηλέφωνο ενός χρήστη εντός κινούμενου οχήματος, από ένα UE με δυνατότητα V2X εφαρμογών, το οποίο μπορεί να είναι μια συσκευή GPS με κατάλληλο λογισμικό εντός του ίδιου οχήματος. Η διαφορά αυτή καταδεικνύει τις διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούν συσκευές με δυνατότητα V2X εφαρμογών σε σχέση με αυτές συμβατικών UE, όπως πχ. μεγαλύτερη μπαταρία, ευαισθησία κεραίας κ.ά. Με αυτό το δεδομένο, και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συσκευές επί οχημάτων οφείλουν να αποστέλλουν δεδομένα προς το ΚΔΚ με σχετικά υψηλή συχνότητα, άρα και με υπολογίσιμη κατανάλωση μπαταρίας, γίνεται σαφές ότι τον ρόλο αυτόν δεν είναι εφικτό να τον επιφορτιστεί το προσωπικό κινητό ενός χρήστη αλλά μια ανεξάρτητη συσκευή εγκατεστημένη επί οχήματος.

Η διαδικασία καθιέρωσης των πρωτοκόλλων επικοινωνίας για V2X εφαρμογές είναι μια διαδικασία σε εξέλιξη, ωστόσο, η 3GPP έχει ήδη θέσει τις προδιαγραφές που πρέπει να εκπληρώνει ένα LTE δίκτυο, το οποίο θα ενσωματώνει στις υπηρεσίες του εφαρμογές V2X. Μεταξύ των γενικού περιεχομένου προδιαγραφών, υπάρχουν προδιαγραφές που καθορίζουν την αξιοπιστία της προσφερομένης υπηρεσίας, τη μέγιστη καθυστέρηση που δεν πρέπει να υπερβεί μια επικοινωνία μεταξύ δυο οντοτήτων που υποστηρίζουν V2X εφαρμογές (latency), θέματα ασφάλειας της ταυτότητας των χρηστών και προδιαγραφές για τη μέγιστη σχετική ταχύτητα μεταξύ δύο UE ή την απόλυτη ταχύτητα ενός UE, μέχρι την οποία πρέπει να παρέχεται υπηρεσία V2X. Ιδιαίτερα σημαντικές για την παρούσα εργασία αποτελούν οι προδιαγραφές που καθορίζουν τη μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας για V2X εφαρμογές, η οποία και τίθεται ίση με 10 μηνύματα ανά δευτερόλεπτο για κάθε UE που εκπέμπει. Αντίστοιχα, σημαντικό είναι το μέγιστο μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων που οφείλει να εξυπηρετεί ένα LTE δίκτυο για V2X εφαρμογές. Στην περίπτωση περιοδικής ευρυεκπομπής μηνυμάτων (periodic-triggered events), είναι δυνατή η χρήση πακέτων πληροφορίας μεταβλητού μήκους 50 έως 300 bytes, χωρίς να

συμπεριλαμβάνεται σε αυτό το μέγεθος πρόσθετο παραγέμισμα για τη μεγαλύτερη ασφάλεια του μηνύματος. Τέλος, στην περίπτωση εκπομπής μηνυμάτων έπειτα από την εμφάνιση συγκεκριμένων προϋποθέσεων (event-triggered), όπως πχ. κατά την είσοδο ενός οχήματος εντός συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, το μέγεθος της πληροφορίας των πακέτων ορίζεται μεταβλητό με μέγιστη τιμή αυτή των 1200 bytes.



Σχήμα 5.8. Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου LTE που ενσωματώνει V2X υπηρεσίες [6].

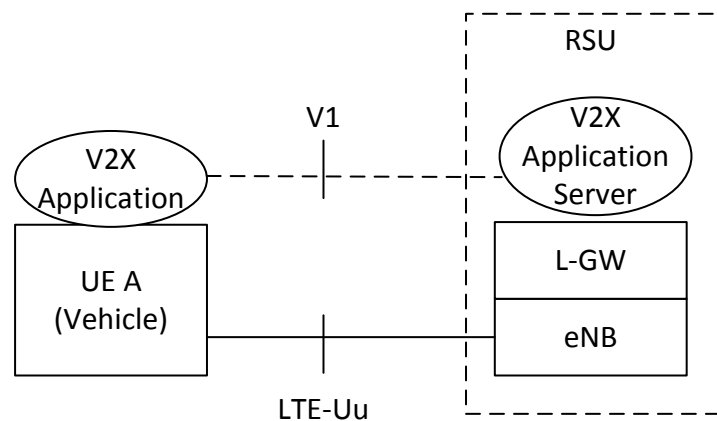
Η επικοινωνία μεταξύ οντοτήτων που υποστηρίζουν V2X εφαρμογές μπορεί να γίνει είτε μέσω της διεπαφής LTE-Uu είτε μέσω της διεπαφής PC5. Η PC5 αποτελεί τη διεπαφή που επιτρέπει P2P επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών που βρίσκονται μεταξύ τους σε κοντινή απόσταση. Η συγκεκριμένη μορφή επικοινωνίας αποτελεί μια D2D μορφή επικοινωνίας και ορίστηκε από την 3GPP ώστε να είναι αποτελεσματικότερη η διαδικασία παροχής υπηρεσιών κοντινής απόστασης (Proximity-based services - ProSe). Αντιθέτως, η διεπαφή LTE-Uu παρέχει τη δυνατότητα unicast (P2P) αλλά και multicast/broadcast επικοινωνίας.

Η αρχική μελέτη των διαφόρων V2X τύπων επικοινωνίας καθώς και η προτυποποίησή τους εκκίνησε από την ETSI (European Telecommunications Standards Institute) και κατέληξε στην έκδοση προτύπων για διάφορες εφαρμογές που καλύπτουν το γενικότερο φάσμα των ITS. Η κύρια ζώνη συχνοτήτων που προβλέπεται να διατεθεί για V2X εφαρμογές, η οποία χρησιμοποιείται τόσο από τα πρότυπα της ETSI όσο και από τις αρχικές μελέτες της 3GPP, είναι αυτή των 5.9GHz (5.850 - 5.925GHz), εύρους 75MHz. Το βασικό πρωτόκολλο ασύρματης πρόσβασης σε δίκτυα V2X δυνατοτήτων αποτελεί μια ειδικά

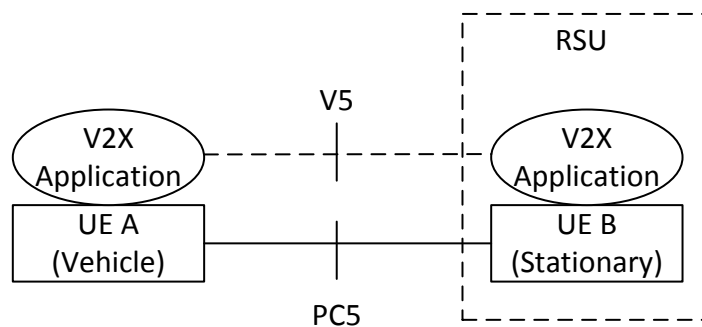
τροποποιημένη έκδοση της οικογένειας 802.11 της IEEE, το 802.11p που, επίσης, χρησιμοποιείται από τα πρότυπα της ETSI.

Ο τρόπος λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου εμφανίζουν ορισμένες βασικές διαφορές από τον αντίστοιχο τρόπο λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας μεταξύ οντοτήτων που χρησιμοποιούν τη διεπαφή PC5. Έτσι, ενώ για την επικοινωνία που διέρχεται μέσω της διεπαφής PC5 χρησιμοποιούνται κοινά γνωρίσματα των LTE δικτύων, όπως τόσο TDD και FDD πολυπλεξία ή SC-FDM διαμόρφωση, το 802.11p χρησιμοποιεί μόνο πολυπλεξία TDD και διαμόρφωση OFDM, αντίστοιχα. Οι διαφορές δεν περιορίζονται μόνο στις προαναφερθείσες. Το βασικότερο, ωστόσο, πλεονέκτημα της χρήσης των V2X εφαρμογών στο πλαίσιο των LTE δικτύων αποτελεί η ευκολία επεκτασιμότητας, η αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος δικτύου πρόσβασης και κορμού, αλλά και η δυνατότητα αναβάθμισης των V2X υπηρεσιών σε 5G-V2X ταυτόχρονα με την αναβάθμιση των κυψελωτών δικτύων σε πέμπτης γενιάς, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη μακροβιότητα στην υπηρεσία.

Όπως παρατηρείται στο Σχ. 5.8, οι V2V και V2P επικοινωνίες πραγματοποιούνται μέσω της διεπαφής PC5. Αντιθέτως, οι V2I επικοινωνίες πραγματοποιούνται μέσω της ίδιας διεπαφής μόνο στις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες το ρόλο της RSU αναλαμβάνει σταθερό UE πλησίον του οδοστρώματος. Στις περιπτώσεις όπου η RSU εντοπίζεται εγκατεστημένη ως λογική μονάδα σε κάποιον eNB, η επικοινωνία κάθε οντότητας με αυτή γίνεται μέσω της διεπαφής LTE-Uu. Από τα ανωτέρω, γίνεται σαφές ότι στην περίπτωση όπου ο πάροχος ενός δικτύου αποφασίσει να θέσει στη διάθεση του ΚΔΚ τους σταθμούς βάσης του, η αποστολή των κυκλοφοριακών δεδομένων από τα δοκιμαστικά οχήματα προς τους eNB θα διεκπεραιώνεται μέσω της διεπαφής LTE-Uu (Σχ. 5.9). Στην περίπτωση όπου το ΚΔΚ αποφασίσει να δημιουργήσει ένα δικό του ιδιόκτητο δίκτυο από σταθερά UE, με τη μορφή μικρών σταθμών βάσης-συλλεκτών πληροφορίας, η πληροφορία θα μεταδίδεται μέσω της PC5 διεπαφής στις μονάδες συλλογής, από αυτές, μέσω της διεπαφής LTE-Uu, στους σταθμούς βάσης του LTE δικτύου πρόσβασης, και μέσω αυτού στο ΚΔΚ (Σχ. 5.10).



Σχήμα 5.9. V2I επικοινωνία οχήματος με RSU που υλοποιείται στον τοπικό eNB [6].



Σχήμα 5.10. V2I επικοινωνία οχήματος με RSU που υλοποιείται σε κατάλληλων δυνατοτήτων σταθερό UE [6].

Η επικοινωνία ανάμεσα σε δύο UE μέσω των αντίστοιχων διεπαφών PC5 γίνεται χωρίς την εγκατάσταση σύνδεσης μεταξύ τους και, κατ' επέκταση, είναι απαλλαγμένη από τον πρόσθετο πλεονασμό που επιφέρουν τα μηνύματα σηματοδότησης για την εγκατάστασή της. Για τον λόγο αυτό, η ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω αυτής της διεπαφής γίνεται μόνο στο πεδίο χρήστη (User Plane) και δεν χρησιμοποιεί πόρους του πεδίου ελέγχου (Control Plane). Τέλος, υποστηρίζει τόσο την ανταλλαγή μηνυμάτων ενθυλακωμένων σε πρωτόκολλο IP, το IPv6, όσο και μηνυμάτων που δεν το χρησιμοποιούν. Από την άλλη πλευρά, τα μηνύματα που αποστέλλονται μέσω της LTE-Uu διεπαφής χρησιμοποιούν το γνωστό πακέτο πρωτοκόλλων UDP/IP.

Με βάση την τελευταία έκδοση του εγγράφου τεχνικών προδιαγραφών 36.786 της 3GPP, παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν οι ζώνες συχνοτήτων που υποστηρίζουν V2X εφαρμογές, καθώς και ο τρόπος πολυπλεξίας αυτών.

V2X Ζώνη Συχνοτήτων	Συχνότητα Λήψης UE Downlink (MHz)	Συχνότητα Εκπομπής UE Uplink- (MHz)	Εύρος Συχνοτήτων Downlink - Uplink (MHz)
47	5855 - 5925	5855 - 5925	70

Πίνακας 5.4. Ζώνη συχνοτήτων για V2X επικοινωνίες μέσω της διεπαφής PC5 [7].

