



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΠΕΜΠΤΗΣ
ΓΕΝΙΑΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΑΥΔΙΚΟΣ

Επιβλέπων: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΩΤΤΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Οκτώβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΑΥΔΙΚΟΣ

Επιβλέπων: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΩΤΤΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Νοεμβρίου 2021.

.....

Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Οκτώβριος 2021

.....

Γεώργιος Κ. Αυδίκος

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

Copyright ©, Γεώργιος Κ. Αυδίκος 2021

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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή της τεχνολογίας δικτύων 5G σε επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων, οχημάτων και δικτύου και υποδομών, οι οποίες είναι γνωστές με τον τίτλο Cellular-Vehicle to Everything (C-V2X). Αποτελεί στόχο της ευρωπαϊκής πολιτικής η διασύνδεση όλων των ανωτέρω οχημάτων μέσω του προγράμματος CEF2 (Connecting Europe Facility) το οποίο παρέχει τον οδικό χάρτη για την εφαρμογή της τεχνολογίας 5G σε μια πλήρως διασυνδεδεμένη Ευρώπη.

Σκοπός και στόχος της εργασίας είναι επισκόπηση/μελέτη των ανωτέρω τεχνολογιών και η ανάλυση/εφαρμογή σε επικοινωνίες C-V2X (Cellular-Vehicle to Everything) αναπτύσσοντας μια πλήρη τεχνοοικονομική ανάλυση για την ανάπτυξη δικτύων 5G σε επικοινωνίες οχημάτων κάνοντας χρήση τεχνολογιών MEC.

Λέξεις Κλειδιά

Επικοινωνίες οχημάτων, δίκτυα 5G, αρχιτεκτονική κυψελωδών συστημάτων, συστήματα MEC, μοντελοποίηση, κόστους

Abstract

This dissertation examines the application of 5G network technology in vehicle-to-vehicle and network and infrastructure communications, known as Cellular-Vehicle to Everything (C-V2X). The aim of European policy is to interconnect all the above vehicles through the CEF2 (Connecting Europe Facility) program which provides the roadmap for the implementation of 5G technology in a fully interconnected Europe.

The **purpose and goal** of this work is an overview / study of the above technologies and the analysis / application in C-V2X communications (Cellular-Vehicle to Everything) developing a complete techno-economic analysis for the development of 5G networks in vehicle communications using MEC technologies.

.

Keywords

Vehicular communications, 5G networks, cellular system architecture, MEC systems, cost modeling

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών για την απόκτηση του τίτλου του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών ΕΜΠ. Από την θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κύριο Παναγιώτη Κωπτή για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την διπλωματική εργασία, για το ενδιαφέρον, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της μέχρι την διεκπεραίωσή της. Στη δομή και ειδικότερα στα τμήματα που αναφέρονται σε 5G και MEC συνεισέφεραν και οι διπλωματικές εργασίες των συναδέλφων Πλάτωνα Γραμματικού και Στέλιου Κουμουτζέλη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του διδάσκοντες (μέλη ΔΕΠ και ερευνητικό προσωπικό) της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά την υλοποίηση των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους και συνάδελφούς μου για την στήριξη και βοήθεια τους μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα.....	8
Συντομογραφίες	12
Κατάλογος σχημάτων	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Επικοινωνίες C-V2X	21
2.1 Υποδομή ITS.....	23
2.2 Τρόποι επικοινωνίας και εφαρμογές C-V2X.....	24
2.3 Υπηρεσίες C-V2X.....	28
2.4 Επίδοση των C-V2X.....	30
2.5 C-V2X και δημόσια κινητά δίκτυα.....	33
2.5.1 RSU με σύνδεση κινητού δικτύου ως backhaul.....	33
2.5.2 RSU με κατανεμημένη 5G αρχιτεκτονική RAN.....	33
2.5.3 Απευθείας συνδεσιμότητα με όχημα μέσω 5G PLMN.....	35
2.5.4 MEC για υπηρεσίες C-V2X.....	36
2.6 Διαθέσιμο φάσμα για τις C-V2X επικοινωνίες.....	38
2.7 Υπηρεσίες εκτός φάσματος ITS.....	39
2.8 Θέματα ασφαλείας.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Δίκτυα 4G LTE-ADVANCED και 5G	43
3.1 Δίκτυα τεχνολογίας 4G.....	44
3.2 Δίκτυα τεχνολογίας 4G ADVANCED-LTE.....	45
3.2.1 Αρχιτεκτονική και δομικά στοιχεία LTE.....	45
3.3 Εισαγωγή στα δίκτυα 5G: απαιτήσεις και προτυποποίηση.....	47
3.3.1 Αρχιτεκτονική δικτύων 5G.....	49
3.3.2 5G Next Generation Radio Access Network.....	49
3.3.3 5G Core Network.....	50
3.3.4 Βασικές σχεδιαστικές ανάπτυξης δικτύων 5G.....	52
3.3.5 Απαιτήσεις σε στοιχειοκεραίες.....	53
3.3.6 Πυκνές κυψέλες (Network Densification).....	54
3.4 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές δικτύων 5G.....	55
3.4.1 Χαμηλή Καθυστέρηση.....	55
3.4.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας.....	56

3.4.3 Επίγνωση Γενικού Πλαισίου.....	56
3.4.4 Ιδιωτικότητα/Ασφάλεια	56
3.4.5 Επαυξημένη πραγματικότητα	57
3.4.6 Έξυπνη επιτάχυνση παροχής βίντεο	58
3.4.7 Διασυνδεδεμένα Έξυπνα Αυτοκίνητα	58
3.4.8 Internet of Things	59
3.6 Ανάγκη (απαίτηση) για Τεμαχισμό Δικτύου (Network Slicing)	60
3.7 Network Function Virtualization – NFV	62
3.8 Software Defined Network (SDN).....	64
3.8.1 Αρχιτεκτονική SDN	65
3.9 Σύγκριση δικτύων 4G και 5G.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Η εφαρμογή του MEC σε δίκτυα 5G για επικοινωνίες C-V2X....	69
4.1 Εισαγωγή στο MEC	69
4.2 Αρχιτεκτονική MEC	70
4.3 Πλεονεκτήματα MEC	75
4.4 Υπηρεσίες MEC.....	76
4.4.1 Πληροφορίες ραδιοδικτύου.....	76
4.4.2 Υπηρεσίες τοποθεσίας.....	77
4.4.3 Διαχείριση εύρους ζώνης.....	77
4.4.4 Υποστήριξη κινητικότητας.....	77
4.4.5 Ασφάλεια και ρυθμιστικά ζητήματα	78
4.5 Εφαρμογή του MEC στα δίκτυα 5G.....	80
4.5.1 Σενάρια ανάπτυξης MEC.....	82
4.5.2 Έκθεση δυνατοτήτων συστήματος.....	83
4.6 Εφαρμογή του MEC στις επικοινωνίες C-V2X.....	84
4.6.1 Οδική ασφάλεια.....	84
4.6.2 Διευκόλυνση	85
4.6.3 Εξελιγμένη υποβοηθούμενη οδήγηση	86
4.6.4 VRUs.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Μοντέλα συνεργασίας για την ανάπτυξη 5G δικτύων για CAM εφαρμογές	89
5.1 Συνεργατικό οικοσύστημα.....	90
5.2 Τρέχουσα έρευνα	92
5.3 Γενικές κατευθύνσεις	94
5.4 Προτεινόμενα μοντέλα συνεργασίας (cooperation models).....	95

5.4.1	Επένδυση από τους MNOs για πλήρες λειτουργικό δίκτυο 5G	95
5.4.2	Επένδυση από τους RO με παθητική υποδομή.....	96
5.4.3	Συνεπένδυση από τους RO και τους MNOs σε λειτουργικό κινητό δίκτυο μαζί με υποδομή RSU.....	98
5.5	Εμπορικές συνεργασίες	99
5.6	Συμπεράσματα	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Μηχανισμοί ανάπτυξης δικτύων από τους MNOs για διασυνδεδεμένα οχήματα.....		104
6.1	Απαιτήσεις σε δρόμους και υποδομές – προς τους “ψηφιακούς δρόμους”	105
6.2	Θεωρήσεις κόστους – οφέλους για την κυβελωτή κάλυψη των δρόμων	106
6.2.1	Βασικές κατηγορίες περιπτώσεων χρήσης.....	107
6.2.2	Αξία περιπτώσεων χρήσης V2N.....	108
6.3	Απαιτήσεις συνδεδεμένων οχημάτων	109
6.4	Επαναχρησιμοποίηση της υφιστάμενης δημόσιας υποδομής	111
6.5	Επιχειρηματικά μοντέλα για τους MNOs	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ανάπτυξη δικτύου 5G για C-V2X εφαρμογές με χρήση συσταδών MEC – Πλήρης τεχνικοοικονομική ανάλυση.....		116
7.1	Τεχνικοοικονομική μεθοδολογία – μαθηματικό πλαίσιο.....	117
7.1.1	Ταξινόμηση του κόστους	119
7.1.2	Μοντέλο κατανομής του κόστους	122
7.1.3	Επίδραση της τοποθέτησης των MEC	123
7.2	Μοντελοποίηση κόστους και σενάρια για την ανάπτυξη V2I.....	124
7.3	Μοντελοποίηση κόστους και σενάρια για την ανάπτυξη V2N.....	127
7.3.1	Μοντέλα εισόδων και παραδοχών	128
7.3.2	Προσομοίωση μοντέλου	129
7.4	Επίδραση της τοποθέτησης MEC στο κόστος και αποτελέσματα από την συσταδοποίηση MEC.....	131
7.4.1	Επίδραση των MEC στο κόστος.....	131
7.4.2	Μοντέλα συσταδοποίησης MEC.....	133
7.5	Αποτελέσματα του μοντέλου κατανομής.....	140
7.6	Συνολική αποτίμηση	143
7.7	Ανάλυση ευαισθησίας	150
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα		152
8.1	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	153
Βιβλιογραφία		156