Ζώνη Συχνοτήτων	Συχνότητα Λήψης UE (Downlink) (MHz)	Συχνότητα Εκπομπής UE (Uplink) (MHz)	Εύρος Συχνοτήτων Downlink - Uplink (MHz)	Τύπος Πολυπλεξίας
3	1805 - 1880	1710 - 1785	75	FDD
7	2620 - 2690	2500 - 2570	70	FDD
8	925 - 960	880 - 915	35	FDD
39	1880 - 1920	1880 - 1920	40	TDD
41	2496 - 2690	2496 - 2690	194	TDD

Πίνακας 5.5. Ζώνη συχνοτήτων για V2X επικοινωνίες μέσω της διεπαφής LTE-Uu [7].

Επίσης, προς αύξηση του διαθέσιμου τηλεπικοινωνιακού εύρους ζώνης παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης πολλαπλών φερόντων από ένα UE που υποστηρίζει V2X εφαρμογές. Στην περίπτωση ομο-διαυλικού τρόπου λειτουργίας (intra-band operation), το UE χρησιμοποιεί πολλαπλά φέροντα που ανήκουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Αντίστοιχα, όταν το UE χρησιμοποιεί φέροντα από διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων λειτουργεί σύμφωνα με ένα δια-διαυλικό τρόπο λειτουργίας (inter-band operation). Για τις V2X εφαρμογές, η δυνατότητα χρήσης intra-band φερόντων είναι δυνατή μόνο στην ζώνη 47, μέσω της διεπαφής PC5. Οι δυνατοί συνδυασμοί inter-band φερόντων καταγράφονται

στον πίνακα 5.6. Είναι φανερό ότι η ζώνη συχνοτήτων 47 χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις, όπως είναι αναμενόμενο, καθώς αποτελεί την κατ' εξοχήν ζώνη για ενσωμάτωση V2X εφαρμογών. Αποτελεί, επίσης, μια ελεύθερη (unlicensed) ζώνη, συνεπώς, οι συνδυασμοί του Πίν. 5.6 αποτελούν τρόπους αύξησης του εύρους και της ποιότητας των V2X εφαρμογών μέσω της συμπληρωματικής χρήσης δεσμευμένων (licensed) συχνοτήτων κινητών επικοινωνιών (LTE).

Συνδυασμός από Ζώνες Συχνοτήτων	Ζώνη Συχνοτήτων	Διεπαφή Επικοινωνίας
3 - 47	3	LTE-Uu
	47	PC5
7 - 47	7	LTE-Uu
	47	PC5
8 - 47	8	LTE-Uu
	47	PC5
39 - 47	39	LTE-Uu
	47	PC5
41 - 47	41	LTE-Uu
	47	PC5

Πίνακας 5.6. Συνδυασμός inter-band συχνοτήτων για V2X επικοινωνίες [7].

Το ελάχιστο εύρος ζώνης συχνοτήτων που μπορεί να διατεθεί σε ένα UE για έκαστη των V2X ζωνών συχνοτήτων παρουσιάζεται στον Πίν. 5.7.

V2X Ζώνη Συχνοτήτων	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
47				✓		✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7			✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓		
39			✓	✓	✓	✓
41			✓	✓	✓	✓

Πίνακας 5.7. Επιτρεπτό εύρος ζώνης συχνοτήτων εντός μιας V2X ζώνης [7].

Η συνάθροιση πολλαπλών intra-band φερόντων στην ζώνη 47 επιτρέπει τη συνάθροιση μόνο δύο φερόντων εύρους 10MHz το καθένα προσφέροντας, έτσι, ένα συνολικό εύρος συχνοτήτων 20MHz, όσο, δηλαδή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη χρήση ενός φέροντος εξ αρχής. Αντίθετα, το συνολικό εύρος συχνοτήτων που μπορεί να αξιοποιήσει ένα UE κάνοντας χρήση inter-band φερόντων μπορεί να υπερβεί το μέγιστο δυνατό εύρος ανάθεσης σε κάθε ζώνη, όπως διαπιστώνεται και από τον Πίν. 5.8. Το μέγιστο διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων κάθε συνδυασμού είναι, φυσικά, το άθροισμα του μεγαλύτερου διαθέσιμου εύρους συχνοτήτων κάθε χρησιμοποιούμενης ζώνης.

Συνδυασμός inter-band φερόντων	Ζώνη Συχνοτήτων	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Μέγιστο Διαθέσιμο Εύρος Συχνοτήτων [MHz]
3 - 47	3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	40
	47				✓		✓	
7 - 47	7			✓	✓	✓	✓	40
	47				✓		✓	
8 - 47	8	✓	✓	✓	✓			30
	47				✓		✓	
39 - 47	39			✓	✓	✓	✓	40
	47				✓		✓	
41 - 47	41			✓	✓	✓	✓	40
	47				✓		✓	

Πίνακας 5.8 Μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων για όλους τους inter-band συνδυασμούς φερόντων [7].

5.4 Βιβλιογραφία

- [1]. 3GPP TS 36.211 V14.0.0 (2016-09) - EUTRA; Physical channels and modulation
- [2]. 3GPP TS 36.305 v13.0.0 (2015-12) - EUTRAN; Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN
- [3]. 3GPP TS 36.401 V.13.2.0 (2016-06) - EUTRAN; Architecture Description
- [4]. 3GPP TS 22.185 V14.3.0 (2017-03) - Service requirements for V2X services; Stage 1
- [5]. 3GPP TS 22.885 v14.0.0 (2015-12) - Study on LTE support for Vehicle to Everything (V2X) services
- [6]. 3GPP TS 23.285 v14.2.0 (2017-03) - Architecture enhancements for V2X services
- [7]. 3GPP TR 36.786 V1.0.0 (2017-03) - V2X Services based on LTE sidelink; User Equipment (UE) radio transmission and reception
- [8]. 5GAA Whitepaper (2016-11) - The Case for Cellular V2X for Safety and Cooperative Driving

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Υπολογισμός αριθμού FCD μετρήσεων στο δίκτυο προσομοίωσης

Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο που παράγεται από τη δειγματοληψία δοκιμαστικών οχημάτων εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα δειγματοληψίας τους όσο και από τον αριθμό τους, ο οποίος εκφράζεται ως ποσοστό επί του συνολικού στόλου των οχημάτων. Με βάση την προσομοίωση που εκτελέστηκε στο Aimsun, ο συνολικός αριθμός των FCD μετρήσεων που συγκεντρώθηκαν για κάθε σενάριο στο τρίωρο της προσομοίωσης παρουσιάζεται στον Πίν. 6.1.

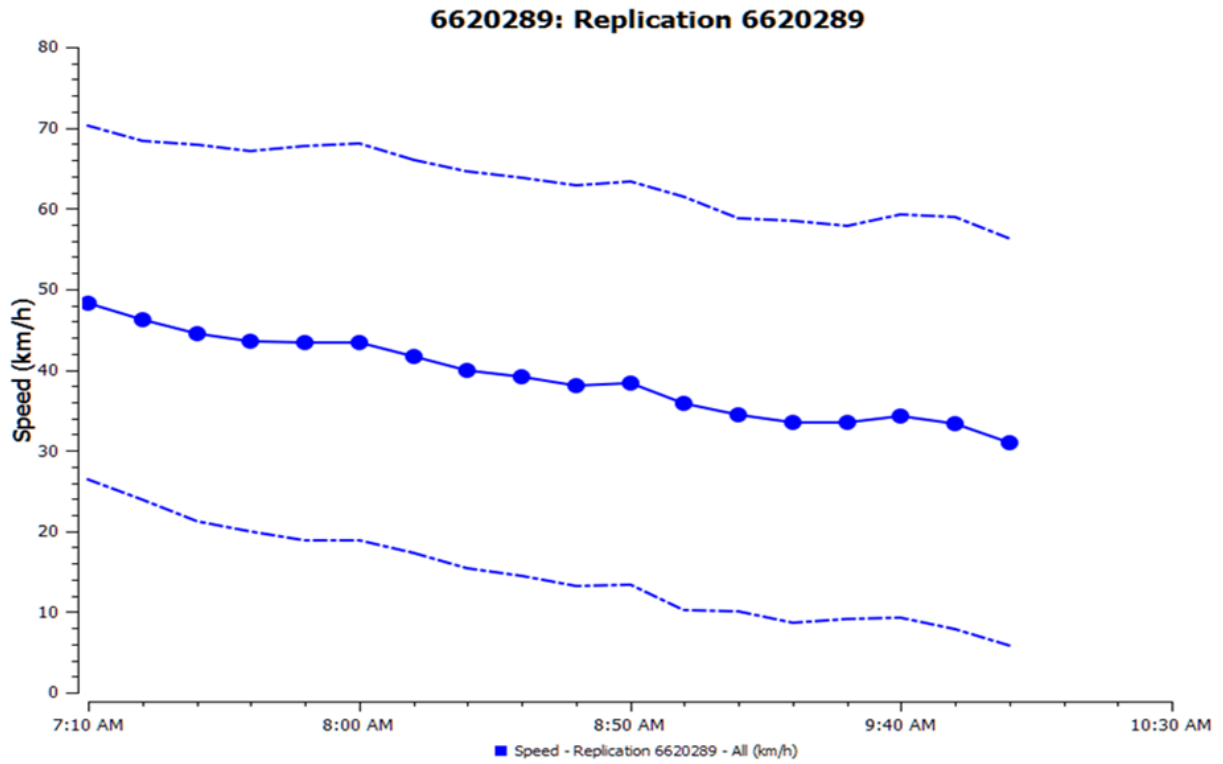
Ποσοστό Δοκιμαστικών Οχημάτων (%)	Συχνότητα Δειγματοληψίας (Hz)	Αριθμός FCD Μετρήσεων	Αριθμός FCD Μετρήσεων ανά Δευτερόλεπτο
0.5	1	125,752	11.64
1	1	235,891	21.84
1	1/10	24,230	2.24
1	1/30	8,552	0.79
2	1	437,284	40.49
2	1/10	45,027	4.17
2	1/30	15,969	1.48
5	1	1,182,538	109.49
5	1/10	121,480	11.25

Πίνακας 6.1. Συνολικός αριθμός FCD μετρήσεων για κάθε σενάριο προσομοίωσης.

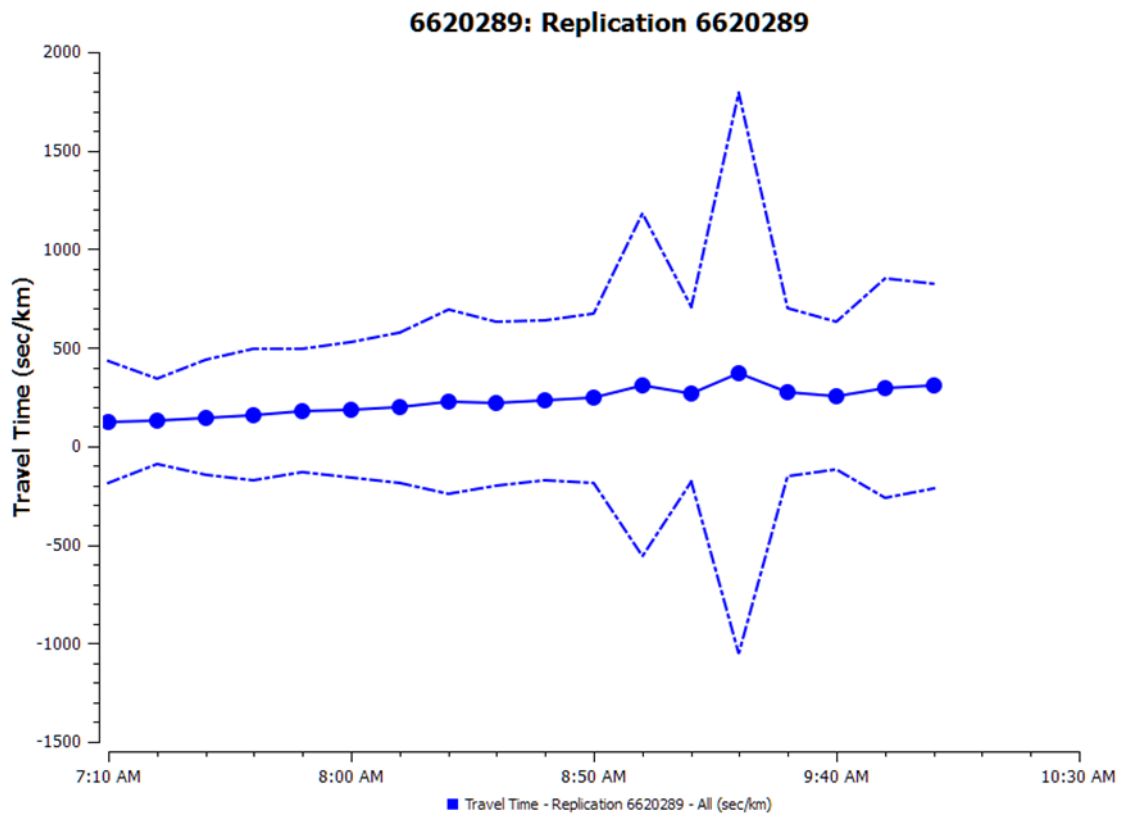
Όπως παρατηρείται από τον Πίν. 6.1, μεταβολή στη συχνότητα δειγματοληψίας ή στο ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων μεταβάλλει τον αριθμό των FCD μετρήσεων, πρακτικά, κατά τον ίδιο πολλαπλασιαστικό παράγοντα. Έτσι, δεκαπλασιασμός της sf δεκαπλασιάζει, ουσιαστικά, τον αριθμό των FCD μετρήσεων, ενώ υποδιπλασιασμός του pr τον μειώνει στο μισό.

Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας του δικτύου, όπως υπολογίζεται με βάση τη συνεισφορά όλων των οδικών τμημάτων που το απαρτίζουν, απεικονίζεται στο Σχ. 6.1. Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας γίνεται ανά δεκάλεπτο, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αποτελούν τη διακύμανσή της. Έτσι, παρατηρείται, για παράδειγμα, ότι ενώ η μέση ταχύτητα των οχημάτων επί του δικτύου είναι περίπου 43km/h στις 8:00, υπάρχουν οδικά τμήματα όπου οι οδηγοί αναπτύσσουν υψηλή μέση ταχύτητα, της τάξης των 67km/h, και άλλα που χαρακτηρίζονται από χαμηλή μέση ταχύτητα, της τάξης των 19km/h. Φανερό, επίσης, είναι και η πτώση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά τις πρωινές ώρες αιχμής μεταξύ 8:00 και 10:00π.μ.

Στο Σχ. 6.2 αποτυπώνεται ο χρόνος διαδρομής (travel time) του συνολικού δικτύου, ο οποίος αποτελεί το χρόνο που χρειάζεται ένα όχημα για να διανύσει ένα χιλιόμετρο εντός του δικτύου και δίνεται σε sec/km. Καθώς το δίκτυο απαρτίζεται από οδικά τμήματα που εμφανίζουν το καθένα διαφορετικό βαθμό συμφόρησης, ο συνολικός χρόνος διαδρομής του δικτύου αποτελεί τον μέσο όρο των επιμέρους χρόνων διαδρομής κάθε οδικού τμήματος. Και σε αυτό το σχήμα είναι εμφανής η συμφόρηση του δικτύου που εκφράζεται ως αύξηση του μέσου χρόνου διαδρομής με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 6.1. Η μέση ταχύτητα του δικτύου προσομοίωσης.



Σχήμα 6.2. Ο μέσος χρόνος διαδρομής του δικτύου προσομοίωσης.

Με βάση την κυκλοφοριακή συμπεριφορά που επικρατεί στο δίκτυο κατά το τρίωρο της προσομοίωσης, όπως αυτή περιγράφεται και από τα Σχ. 6.1 και 6.2, θα γίνει προσπάθεια γενίκευσης ορισμένων συμπερασμάτων που απορρέουν από αυτή. Τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του δικτύου είναι δυναμικά. Συνεπώς, τόσο η μέση ταχύτητα όσο και ο χρόνος διαδρομής μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, εξαρτόμενα από τον τρέχοντα βαθμό συμφόρησης του δικτύου και τη μελλοντική κυκλοφοριακή ζήτηση. Κατ' επέκταση, ο υπολογισμός κυκλοφοριακών δεδομένων που σχετίζονται με τους χρήστες του δικτύου, όπως για παράδειγμα, ο υπολογισμός χρόνων διαδρομής ενός οδηγού που εισέρχεται σε αυτό μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αποτελεί και αυτός δυναμική διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα όχημα κατά την κίνησή του εντός του δικτύου διασχίζει οδικά τμήματα που χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς χρόνους διαδρομής (διαφορετική κυκλοφοριακή συμφόρηση), ενώ και εντός του ίδιου του οδικού τμήματος ο χρόνος διαδρομής μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, οι γενικεύσεις που υιοθετούνται στοχεύουν στην απλούστευση αυτών των δυο γεγονότων. Έτσι, κάθε υπολογισμός δεδομένων πραγματοποιείται σε επίπεδο δικτύου και όχι σε μεμονωμένα οδικά τμήματα, ενώ και ο χρόνος διαδρομής θεωρείται σταθερός, κατά το χρόνο κίνησης του οχήματος στο δίκτυο.

Το μήκος του υπό προσομοίωση δικτύου είναι περίπου 8.2km. Θεωρώντας όχημα που εισέρχεται από έναν κόμβο του δικτύου και εξέρχεται από άλλον, κινούμενο πάντα κατά μήκος του δικτύου, ο χρόνος παραμονής του εντός αυτού υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$t_{in} = t_{tr} \cdot d \quad (6.1)$$

όπου d η απόσταση σε km που διανύεται εντός του δικτύου, και t_{tr} ο μέσος χρόνος διαδρομής σε sec/km που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κίνησης του οχήματος.

Η περίπτωση για την οποία $d = 8.2\text{km}$ και $t_{tr} = 367.88 \text{ sec/km}$ αποτελεί τη δυσμενέστερη, από άποψη τηλεπικοινωνιακού φορτίου, περίπτωση που εμφανίζεται στο δίκτυο, καθώς το όχημα διασχίζει ολόκληρο το μήκος του δικτύου υπό συνθήκες μέγιστης συμφόρησης (μέγιστη πυκνότητα κυκλοφορίας). Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος παραμονής ενός οχήματος εντός του δικτύου είναι ίσος με $t_{in} = 3016.62 \text{ sec}$ ή 50.28 min . Τέλος, για $d = 8.2 \text{ km}$ και $t_{tr} = 230.45 \text{ sec/km}$ ο χρόνος παραμονής είναι ίσος με $t_{in} = 1889.69 \text{ sec}$ ή 31.49 min , που αποτελεί και το χρόνο διάσχισης ολόκληρου του μήκους του δικτύου σε περίπτωση μέσης συμφόρησης (μέση πυκνότητα κυκλοφορίας), καθώς ο t_{tr} που χρησιμοποιείται, αποτελεί τη μέση τιμή όλων των χρόνων διαδρομής για το σύνολο της τρίωρης προσομοίωσης. Όπως προαναφέρθηκε, οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στον απαιτούμενο χρόνο διάσχισης του δικτύου από όχημα που αντιμετωπίζει σταθερή συμφόρηση για τη χρονική διάρκεια κίνησής του εντός του δικτύου.

Θεωρώντας n διαδοχικές (μεγαλο)κυψέλες που ισαπέχουν μεταξύ τους κατά μήκος της Λεωφόρου Κηφισίας, ο χρόνος παραμονής ενός οχήματος σε κάθε κυψέλη υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$t_{in, cell} = \frac{t_{in}}{k} \quad (6.2)$$

όπου k ο αντίστοιχος αριθμός κυψελών που διασχίζει το όχημα κατά την κίνησή του εντός του δικτύου. Προφανώς, $1 \leq k \leq n$. Ο αριθμός n εξαρτάται από την ακτίνα και το βαθμό διαμέρισης σε τομείς κάθε κυψέλης. Βέβαια, ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης που χαρακτηρίζει κάθε γεωγραφική περιοχή

χρησιμοποιείται και το κατάλληλο μέγεθος κυψέλης. Έτσι, οι ακτίνες κάθε κυψέλης διαφέρουν γενικά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μην είναι κοινός ο $t_{in,cell}$ για όλες τις κυψέλες που εξυπηρετούν την κίνηση των οχημάτων επί της Λεωφόρου Κηφισίας. Για χάρη απλούστευσης, ωστόσο, θα υποθεθεί παρόμοιου μήκους ακτίνα κάλυψης. Τέλος, για όχημα που διασχίζει όλο το μήκος του δικτύου, ο μέσος χρόνος παραμονής του εντός μιας κυψέλης για την περίπτωση της μέγιστης και μέσης συμφόρησης είναι

$$t_{in,cell} = \frac{3016.62}{n} \text{ sec και } t_{in,cell} = \frac{1889.69}{n} \text{ sec, αντίστοιχα.}$$

Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο που αντιπροσωπεύει ο συνολικός αριθμός των FCD μετρήσεων του κάθε σεναρίου προσομοίωσης καταμερίζεται σε κάθε κυψέλη με βάση το μέσο χρόνο παραμονής του οχήματος $t_{in,cell}$ εντός αυτής. Έτσι, ο συνολικός αριθμός μετρήσεων εντός κυψέλης υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$M_{cell} = t_{in,cell} \cdot m_{cell} = \frac{t_{in}}{k} \cdot \frac{m}{n} = \frac{t_{tr} \cdot d \cdot M}{k \cdot n \cdot T} \quad (6.3)$$

όπου m_{cell} ο αριθμός των FCD μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο εντός της κυψέλης, m ο συνολικός αριθμός μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο εντός του δικτύου, ο οποίος εμφανίζεται στην τελευταία στήλη του Πίν. 6.1, M ο συνολικός αριθμός μετρήσεων στο δίκτυο, όπως εμφανίζεται στην τρίτη στήλη του ίδιου πίνακα, και T η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης σε δευτερόλεπτα (στην παρούσα, 10800 sec). Συνεπώς, με βάση τη σχέση (6.3) μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά ο αριθμός των FCD μετρήσεων που συγκεντρώνεται σε μια κυψέλη, αν είναι γνωστός ο μέσος χρόνος παραμονής ενός οχήματος σε αυτή και ο μέσος ρυθμός μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο εντός των ορίων της.

Ο υπολογισμός του συνολικού αριθμού μετρήσεων εντός του δικτύου για τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας κυκλοφορίας και υπό τις ίδιες θεωρήσεις (όχημα που διασχίζει ολόκληρο το δίκτυο και χρόνος κίνησης όπως υπολογίζεται από τη σχέση (6.1)) παρουσιάζονται στον Πίν. 6.2. Τα αποτελέσματα αυτά, ειδικά της περίπτωσης μέσης πυκνότητας, μπορούν να γενικευθούν και σε χρονικό διάστημα πέραν αυτού της προσομοίωσης, αρκεί ο μέσος χρόνος διαδρομής να εμφανίζει παραπλήσιες τιμές.

Ποσοστό Δοκιμαστικών Οχημάτων (%)	Συχνότητα Δειγματοληψίας (Hz)	Αριθμός FCD μετρήσεων για μέγιστη πυκνότητα	Αριθμός FCD μετρήσεων για μέση πυκνότητα
0.5	1	35,113	21,996
1	1	65,883	41,271
1	1/10	6,757	4,233
1	1/30	2,383	2,283
2	1	122,143	76,514
2	1/10	12,579	7,880
2	1/30	4,465	2,797
5	1	330,290	206,902
5	1/10	33,937	21,259

Πίνακας 6.2. Συνολικός αριθμός FCD μετρήσεων εντός δικτύου για κάθε σενάριο προσομοίωσης στην περίπτωση μέγιστης και μέσης πυκνότητας κυκλοφορίας αντίστοιχα.

6.2 Υπολογισμός τηλεπικοινωνιακού φορτίου στο δίκτυο προσομοίωσης

Κάθε FCD μέτρηση αποτελεί κυκλοφοριακή πληροφορία που πρέπει να αποσταλεί υπό μορφή μηνύματος στην κατάλληλη δικτυακή υποδομή (RSU). Η ελάχιστη πληροφορία εντός του μηνύματος

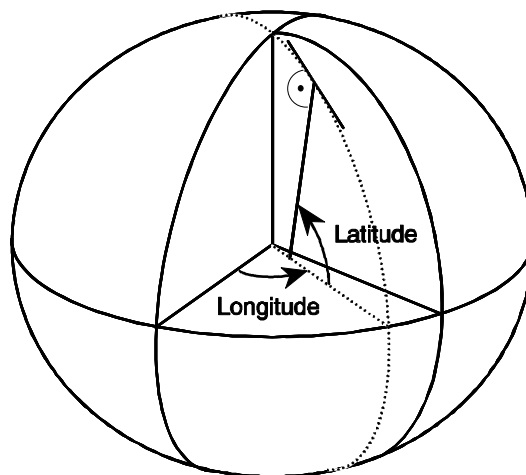
πρέπει να περιέχει τη θέση, την ταχύτητα, και τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Η 3GPP έχει θέσει συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές για τον τρόπο περιγραφής αυτών των στοιχείων, ο οποίος καθορίζει, τελικά, και το μέγεθος του μηνύματος. Η τεχνολογία LTE αντιμετωπίζει τα στοιχεία αυτά ως στοιχεία δεδομένων (Information Elements - IE) που ενσωματώνονται σε διαδοχικές θέσεις μνήμης (bit) εντός του μηνύματος. Τα IE *locationEstimate* και *velocityEstimate* είναι καθοριστικής σημασίας για τον ακριβή υπολογισμό της θέσης και ταχύτητας ενός UE. Οι διαφορετικοί τρόποι περιγραφής της θέσης ενός UE, το οποίο υποτίθεται ενσωματωμένο σε δοκιμαστικό όχημα, παρουσιάζονται στον Πίν. 6.3, και της ταχύτητάς του στον Πίν. 6.4, αντίστοιχα. Ο τρόπος υπολογισμού αναλύεται συνοπτικά στο παράρτημα στο τέλος του κεφαλαίου, ενώ τα διάφορα IE περιγράφονται ακολούθως.

6.2.1 Τα IE που περιγράφουν τη θέση ενός UE εντός δοκιμαστικού οχήματος

Τύπος IE	Μέγεθος (bits)
<i>elipsoidPoint</i>	48
<i>elipsoidPointWithUncertaintyCircle</i>	55
<i>elipsoidPointWithUncertaintyEllipse</i>	77
<i>polygon</i>	144 - 720
<i>elipsoidPointWithAltitude</i>	64
<i>elipsoidPointWithAltitudeAndUncertaintyEllipsoid</i>	100
<i>elipsoidArc</i>	94

Πίνακας 6.3. Τα διάφορα IE που καθορίζουν τον τρόπο περιγραφής της θέσης ενός UE.

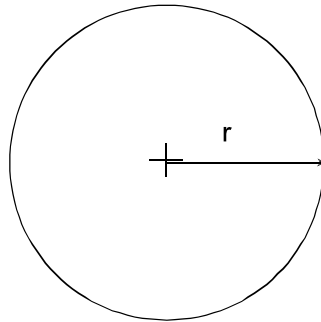
elipsoidPoint: Το πεδίο αυτό περιέχει τις χωρικές συντεταγμένες ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια μιας έλλειψης (ελλειψοειδές σημείο). Για τον υπολογισμό της θέσης ενός UE που βρίσκεται στην επιφάνεια (ή πολύ κοντά σε αυτή) της Γης, απαιτείται ο υπολογισμός του γεωγραφικού μήκους (longitude) και πλάτους (latitude), με την έλλειψη που σχηματίζεται να έχει κέντρο το κέντρο της Γης.



Σχήμα 6.3. Υπολογισμός της θέσης ενός ελλειψοειδούς σημείου [2].

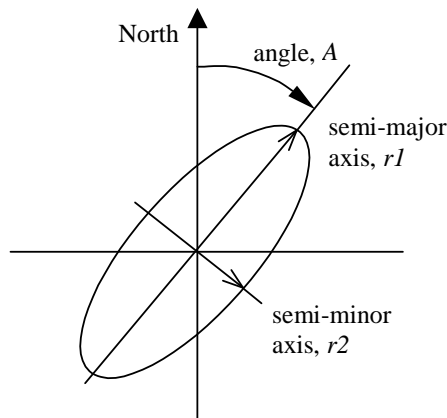
elipsoidPointWithUncertaintyCircle: Το πεδίο αυτό χρησιμοποιεί το δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων της τεχνικής του ελλειψοειδούς σημείου για τον υπολογισμό της θέσης ενός UE. Ο υπολογισμός, ωστόσο, συνοδεύεται και από ένα μέτρο ακρίβειας υπό μορφή ακτίνας κύκλου r . Συγκεκριμένα, χαράσσεται κύκλος ακτίνας r με συντεταγμένες κέντρου τις συντεταγμένες θέσης του UE.

Έτσι, το σύνολο των σημείων που αντιστοιχεί σε αυτό το ΙΕ αποτελείται από όλα εκείνα τα σημεία που απέχουν από τη θέση του ελλειψοειδούς σημείου απόσταση ίση ή μικρότερη της ακτίνας r . Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται όταν η ακρίβεια των μετρήσεων δεν επιτρέπει τον μονοσήμαντο υπολογισμό της θέσης του UE.



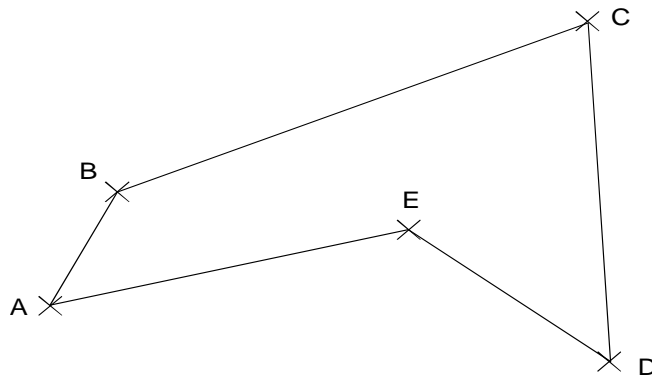
Σχήμα 6.4. Ένα ελλειψοειδές σημείο που περιβάλλεται από ακτίνα αμφιβολίας [2].

ellipsoidPointWithUncertaintyEllipse: Και αυτό το πεδίο χρησιμοποιεί την τεχνική του ελλειψοειδούς σημείου για τον αρχικό υπολογισμό της θέσης του UE, σε αντίθεση, όμως, με το προηγούμενο πεδίο, το επίπεδο ακρίβειας (ή εμπιστοσύνης) εκφράζεται με έλλειψη αντί κύκλου. Συγκεκριμένα, στο κέντρο της έλλειψης τοποθετείται το ελλειψοειδές σημείο ενώ ο μεγάλος άξονας της έλλειψης, μήκους $r1$, σχηματίζει γωνία A (0-180 μοίρες) με το βορρά, και ο μικρός άξονας, μήκους $r2$, είναι κάθετος στο μεγάλο. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται όταν η ακρίβεια των μετρήσεων δεν επιτρέπει τον μονοσήμαντο υπολογισμό της θέσης του UE, αλλά υπάρχει η δυνατότητα να ποσοτικοποιηθεί η γεωγραφική συμβολή κάθε παράγοντα στην ανακρίβεια.



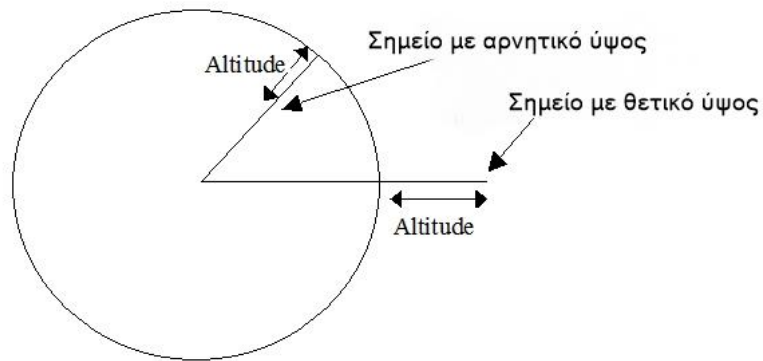
Σχήμα 6.5. Ένα ελλειψοειδές σημείο που περιβάλλεται από έλλειψη αμφιβολίας [2].

polygon: Το πεδίο αυτό περιγράφει την πιθανή θέση ενός UE εντός του εμβαδού που περικλείει ένα πολύγωνο. Το πολύγωνο σχηματίζεται ενώνοντας από 3 (τρίγωνο) μέχρι 15 σημεία του χώρου, διατηρώντας, ταυτόχρονα, την απόσταση κάθε σημείου από το γειτονικό του ελάχιστη (ευθεία). Προφανώς, το τελευταίο σημείο ενώνεται με το αρχικό ενώ απαγορεύεται να τέμνονται δύο πλευρές μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ για τον υπολογισμό των σημείων ελάχιστης απόστασης, και, όπως φαίνεται και από τον Πίν. 6.3, χρησιμοποιεί από 3 μέχρι και 13 φορές περισσότερα bit για την περιγραφή της θέσης του UE σε σχέση με την απλή τεχνική του ελλειψοειδούς σημείου.



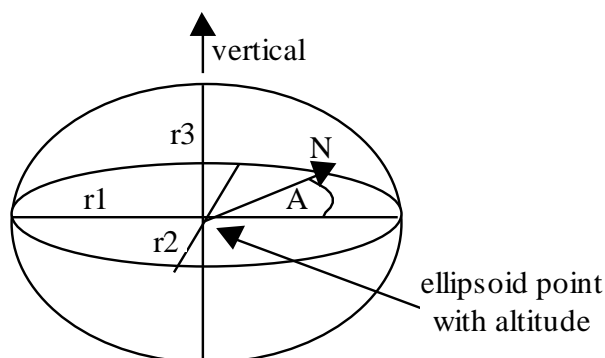
Σχήμα 6.6. Υπολογισμός της θέσης ενός UE εντός πολυγώνου 5 κορυφών [2].

ellipsoidPointWithAltitude: Το πεδίο αυτό περιγράφει τη θέση ενός UE με χρήση συντεταγμένων ελλειψοειδούς σημείου. Η διαφορά από την πρώτη τεχνική έγκειται στο γεγονός ότι το σημείο βρίσκεται υπεράνω ή υπό της επιφάνειας της Γης, κάθετα ως προς το ελλειψοειδές σημείο που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης. Το σημείο θεωρείται ότι έχει θετικό ύψος αν βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της Γης και αρνητικό αν βρίσκεται κάτω από αυτήν.



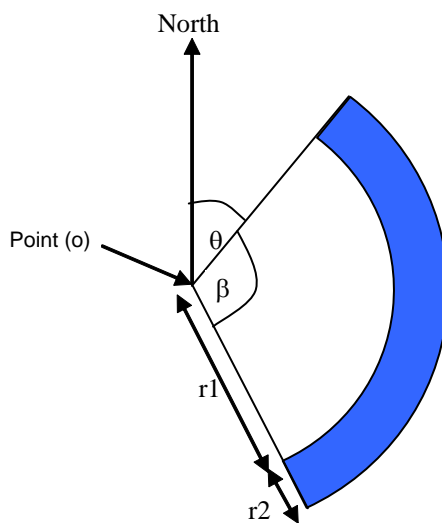
Σχήμα 6.7. Θέση ελλειψοειδούς σημείου με ύψος [2].

ellipsoidPointWithAltitudeAndUncertaintyEllipsoid: Το πεδίο αυτό περιγράφει τη θέση ενός UE με βάση την προαναφερθείσα τεχνική ελλειψοειδούς σημείου με ύψος, και επιπλέον ενσωματώνει κατάλληλο γεωγραφικό επίπεδο εμπιστοσύνης υπό μορφή τρισδιάστατης έλλειψης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται έλλειψη με μεγάλο άξονα μήκους $r1$ και γωνίας A σε σχέση με τον νοητό βορρά, μικρό άξονα μήκους $r2$, και τρίτο άξονα που αντιπροσωπεύει το ύψος, μήκους $r3$, κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο πρώτοι άξονες. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται όταν η ακρίβεια των μετρήσεων δεν επιτρέπει τον μονοσήμαντο υπολογισμό της θέσης του UE, αλλά υπάρχει η δυνατότητα να ποσοτικοποιηθεί η γεωγραφική συμβολή κάθε παράγοντα στην αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης του UE.