Συντομογραφίες

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

5GAA: 5G Automotive Association 5GC

5GC: 5G Core

5GS: 5G System

ARPU: Average revenue per user

OBU: On Board Unit

CAPEX: Capital Expenditure

CCAM: Cooperative, Connected and Automated Mobility

CEF2: Connecting Europe Facility²

CN: Core Network

C-V2X: Cellular-Vehicle to Everything

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

KPI: Key Performance Indicator

LTE: Long Term Evolution

MEC: Multi-Access Edge Computing

MNO: Mobile Network Operator

NF: Network Function

NFV: Network Function Virtualization

NFVI: NFV Infrastructure

NFVO: NFV Orchestrator

NLOS: Non optical line of sight

NRF: Network Repository Function

OPEX: Operating Expenses

QoS: Quality of Service

PCF: Policy control Function

PLMN: Public Land Mobile Network

RO: Road Operator

RU: Radio Unit

RSU: Road Side Infrastructure

SBA: Service-based Architecture

SDA: Strategic Deployment Study

SDN: Software Defined Networking

SLA: Service Level Agreement

UDR: Unified Data Repository

UE: User Equipment

V2I: Vehicle to Infrastructure

V2N: Vehicle to Network

V2X: Vehicle to Everything

VRU: Vulnerable Road Use

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1 Συστήματα ITS	24
Σχήμα 2.2 Τρόποι επικοινωνίας σε συστήματα ITS	25
Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική ITS	26
Σχήμα 2.4 Συνδεσιμότητα μέσω 5G PLMN [10].....	36
Σχήμα 2.5 Ιεραρχική αρχιτεκτονική των MEC για υπηρεσίες C-V2X [10].....	38
Σχήμα 2.6 Εφαρμογή του cloud edge για υπηρεσίες C-V2X [10].....	38
Σχήμα 2.7 Ζώνες συχνοτήτων για το 5G στις c-V2X επικοινωνίες [12].....	39
Σχήμα 3.1 Σύνδεση στο E-UTRAN	47
Σχήμα 3.2 Αρχιτεκτονική του EPC	47
Σχήμα 3.3 Σύνδεση στο 5G NG RAN	51
Σχήμα 3.4 Αρχιτεκτονική του 5G Core.....	52
Σχήμα 3.5 Ανάπτυξη δικτύων 4G και 5G	53
Σχήμα 3.6 MEC στην επαυξημένη πραγματικότητα	59
Σχήμα 3.7 MEC σε διασυνδεδεμένα οχήματα	60
Σχήμα 3.8 MEC σε IoT εφαρμογές.....	61
Σχήμα 3.9 Τεμαχισμός δικτύου (network slicing).....	62
Σχήμα 3.10 Σύγκριση δικτύων 4G και 5G	68
Σχήμα 4.1 Συστήματα MEC.....	72
Σχήμα 4.2 Πλαίσιο MEC	73
Σχήμα 4.3 Αρχιτεκτονική MEC στο Μοντέλο Αναφοράς	74
Σχήμα 4.4 Ενσωμάτωση MEC σε δίκτυο 5G.....	82
Σχήμα 4.5 Σενάρια ανάπτυξης MEC.....	83
Σχήμα 4.6 Έκθεση δυνατοτήτων του 5G στο σύστημα MEC.....	85
Σχήμα 4.7 Χρήση see through.....	88
Σχήμα 4.8 VRU	88
Σχήμα 6.1 Πλατφόρμα C-V2X της εταιρίας Ericsson [28].....	110
Σχήμα 6.2 Ανάπτυξη δικτύου με χρήση του τεμαχισμού δικτύου	115
Σχήμα 6.3 Διαφορετικά επίπεδα του υπολογισμού στο άκρο	115
Σχήμα 7.1 Μοντέλο τεχνοοικονομικής ανάλυσης	119
Σχήμα 7.2 Ταξινόμηση συνιστωσών κόστους (CAPEX, OPEX).....	121
Σχήμα 7.3 Μοντέλο κατανομής του κόστους	123
Σχήμα 7.4 Κόστη για τοποθέτηση μονάδων MEC	125
Σχήμα 7.5 Συσσωρευτικό ΣΚΙ για τα τρία σενάρια ανάπτυξης για το πράσινο πεδίο ..	127
Σχήμα 7.6 Συσσωρευτικό ΣΚΙ για τα τρία σενάρια ανάπτυξης για το προ- εγκαταστημένο πεδίο	128
Σχήμα 7.7 Τοποθέτηση MEC. Κοντά στον πύργο (πάνω), κοντά στο DC (κάτω)	129
Σχήμα 7.8 Συσσωρευτικό ΣΚΙ για τα δύο βασικά σενάρια V2N	131
Σχήμα 7.9 Σύγκριση CAPEX και OPEX για τα δύο βασικά σενάρια V2N	131
Σχήμα 7.10 Σύγκριση Συσσωρευτικού ΣΚΙ για το πυκνό σενάριο V2N.....	131
Σχήμα 7.11 Τοπολογία αναφοράς για το κινητό δίκτυο.....	133
Σχήμα 7.12 Τοπολογία αστέρα.....	134
Σχήμα 7.13 Επιλογές για την τοπολογία αστέρα	136
Σχήμα 7.14 Τοπολογία διαδρόμου.....	137