Σχήμα 6.8. Ελλειψοειδές σημείο με ύψος εντός έλλειψης αμφιβολίας [2].

ellipsoidArc: Το πεδίο αυτό φέρει την πιθανή θέση ενός UE εντός ελλειψοειδούς τόξου. Συγκεκριμένα, οι συντεταγμένες ενός ελλειψοειδούς σημείου, o , αντιστοιχίζονται στις συντεταγμένες του κέντρου του τόξου. Κάθε πρωτεύουσα ακτίνα του τόξου αποτελείται από δύο μικρότερες, μήκους $r1$ (εσωτερική) και $r2$ (ακτίνα αμφιβολίας). Η γωνία που σχηματίζεται από τον νοητό άξονα του βορρά και από τον άξονα της πρώτης πρωτεύουσας ακτίνας του τόξου ονομάζεται θ (0 - 360 μοίρες), ενώ η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στις δυο πρωτεύουσες ακτίνες καλείται β (0 - 360 μοίρες). Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται όταν η ακρίβεια των μετρήσεων δεν επιτρέπει τον μονοσήμαντο υπολογισμό της θέσης του UE, αλλά υπάρχει η ανάγκη το επίπεδο εμπιστοσύνης να δοθεί με κυκλική γεωγραφική μορφή (εμβαδόν κυκλικού τομέα ή κυκλικού δακτυλίου κτλ).



Σχήμα 6.9. Υπολογισμός της θέσης ενός UE εντός ελλειψοειδούς τόξου [2].

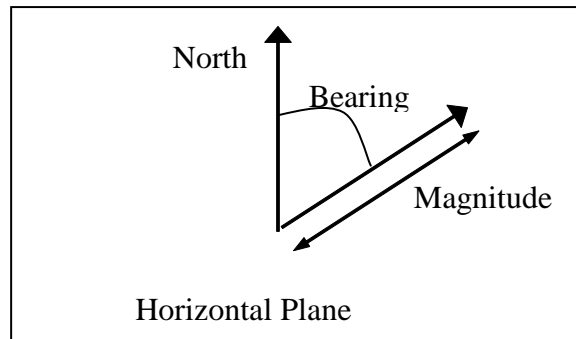
Με βάση τα προηγούμενα και με απώτερο στόχο τον υπολογισμό θέσης οχημάτων που κινούνται επί της επιφάνεια της Γης, συμπεραίνεται ότι οι τεχνικές ελλειψοειδούς σημείου με ύψος δεν είναι αναγκαίες. Διαπιστώνεται, επίσης, ότι στις περιπτώσεις υπολογισμού της θέσης ενός UE με μεγάλη ακρίβεια, όπως στην απλή περίπτωση ελλειψοειδούς σημείου, το μέγεθος του μηνύματος είναι μικρότερο από τις περιπτώσεις όπου υπάρχει αμφιβολία για την ακριβή θέση του τερματικού. Στην πράξη, ωστόσο, κάθε υπολογισμός θέσης ενός UE συνοδεύεται και από μικρή αβεβαιότητα ως προς τη θέση του. Συνεπώς, απαιτείται η επιλογή του πεδίου εκείνου που περιγράφει ακριβέστερα τη θέση ενός οχήματος, έτσι ώστε να είναι δυνατός και ο αξιόπιστος υπολογισμός επιπρόσθετης κυκλοφοριακής πληροφορίας. Εντούτοις, κάτι τέτοιο οδηγεί και στη μετάδοση μεγαλύτερου μεγέθους μηνύματος στον eNB.

6.2.2 Τα ΙΕ που περιγράφουν την ταχύτητα και τη χρονική στιγμή μέτρησης ενός UE εντός δοκιμαστικού οχήματος

Τύπος ΙΕ	Μέγεθος (bits)
<i>horizontalVelocity</i>	20
<i>horizontalWithVerticalVelocity</i>	29
<i>horizontalVelocityWithUncertainty</i>	28
<i>horizontalWithVerticalVelocityAndUncertainty</i>	45

Πίνακας 6.4. Τα διάφορα ΙΕ που καθορίζουν τον τρόπο περιγραφής της ταχύτητας ενός UE.

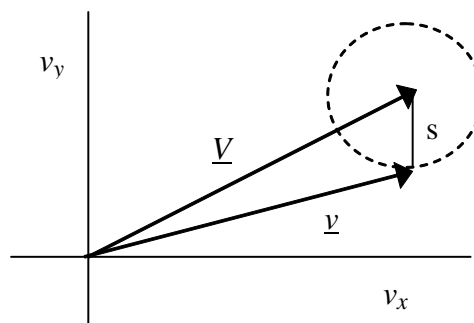
horizontalVelocity: Το πεδίο αυτό φέρει το διάνυσμα της οριζόντιας ταχύτητας κινούμενου UE. Το διάνυσμα αποτελείται από το μέτρο της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας και την κατεύθυνσή της (bearing), μετρούμενη ως γωνιακή απόκλιση από τον άξονα του βορρά.



Σχήμα 6.10. Υπολογισμός της οριζόντιας ταχύτητας ενός κινούμενου UE [2].

horizontalWithVerticalVelocity: Το πεδίο αυτό φέρει το διάνυσμα της συνολικής ταχύτητας, οριζόντιας και κάθετης, κινούμενου UE. Επιπλέον του υπολογισμού του μέτρου και της κατεύθυνσης της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας, υπολογίζονται τα ίδια μεγέθη και για την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας.

horizontalVelocityWithUncertainty: Το πεδίο αυτό φέρει το σύνολο των διανυσμάτων της οριζόντιας ταχύτητας κινούμενου UE εντός κύκλου με ακτίνα αμφιβολίας s . Θεωρώντας ότι το διάνυσμα της ταχύτητας που αντιστοιχεί στο σημείο του κέντρου του κύκλου είναι \underline{v} και με τη βοήθεια της ακτίνας αμφιβολίας, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα αμφιβολίας s , το σύνολο των διανυσμάτων των ταχυτήτων \underline{v} των σημείων εντός του κύκλου περιγράφονται από τη σχέση: $|\underline{v} - \underline{V}| \leq s$.



Σχήμα 6.11. Η οριζόντια ταχύτητα ενός κινούμενου UE εντός κύκλου αμφιβολίας [2].

horizontalWithVerticalVelocityAndUncertainty: Το πεδίο αυτό φέρει το σύνολο των διανυσμάτων της συνολικής ταχύτητας κινούμενου UE εντός δύο κύκλων αμφιβολίας, όπως ακριβώς στο προηγούμενο πεδίο. Το οριζόντιο διάνυσμα ταχύτητας $\underline{V}_{x,y}$ αντιστοιχεί στην ταχύτητα του κέντρου του κύκλου στο οριζόντιο επίπεδο, ο οποίος φέρει ακτίνα αμφιβολίας s_1 , ενώ το διάνυσμα ταχύτητας \underline{V}_z αντιστοιχεί στην ταχύτητα του κέντρου κύκλου κάθετου στο επίπεδο του προηγούμενου, ο οποίος φέρει ακτίνα αμφιβολίας s_2 . Το σύνολο των διανύσματος των οριζόντιων ταχυτήτων $\underline{v}_{x,y}$ και κάθετων \underline{v}_z εντός των αντίστοιχων κύκλων δίνεται από τις σχέσεις: $|\underline{v}_{x,y} - \underline{V}_{x,y}| \leq s_1$, για το οριζόντιο πεδίο και $|\underline{v}_z - \underline{V}_z| \leq s_2$ για το κάθετο αντίστοιχα.

Με δεδομένο ότι τα οχήματα κινούνται οριζόντια κατά μήκος κάποιου οδικού τμήματος και ότι οι μετρήσεις της ταχύτητάς τους σε πρακτικές εφαρμογές συνοδεύονται από μια αναπόφευκτη αμφιβολία/ανακρίβεια, το πεδίο που περιγράφει ακριβέστερα την ταχύτητα ενός κινητού για την εφαρμογή της παρούσας εργασίας είναι το *horizontalVelocityWithUncertainty*.

Τέλος, το IE *locationTimestamp-r13* παρέχει την ημερομηνία κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της θέσης του UE στη μορφή “ΈτοςΜήναςΗμέραΩραΛεπτάΔευτερόλεπταZ”, όπου το Z παραλείπεται αν η τοπική ώρα ταυτίζεται με την ώρα Greenwich (GMT). Ειδικά, μετατρέπεται σε +ΩραΛεπτά για τοπική ώρα που προηγείται της GMT κατά τον αναγραφόμενο χρόνο, είτε σε -ΩραΛεπτά για τοπική ώρα που έπεται της GMT κατά τον αναγραφόμενο χρόνο. Το IE αυτό αποτελείται από 44 bit.

6.2.3 Υπολογισμός όγκου FCD δεδομένων

Αν και είναι δυνατή η συλλογή πρόσθετων δεδομένων από τα δοκιμαστικά οχήματα, οι τρεις προαναφερθέντες τύποι IE (θέση UE, ταχύτητα UE, χρονική στιγμή μέτρησης) καλύπτουν τους σκοπούς της παρούσας εργασίας και αντιπροσωπεύουν τους ίδιους τύπους FCD δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την προσομοίωση. Η 3GGP ορίζει πληθώρα IE που μπορούν προαιρετικά να χρησιμοποιηθούν, όπως IE που περιγράφουν τη συχνότητα με την οποία εκπέμπει ένα δοκιμαστικό όχημα ή την κυψέλη εντός της οποίας κινείται. Ωστόσο, στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση ενός κάτω ορίου των δεδομένων ενός FCD μηνύματος (payload) και, επομένως, δεν συμπεριλαμβάνονται στη διερεύνηση περιπτώσεις παραγεμίσματος bit, είτε για την προστασία του μηνύματος είτε λόγω της κωδικοποίησης των δεδομένων, ή πληροφορία επικεφαλίδας μηνύματος. Ως ανώτατο όριο των δεδομένων ενός FCD μηνύματος θα χρησιμοποιηθεί το ανώτατο όριο ενός V2X μηνύματος, όπως αυτό ορίζεται στο Κεφάλαιο 5. Εντούτοις, η πρακτική πληροφορία που απαιτούν απλές εφαρμογές συλλογής δεδομένων από κάποια διαχειριστική οντότητα, δύσκολα αναμένεται να το εξαντλήσει. Συμπεριλαμβάνεται, ωστόσο, στην παρούσα μελέτη για λόγους πληρότητας. Το συνδυασμένο μέγεθος των τριών τύπων IE υπολογίζεται σε περίπου 20 byte και υπερβαίνει τα 50 byte, δηλαδή το ελάχιστο όριο δεδομένων ενός V2X μηνύματος, μόνο στις περιπτώσεις όπου η θέση ενός οχήματος περιγράφεται από πολύγωνο σχηματιζόμενο από μεγάλο αριθμό σημείων. Συνεπώς, ως ελάχιστο και μέγιστο όριο των δεδομένων ενός FCD μηνύματος θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές των 50 και 300 byte αντίστοιχα, τιμές που αντιστοιχούν στα όρια ενός V2X μηνύματος που συλλέγεται περιοδικά, όπως ακριβώς και στην προσομοίωση της εργασίας. Όπως, όμως, προαναφέρθηκε, το μέγεθος ενός V2I μηνύματος που περιέχει βασικά κυκλοφοριακά δεδομένα προσεγγίζει περισσότερο το ελάχιστο παρά το μέγιστο όριο που ορίζει η 3GGP.

Με βάση αυτά τα όρια, υπολογίζεται το ελάχιστο (V_{\min}) και το μέγιστο (V_{\max}) φορτίο δεδομένων εντός του δικτύου, πολλαπλασιάζοντας απλώς τον όγκο των FCD μετρήσεων, M , που έχει συλλεχθεί εντός του δικτύου, όπως αυτός έχει υπολογιστεί στον Πίν. 6.2, με τον ελάχιστο και μέγιστο όγκο δεδομένων κάθε FCD μηνύματος αντίστοιχα. Ομοίως, το γινόμενο αυτών των δύο ακραίων τιμών με τον αριθμό των FCD μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο, m , που λαμβάνονται εντός του δικτύου, αποδίδει τον ελάχιστο

($R_{FCD, \min}$) και μέγιστο ($R_{FCD, \max}$) ρυθμό αποστολής δεδομένων από τα δοκιμαστικά οχήματα. Τέλος, ο αντίστοιχος όγκος δεδομένων εντός μιας κυψέλης υπολογίζεται ως $V_{\text{cell}} = \frac{V}{n}$ ενώ ο ρυθμός αποστολής

δεδομένων δίνεται από τη σχέση $R_{FCD, \text{cell}} = \frac{R_{FCD}}{n}$.

Ποσοστό Δοκιμαστικών Οχημάτων (%)	Συχνότητα Δειγματοληψίας (Hz)	V_{\min} (MB)	V_{\max} (MB)	$R_{FCD, \min}$ (kbps)	$R_{FCD, \max}$ (kbps)
0.5	1	1.756	10.534	4.656	27.936
1	1	3.294	19.765	8.736	52.416
1	1/10	0.338	2.027	0.896	5.376
1	1/30	0.119	0.715	0.316	1.896
2	1	6.107	36.644	16.196	97.176
2	1/10	0.629	3.774	1.668	10.008
2	1/30	0.223	1.34	0.592	3.552
5	1	16.515	99.087	43.796	262.776
5	1/10	1.697	10.181	4.5	27

Πίνακας 6.5. Ο συνολικός όγκος των FCD δεδομένων εντός του δικτύου και ο ρυθμός αποστολής τους από τα δοκιμαστικά οχήματα για όλα τα σενάρια προσομοίωσης στην περίπτωση υψηλής πυκνότητας.

Ποσοστό Δοκιμαστικών Οχημάτων (%)	Συχνότητα Δειγματοληψίας (Hz)	V_{\min} (MB)	V_{\max} (MB)	$R_{FCD, \min}$ (kbps)	$R_{FCD, \max}$ (kbps)
0.5	1	1.1	6.599	4.656	27.936
1	1	2.064	12.381	8.736	52.416
1	1/10	0.212	1.27	0.896	5.376
1	1/30	0.114	0.685	0.316	1.896
2	1	3.826	22.954	16.196	97.176
2	1/10	0.394	2.364	1.668	10.008
2	1/30	0.14	0.839	0.592	3.552
5	1	10.345	62.071	43.796	262.776
5	1/10	1.063	6.378	4.5	27

Πίνακας 6.6. Ο συνολικός όγκος των FCD δεδομένων εντός του δικτύου και ο ρυθμός αποστολής τους από τα δοκιμαστικά οχήματα για όλα τα σενάρια προσομοίωσης στην περίπτωση μέσης πυκνότητας.

Από τους Πίν. 6.5 και 6.6 παρατηρείται ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από τα δοκιμαστικά οχήματα είναι ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις πυκνότητας (όγκου) κυκλοφορίας, όπως άλλωστε αναμένεται, αφού αυτός εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Από την άλλη πλευρά, ο συνολικός όγκος των δεδομένων που συλλέγονται είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση της υψηλής πυκνότητας, καθώς ο χρόνος παραμονής των δοκιμαστικών οχημάτων στο δίκτυο είναι μεγαλύτερος, γεγονός που οδηγεί στη συλλογή περισσότερων FCD μετρήσεων. Το ποσοστό, επίσης, κατά το οποίο είναι μεγαλύτερος, περίπου 60%, είναι ανάλογο του ποσοστού κατά το οποίο είναι μεγαλύτερη η διάρκεια παραμονής των οχημάτων εντός του δικτύου στην περίπτωση της υψηλής πυκνότητας σε σχέση με την αντίστοιχη διάρκεια παραμονής τους για την περίπτωση της μέσης πυκνότητας.

Ο μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων εντός κυψέλης παρατηρείται στην περίπτωση υψηλής πυκνότητας με $pr = 5\%$ και $sf = 1\text{Hz}$, και είναι ίσος με: $R_{FCD, \text{cell}, \max} = \frac{262.776}{n}$ (kbps) ≤ 262.776 (kbps). Η

τιμή των 262.776kbps αποτελεί το ανώτατο όριο ρυθμού μετάδοσης και, συνεπώς, σε συνήθεις περιπτώσεις αναμένονται μικρότεροι ρυθμοί. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στην άνω ζεύξη, δηλαδή, ο ρυθμός αποστολής δεδομένων από τα δοκιμαστικά οχήματα προς την RSU, είναι μικρός. Επομένως, για την εξυπηρέτηση μιας εφαρμογής συλλογής FCD μετρήσεων, είναι δυνατή η χρήση οποιασδήποτε ζώνης LTE V2X συχνοτήτων, όπως αυτές παρατέθηκαν στον Πίν. 5.5, ακόμα και εκείνων που έχουν εύρος ζώνης 1.4MHz, όπως οι ζώνες 3 και 8. Στην Ελλάδα, ωστόσο, τα εύρη συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται είναι αυτά των 5, 10 και 20MHz, ενώ το αντίστοιχο εύρος των 1.4MHz αναμένεται να διατεθεί στο μέλλον για εφαρμογές με μικρές απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, όπως αυτές των M2M (Machine to Machine).

Γενικά, ο αριθμός των στοιχείων πόρων (RE) μιας ζώνης συχνοτήτων είναι ίσος με το γινόμενο των συστάδων πόρων (RB) που περιέχονται στη ζώνη επί τον αριθμό των OFDM συμβόλων, όπως αυτά καθορίζονται από το κυκλικό πρόθεμα (CP).

$$N_{RE} = N_{RB} \cdot N_{symbols} \quad (6.4)$$

Ο αριθμός των προς μετάδοση bit είναι ίσος με το γινόμενο των RE με τον αριθμό bit που περιέχει το καθένα.

$$N_{bit} = N_{RE} \cdot N_{bit/RE} \quad (6.5)$$

Τέλος, ο ρυθμός μετάδοσης/λήψης, μετρούμενος σε bps, υπολογίζεται ως ο λόγος του αριθμού bit που αποστέλλονται/λαμβάνονται προς το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

$$R = \frac{N_{bit}}{t} \quad (6.6)$$

Ο ρυθμός μετάδοσης που υπολογίζεται από τη σχέση (6.6) είναι θεωρητικός, και, στην πράξη, η τιμή του εμφανίζεται μικρότερη από την αναμενόμενη. Αυτό οφείλεται στο ότι πόροι του συστήματος δεσμεύονται για την αποστολή και λήψη σημάτων σχετικών με την εύρυθμη λειτουργία του LTE συστήματος. Έτσι, συγκεκριμένα πλαίσια στο χρόνο δεσμεύονται για την αποστολή και λήψη σημάτων που βοηθούν στον συγχρονισμό και την πληροφόρηση των UE εντός κυψέλης (reference signals), και άλλων που εξυπηρετούν λειτουργίες φυσικών καναλιών και δεν μεταφέρουν δεδομένα χρήστη (πχ. κανάλι τυχαίας φυσικής προσπέλασης και ελέγχου). Επιπλέον, για την αποφυγή συγκρούσεων δεσμεύονται χρονοσχισμές κατά τη διάρκεια των οποίων δεν πραγματοποιείται αποστολή και λήψη δεδομένων (χρονοσχισμές αναμονής). Τέλος, στα δεδομένα που μεταδίδονται εισάγονται πλεονάζοντα bit, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από τον ρυθμό κώδικα που χρησιμοποιείται. Αποτέλεσμα όλων των προαναφερθέντων αποτελεί η μείωση του πραγματικού διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (R_{av}) κατά έναν παράγοντα της τάξης του 25%, τιμή που διαφοροποιείται ελαφρά, ανάλογα με τη συχνότητα και τις απαιτήσεις του εκάστοτε LTE συστήματος. Από την άλλη πλευρά, ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να αυξηθεί με χρήση διαφόρων τεχνικών, κυριότερη των οποίων αποτελεί η χρήση χωρικής πολυπλεξίας δεδομένων MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output). Ένας πομπός/δέκτης που χρησιμοποιεί κεραία 4X4 MIMO είναι σε θέση να πετύχει μέχρι και τετραπλασιασμό του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Έτσι, κάνοντας χρήση τεχνολογίας MIMO 4X4, ο μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων στην uplink ζεύξη προκύπτει:

$$R_{av, MIMO} = 4 \cdot R_{av} = 4 \cdot 0.75 \cdot R = 3 \cdot R \quad (6.7)$$

Με βάση τους Πίν. 5.1 και 5.2 για uplink ζεύξη και κανονικό κυκλικό πρόθεμα, το εύρος συχνοτήτων των 1.4MHz αντιστοιχεί σε 6 RB (Resource Blocks) των 84 RE (Resource Elements) έκαστο, δηλαδή συνολικά 504 RE. Τα RE αντιστοιχούν σε ένα υποφέρον στο πεδίο της συχνότητας και σε ένα OFDM σύμβολο στο πεδίο του χρόνου. Συνεπώς, σε μια χρονοσχισμή των 0.5msec, για εύρος συχνοτήτων 1.4MHz αντιστοιχούν 504 OFDM σύμβολα. Κάθε OFDM σύμβολο αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό bit σε αντιστοιχία με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων υπολογίζεται διαιρώντας τον όγκο των δεδομένων προς τη χρονική διάρκεια αποστολής τους. Έτσι, με χρήση των τύπων (6.4), (6.5), (6.6) και 6.7 υπολογίζονται οι τιμές του Πίν. 6.5.

Σχήμα Διαμόρφωσης	Αριθμός bit ανά OFDM σύμβολο	Αριθμός bit ανά χρονοσχισμή	R (Mbps)	R_{av} (Mbps)	$R_{av, MIMO}$ (Mbps)
QPSK	2	1008	2.016	1.512	6.048
16QAM	4	2016	4.032	3.024	12.096
64QAM	6	3024	6.048	4.536	18.144

Πίνακας 6.7. Ο θεωρητικός και ο διαθέσιμος ρυθμός λήψης δεδομένων άνω ζεύξης για εύρος ζώνης συχνοτήτων 1.4MHz.

Κατ' ανάλογο τρόπο υπολογίζεται ο θεωρητικός και διαθέσιμος ρυθμός στην uplink ζεύξη για το εύρος συχνοτήτων των 5MHz. Έτσι, τα διαθέσιμα RE σε μια χρονοσχισμή είναι $25 \cdot 84 = 2100$.

Σχήμα Διαμόρφωσης	Αριθμός bit ανά OFDM σύμβολο	Αριθμός bit ανά χρονοσχισμή	R (Mbps)	R_{av} (Mbps)	$R_{av, MIMO}$ (Mbps)
QPSK	2	4200	8.4	6.3	25.2
16QAM	4	8400	16.8	12.6	50.4
64QAM	6	12600	25.2	18.9	75.6

Πίνακας 6.8. Ο θεωρητικός και ο διαθέσιμος ρυθμός λήψης δεδομένων άνω ζεύξης για εύρος ζώνης συχνοτήτων 5MHz.

Θεωρώντας ότι ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί p κυψέλες, ο διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε κάθε κυψέλη είναι ίσος με:

$$R_{av, cell} = \frac{R_{av}}{p} \quad (6.8)$$

καθώς τα διαθέσιμα κανάλια της άνω ζεύξης χωρίζονται και αυτά με τη σειρά τους σε p ομάδες. Συνήθεις τιμές για το p αποτελούν τα πολλαπλάσια του 3. Από την άλλη πλευρά, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που απαιτούν τα δοκιμαστικά οχήματα εντός κυψέλης είναι:

$$R_{FCD, cell} = \frac{R_{FCD}}{n} \quad (6.9)$$

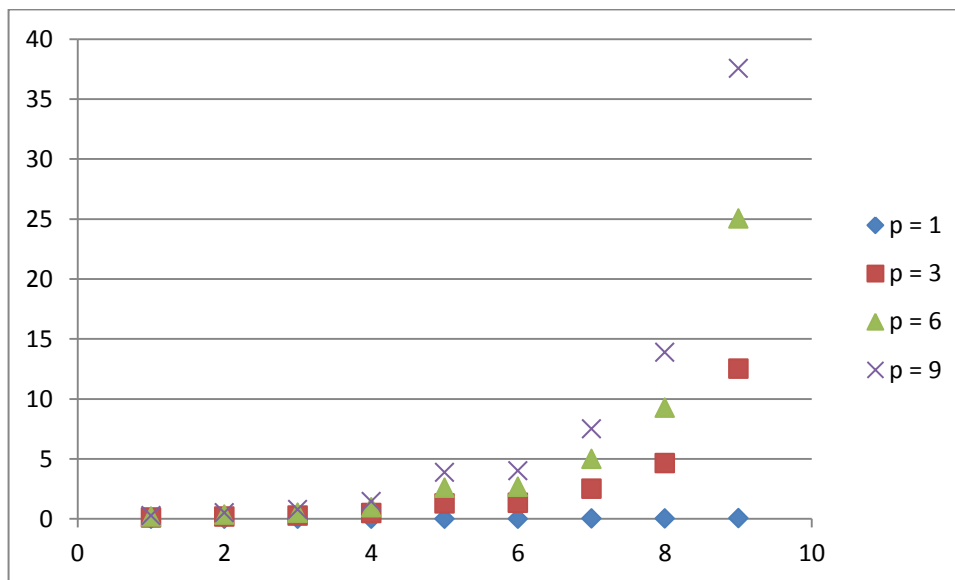
Έτσι, το ποσοστό χρησιμοποίησης του διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων εντός μιας κυψέλης από την εφαρμογή συλλογής FCD δεδομένων είναι:

$$P_{\text{usage, cell}} = \frac{R_{\text{FCD, cell}}}{R_{\text{av, cell}}} = \frac{p}{n} \cdot \frac{R_{\text{FCD}}}{R_{\text{av}}} \quad (6.10)$$

Καθώς ο αριθμός μεταπομπών n που πραγματοποιεί ένα όχημα κινούμενο κατά μήκος του δικτύου της προσομοίωσης εξαρτάται από τον βαθμό διαμέρισης σε τομείς και τον αριθμό κυψελών που το εξυπηρετούν, το n μπορεί να γραφεί ως $n = a \cdot n_{\text{macrocell}}$, όπου a φυσικός αριθμός τέτοιος ώστε $1 \leq a \leq p$ και $n_{\text{macrocell}}$ ο αριθμός των μακροκυψελών. Ο φυσικός αριθμός a αντιπροσωπεύει τον αριθμό των τομέων/κυψελών ενός σταθμού βάσης και ο $n_{\text{macrocell}}$ τον αριθμό των σταθμών βάσης στους οποίους συνδέεται ένα κινητό κατά την κίνησή του στο δίκτυο.

Καθώς ο βαθμός διαμέρισης σε τομείς κάθε κυψέλης αλλά και ο αριθμός των κυψελών που καλύπτουν το δίκτυο της Λεωφόρου Κηφισίας δεν είναι γνωστά, θα δοθεί προσεγγιστικά ένα άνω όριο της σχέσης (6.10). Για τον σκοπό αυτό, υποτίθεται μέγιστος ρυθμός μετάδοσης R_{FCD} για κάθε ζεύγος (pr, sf) , και, ταυτόχρονα, ελάχιστο R_{av} , δηλαδή χρησιμοποιείται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στην άνω ζεύξη εύρους ζώνης 5MHz, διαμόρφωσης QPSK, χωρίς χρήση τεχνολογίας MIMO (6.3Mbps). Τέλος, τίθεται $n = 1$ και $p = [1, 3, 6, 9]$ κατά περίπτωση, υπόθεση που αντιστοιχεί σε μοναδικό σταθμό βάσης με 1, 3, 6 και 9 τομείς, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίν. 6.9, με το ποσοστό χρησιμοποίησης (%) να δίνεται στον κατακόρυφο άξονα, ενώ οι τιμές του οριζόντιου άξονα αντιστοιχίζονται σε κάθε ζεύγος (pr, sf) όπως απεικονίζεται στο σχήμα:

(pr, sf)	(1, 1/30)	(2, 1/30)	(1, 1/10)	(2, 1/10)	(5, 1/10)	(0.5, 1)	(1, 1)	(2, 1)	(5, 1)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9



Σχήμα 6.12. Το ποσοστό χρησιμοποίησης της uplink ζώνης των 5MHz κάτω από τις δυσμενέστερες τηλεπικοινωνιακές συνθήκες και για όλα τα ζεύγη (pr, sf) .

Παρατηρείται ότι μόνο στα ζεύγη (pr, sf) των (2, 1) και (5, 1) γίνεται το φορτίο υπολογίσιμο, ενώ πραγματικά απαγορευτικό γίνεται στην περίπτωση όπου $(pr, sf) = (5, 1)$ για $p = 6$ και $p = 9$. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι οι συγκεκριμένες τιμές του ποσοστού υπολογίζονται υπό τις πλέον ακραίες συνθήκες.

Οποιαδήποτε μεταβολή στις μεταβλητές της σχέσης (6.10), όπως χρήση διαμόρφωσης 16 QAM, μεγαλύτερου αριθμού σταθμών βάσης, τεχνολογίας MIMO κτλ., επαναφέρει τις τιμές του ποσοστού σε χαμηλά επίπεδα.

6.3 Συμπεράσματα

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση των τηλεπικοινωνιακών αναγκών ενός συστήματος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων για την πρόβλεψη της κυκλοφορίας.

Τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις

Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο που παράγεται από τη δειγματοληψία δοκιμαστικών οχημάτων είναι μικρό, ακόμα και υπό το δυσμενέστερο σενάριο, αυτό της μεγάλης συχνότητας δειγματοληψίας (1Hz) και του υπολογισμού ποσοστού των δοκιμαστικών οχημάτων (5%). Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων των δυο κατηγοριών φωρατών και τις τιμές των Πιν. 6.1, 6.2, 6.5 και 6.6, εξάγονται δύο βασικές διαπιστώσεις:

i) Για την πρώτη κατηγορία φωρατών, η αύξηση των δοκιμαστικών οχημάτων δίνει σημαντικά καλύτερη ακρίβεια μετρήσεων από ανάλογη αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας. Ταυτόχρονα, αυτό επιτυγχάνεται συλλέγοντας μικρότερο τηλεπικοινωνιακό φορτίο από ό,τι θα απαιτούσε μια αντίστοιχη ή και πολλαπλάσια αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας. Είναι φανερό ότι, για παράδειγμα, στην περίπτωση με $pr = 1\%$, δεκαπλασιασμός της sf από $1/10\text{Hz}$ στο 1Hz βελτιώνει τον MAPE κατά 8% αυξάνοντας τον όγκο των μετρήσεων 9.75 φορές. Αντίστοιχα, απλά διπλασιασμός του pr στο 2% διατηρώντας την sf σταθερή στα $1/10\text{Hz}$, οδηγεί σε μείωση του MAPE κατά 27.14% με αύξηση του αριθμού των μετρήσεων μόνο κατά 1.86 φορές.

ii) Για τη δεύτερη κατηγορία φωρατών, η αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας είναι αυτή που κυρίως παρέχει ακριβέστερες μετρήσεις. Μέχρι το ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων που μελετήθηκε, αυτό του 5%, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερα μεγάλη βελτίωση του MAPE, συγκριτικά με την αντίστοιχη που διαπιστώνεται αυξάνοντας απλά την sf . Ωστόσο, αυτή ακριβώς η ενέργεια επηρεάζει άμεσα και τον όγκο του τηλεπικοινωνιακού φορτίου που συγκεντρώνεται. Έτσι, παίρνοντας ως παράδειγμα την ίδια περίπτωση με προηγουμένως, δηλαδή για $pr = 1\%$ και $sf = 1/10\text{Hz}$, δεκαπλασιασμός της sf στην τιμή του 1Hz βελτιώνει τον MAPE κατά 25.8%, ενώ διπλασιασμός μόνο του pr σε 2%, διατηρώντας την sf σταθερή, αυξάνει τον MAPE κατά 3.36%, αυξάνοντας παράλληλα τον όγκο δεδομένων κατά 9.75 και 1.86 φορές, αντίστοιχα. Συνεπώς, αν και η ακρίβεια των μετρήσεων βελτιώνεται με την αύξηση της sf , αυτό επιτυγχάνεται επιβαρύνοντας την τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Μάλιστα, για την επίτευξη ανεκτών τιμών MAPE (μικρότερων του 10%, κάτι που δεν μελετήθηκε στην παρούσα εργασία), διαφαίνεται ότι η αναγκαία αύξηση της sf ίσως καθιστά ασύμφορο οικονομικά το εγχείρημα, απαιτώντας δυσανάλογα μεγάλο τηλεπικοινωνιακό εύρος.

Αρχικές ανάγκες και αρχιτεκτονική ΚΔΚ

Η συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων προϋποθέτει επικοινωνία ανάμεσα στα δοκιμαστικά οχήματα και στις RSU που αναλαμβάνουν να συγκεντρώσουν την πληροφορία. Αυτό το είδος επικοινωνίας αποτελεί μια V2I μορφή επικοινωνίας, όπως ορίζεται από την 3GPP στο πλαίσιο της LTE τεχνολογίας. Η ευέλικτη αρχιτεκτονική των δικτύων LTE, η ταχεία ανάπτυξή τους, και η προοπτική επεκτασιμότητάς τους (ήδη διενεργείται ουσιαστική έρευνα για τα δίκτυα 5G) φαντάζουν ισχυρά πλεονεκτήματα για την αξιοποίησή

τους για V2X εφαρμογές αντί των ασύρματων WIFI δικτύων. Βέβαια, η προτυποποίηση των τελευταίων βρίσκεται σε περισσότερο προχωρημένο στάδιο. Εντούτοις, στο πλαίσιο των LTE δικτύων, οι V2X εφαρμογές αναμένεται να σημειώσουν μεγάλη άνοδο με την έλευση των δικτύων πέμπτης γενιάς και των υπηρεσιών 5G-V2X.

Όσον αφορά το ΚΔΚ, οφείλει να φροντίσει για την κινητοποίηση οδηγών και την ενσωμάτωση εντός των δοκιμαστικών οχημάτων ειδικού εξοπλισμού με δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης κάθε οχήματος και αποστολής της στις RSU (UE με δυνατότητα V2I εφαρμογών). Τέλος, για την προσέλκυση οδηγών είναι επιβεβλημένη και η παροχή σε αυτούς κυκλοφοριακής πληροφόρησης, ως αντάλλαγμα για τις υπηρεσίες τους. Οι RSU μπορεί να εγκατασταθούν ως λογικές μονάδες στους υπάρχοντες σταθμούς βάσης του δικτύου LTE, ώστε να μπορούν να αξιοποιήσουν την υποδομή του δικτύου καθώς και τη μεγάλη ακτίνα κάλυψης των σταθμών, που επιτρέπει τη συλλογή μετρήσεων από πολλαπλές κυψέλες. Με αυτή την επιλογή, βέβαια, η εξάρτηση του ΚΔΚ από τον κάτοχο της δικτυακής υποδομής θα είναι μεγάλη. Παρέχει, ωστόσο, δυνατότητα κάλυψης μεγάλης γεωγραφικής περιοχής για τη συλλογή των κυκλοφοριακών δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, οι RSU μπορεί να είναι τύπου UE, ειδικός, δηλαδή, εξοπλισμός του ΚΔΚ που θα υποστηρίζει V2I εφαρμογές και θα εγκατασταθεί πλησίον του οδοστρώματος, αναλαμβάνοντας το ρόλο του συλλέκτη κυκλοφοριακών μετρήσεων. Διαφαίνεται, πάντως, ότι αν ο στόχος του ΚΔΚ είναι η εποπτεία και πρόβλεψη της κυκλοφορίας σε μεγάλο τμήμα της Αθήνας, τότε η αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος δικτύου LTE και η εγκατάσταση των RSU στους eNB φαίνεται η ενδεδειγμένη. Από την άλλη πλευρά, αν το ενδιαφέρον περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές της Αθήνας, όπως οι περιοχές του Δακτυλίου, η Λεωφόρος Κηφισίας κτλ., δηλαδή περιοχές όπου είναι ήδη εγκατεστημένοι οι τωρινοί φωρατές του ΚΔΚ, τότε η δημιουργία ενός ιδιόκτητου δικτύου πρόσβασης με τη μορφή UE-RSU προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία. Το δίκτυο μετάδοσης του όγκου δεδομένων από τις RSU πίσω στον server του ΚΔΚ μπορεί και αυτό με τη σειρά του να είναι μισθωμένο από κάποιον πάροχο είτε ιδιόκτητο (πχ. οπτική ίνα, σύστημα WiMAX κτλ.), ενώ όλες οι εναλλακτικές προσεγγίσεις προϋποθέτουν ενδελεχή οικονομική ανάλυση όλων των εμπλεκόμενων παραγόντων. Λαμβάνοντας υπόψη, εντούτοις, τον μικρό όγκο δεδομένων που απαιτείται να συλλεγεί καθώς και τη σχετικά μικρή ευαισθησία χρόνου της εφαρμογής, δηλαδή, το γεγονός ότι ο χρόνος συλλογής δεδομένων δεν είναι το ίδιο σημαντικό με αυτόν μιας εφαρμογής άμεσης ανάγκης, διαφαίνεται ότι η μίσθωση ζεύξης αποτελεί καλή επιλογή.

Επιλογή ζώνης συχνότητων

Η επιλογή της ζώνης συχνότητων που θα χρησιμοποιηθεί για την V2I επικοινωνία είναι σχετικά απλή. Η ζώνη συχνότητων 47, που είναι αποκλειστικά δεσμευμένη για V2X εφαρμογές, δεν έχει ακόμα δημοπρατηθεί. Συνεπώς, οι διαθέσιμες προς χρήση συχνότητες αποτελούν τμήμα των ήδη χρησιμοποιούμενων LTE συχνότητων. Αυτό συνεπάγεται ότι ο όγκος κυκλοφοριακών δεδομένων που συλλέγεται θα προστεθεί στο ήδη υπάρχον τηλεπικοινωνιακό φορτίο, κάτι το οποίο φαίνεται εφικτό με βάση το μικρό φορτίο που αντιπροσωπεύουν τα κυκλοφοριακά δεδομένα και τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που προσφέρει η τεχνολογία LTE. Η αξιοποίηση των δικτύων LTE από πληθώρα εφαρμογών στο μέλλον, όπως από εφαρμογές τύπου M2M, αναμένεται να περιορίσει περαιτέρω το διαθέσιμο εύρος ζώνης, οπότε και με δεδομένη την εισαγωγή των 5G-V2X υπηρεσιών θα αποτελέσει το έναυσμα για χρήση και της ζώνης συχνότητων 47.

Η αξιοποίηση των LTE δικτύων προς συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων δεν έγκειται μόνο στη δικτυακή τους υποδομή και στην ενσωμάτωση σε αυτά V2X εφαρμογών αλλά και στα εργαλεία εκείνα

που διαθέτουν, ώστε να υποστηρίζουν και να υποβοηθούν αυτές τις εφαρμογές. Έτσι, οι ενσωματωμένες εντός οχημάτων συσκευές προσδιορισμού θέσης μπορούν να υποβοηθούνται από το δίκτυο κατά τη διαδικασία εντοπισμού του οχήματος με διάφορες μεθόδους προσδιορισμού θέσης, όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η συγκεκριμένη διαδικασία καθιστά περιττή τη χρήση υπερβολικά πολύπλοκου και ακριβού εξοπλισμού εντός των δοκιμαστικών οχημάτων, ενώ η επιβάρυνση λόγω της σηματοδότησης και των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ του δοκιμαστικού οχήματος και ενός eNB επιβαρύνει την LTE ζεύξη, καθώς πραγματοποιείται μέσω της LTE-Uu διεπαφής. Συνεπώς, μόνο το τελικό μήνυμα και ο όγκος που αυτό αντιπροσωπεύει απομένει για να διακινηθεί μέσω της PC5 διεπαφής που χρησιμοποιεί αποκλειστικά τη ζώνη 47. Επομένως, στην περίπτωση ιδιόκτητου δικτύου συλλογής δεδομένων από RSU τύπου UE, όπου η επικοινωνία μεταξύ του δοκιμαστικού οχήματος και της αντίστοιχης RSU γίνεται μέσω της διεπαφής PC5, το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την εξυπηρέτηση V2I εφαρμογών χρησιμοποιείται αποτελεσματικότερα.

FCD δεδομένα και φωρατές

Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό συμπέρασμα προέκυψε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μέσης ταχύτητας επί ενός οδικού τμήματος, όπως αυτή υπολογίζεται αξιοποιώντας FCD μετρήσεις αλλά και μετρήσεις από τον αντίστοιχο επαγωγικό βρόχο εντός του τμήματος αυτού. Παρατηρήθηκε η σύγκλιση των μετρήσεων σε οδικά τμήματα που χαρακτηρίζονται από σχετικά ομαλές κυκλοφοριακές συνθήκες και εμφανίζουν μικρή διασπορά τιμών της στιγμιαίας ταχύτητας των οχημάτων. Από την άλλη πλευρά, δεν παρατηρήθηκε κάτι ανάλογο σε οδικά τμήματα που εμφανίζουν μεγάλη διασπορά στην τιμή της ταχύτητας των κινούμενων οχημάτων. Τέτοια τμήματα φέρουν, συνήθως, εγκατεστημένο φωρατή είτε πριν είτε μετά από φωτεινό σηματοδότη. Ωστόσο, το ενδιαφέρον των συγκοινωνιολόγων εντοπίζεται στον υπολογισμό της μέσης χωρικής ταχύτητας ενός οδικού τμήματος, μέγεθος το οποίο ένας επαγωγικός βρόχος προσδιορίζει συγκεντρώνοντας μετρήσεις μόνο από ένα σημείο. Για τον λόγο αυτό άλλωστε, είναι σημαντική η θέση εγκατάστασης ενός φωρατή επί ενός οδικού τμήματος. Αντίθετα, οι FCD μετρήσεις προέρχονται από όλο το οδικό τμήμα, ενώ όσο αυξάνεται η συχνότητα δειγματοληψίας και το ποσοστό των δοκιμαστικών οχημάτων παρέχουν ακριβέστερη εικόνα της κυκλοφορίας εντός του οδικού τμήματος. Πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι αν και δεν υπήρχε σύγκλιση των αποτελεσμάτων για τους φωρατές της δεύτερης κατηγορίας, οι FCD μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό πρόσθετων κυκλοφοριακών δεδομένων πέραν της ταχύτητας (όπως χρόνων διαδρομής). Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι FCD μετρήσεις μπορούν να αξιοποιηθούν σε συνδυασμό με κυκλοφοριακά δεδομένα που προέρχονται από τους φωρατές της δεύτερης κατηγορίας, αλλά, και επιπλέον να αντικαταστήσουν κυκλοφοριακές μετρήσεις των φωρατών της πρώτης κατηγορίας (όπως μέτρηση ταχύτητας).

Συμπερασματικά, το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται για τη δημιουργία ενός συστήματος συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων, έγκειται σε οικονομικούς παράγοντες και αποφάσεις σχετικά με την αρχιτεκτονική και τον τρόπο λειτουργίας του, αφού το φορτίο των τηλεπικοινωνιακών δεδομένων που δημιουργείται είναι εύκολα διαχειρίσιμο.

6.4 Παράρτημα

Η ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) αποτελεί ένα σύνολο κανόνων σύνταξης, τους οποίους χρησιμοποιεί η 3GPP για την ενσωμάτωση των IE εντός των μηνυμάτων αποστολής/λήψης. Ανάμεσα στους κανόνες του συντακτικού υπάρχουν και κανόνες κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης των IE,

δηλαδή, κανόνες μετασχηματισμού των τύπων δεδομένων των ΙΕ σε bit και αντίστροφα. Η ASN.1 βοηθά ώστε τα ΙΕ να παρέχονται αφενός σε μορφή κατανοητή για το διαχειριστή, και αφετέρου να μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε bit για την αντιστοίχισή τους σε OFDM σύμβολα και, τελικά, την αποστολή τους. Η μετατροπή κάθε ΙΕ σε bit ακολουθεί συγκεκριμένους κανόνες ενώ ο αριθμός των bit της αντιστοίχισης καθορίζεται από τον τύπο δεδομένων που περιέχει το ΙΕ.

```
-- ASN1START

Ellipsoid-PointWithUncertaintyCircle ::= SEQUENCE {
    latitudeSign          ENUMERATED {north, south},
    degreesLatitude      INTEGER (0..8388607),          -- 23 bit field
    degreesLongitude     INTEGER (-8388608..8388607),  -- 24 bit field
    uncertainty          INTEGER (0..127)
}

-- ASN1STOP
```

Σχήμα 6.13. Παράδειγμα σύνταξης ενός ΙΕ κατά ASN.1 [1].

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.12 το ΙΕ που ορίζεται είναι το *Ellipsoid-PointWithUncertaintyCircle* που αποτελεί μια δομή δεδομένων *Sequence*, ακολουθίας, δηλαδή, άλλων πεδίων. Αυτά τα πεδία είναι τέσσερα, τα *latitudeSign*, *degreesLatitude*, *degreesLongitude* και *uncertainty*, το πρώτο τύπου *Enumerated* και τα άλλα τρία τύπου *Integer*. Ο τύπος *Integer* είναι απλός, μετατρέπεται σε όσα bit επαρκούν ώστε να καλύψουν ολόκληρο το εύρος των τιμών του αντίστοιχου πεδίου, και υπολογίζεται βάση της απλής σχέσης $l = \log_2(r)$, όπου l ο αριθμός των απαιτούμενων bit και r το εύρος των τιμών του πεδίου. Έτσι, στο συγκεκριμένο παράδειγμα το δεύτερο πεδίο απαιτεί 23 bit, το τρίτο 24 και το τέταρτο 7 bit. Ο τύπος *Enumerated* αποτελεί τύπο δεδομένων που λαμβάνει περιγραφικές τιμές και ο αριθμός bit στον οποίο κωδικοποιείται εξαρτάται από τον αριθμό που απαιτούνται για να περιγράψουν το σύνολο των διαφορετικών τιμών του πεδίου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το πεδίο *latitudeSign* λαμβάνει δύο μόνο διαφορετικές τιμές (north, south), συνεπώς, αρκεί ένα bit για να το περιγράψει. Τελικά το ΙΕ του ελλειψοειδούς σημείου εντός κύκλου αμφιβολίας απαιτεί συνολικά για την περιγραφή του 55 bit. Προφανώς, ορίζονται επιπλέον τύποι δεδομένων (πχ. λογικοί - Boolean), ωστόσο, το παράδειγμα είναι ενδεικτικό της διαδικασίας που ακολουθείται κάθε φορά για τον υπολογισμό του αριθμού των bit ενός ΙΕ.

6.5 Βιβλιογραφία

- [1]. 3GPP TS 36.355 V.13.2 (2016-9) - EUTRA; LTE Positioning Protocol (LPP)
- [2]. 3GPP TS 23.032 v13.0.0 (2015-12) - Universal Geographical Area Description (GAD)
- [3]. ITU-T X.691 (2002-07) - OSI networking and system aspects - Abstract Syntax Notation One (ASN.1) - Information Technology - ASN.1 encoding rules: Specification of Packed Encoding Rules (PER).
- [4]. Donghze Cui (2011-08) - LTE Peak Rates Analysis