Σχήμα 7.15 Δίκτυο ίνας με δακτύλιο	138
Σχήμα 7.16 Συσωρευτικό ΣΚΙ σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων MEC για το βέλτιστο σενάριο	141
Σχήμα 7.17 Συσωρευτικό ΣΚΙ σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων MEC για το χειρότερο σενάριο.....	141
Σχήμα 7.18 Συσωρευτικό ΣΚΙ/km σε σχέση με το συσωρευτικό έσοδο/km για χαμηλό βαθμό διείσδυσης	146
Σχήμα 7.19 Συσωρευτικό ΣΚΙ/km σε σχέση με το συσωρευτικό έσοδο/km για μέσο βαθμό διείσδυσης	147
Σχήμα 7.20 Συσωρευτικό ΣΚΙ/km σε σχέση με το συσωρευτικό έσοδο/km για υψηλό βαθμό διείσδυσης	148
Σχήμα 7.21 Συσωρευτικά έσοδα/km σε συνάρτηση του περιθωρίου κέρδους	149
Σχήμα 7.22 ARPU για τους τρεις βαθμούς διείσδυσης	149
Σχήμα 7.23 Επίδραση του ρυθμού πληθωρισμού στο συσωρευτικό ΣΚΙ	151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή

Στις τηλεπικοινωνίες, το δίκτυο πέμπτης γενιάς **5G** αποτελεί το πρότυπο τεχνολογίας για ευρυζωνικά κυψελοειδή δίκτυα τα οποία οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας άρχισαν να αναπτύσσουν παγκοσμίως το 2019 και είναι ο διάδοχος των δικτύων 4G τα οποία παρέχουν συνδεσιμότητα στα περισσότερα τρέχοντα κινητά τηλέφωνα. Όπως και οι προκάτοχοί του, τα δίκτυα 5G είναι κυψελοειδή δίκτυα, στα οποία η περιοχή εξυπηρέτησης χωρίζεται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κελιά. Όλες οι ασύρματες συσκευές 5G σε ένα κελί συνδέονται στο Διαδίκτυο και το τηλεφωνικό δίκτυο μέσω ραδιοκυμάτων μέσω μιας τοπικής κεραίας στο κελί. Το κύριο πλεονέκτημα των νέων δικτύων είναι ότι θα έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, δίνοντας υψηλότερες ταχύτητες λήψης, τελικά έως και 10 Gigabits ανά δευτερόλεπτο. Λόγω του αυξημένου εύρους ζώνης, αναμένεται ότι τα δίκτυα δεν θα εξυπηρετούν αποκλειστικά κινητά τηλέφωνα όπως τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αλλά θα χρησιμοποιηθούν επίσης ως γενικοί πάροχοι υπηρεσιών Διαδικτύου για φορητούς υπολογιστές και επιτραπέζιους υπολογιστές, ανταγωνιζόμενοι υπάρχοντες ISP όπως το καλωδιακό internet και επίσης θα καταστήσουν δυνατές νέες εφαρμογές στο διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), μηχανημάτων σε μηχανές καθώς και των επικοινωνιών μεταξύ των οχημάτων (**Cellular – Vehicular to Everything/ C-V2X**) και με το δίκτυο 5G.

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε μια από τις προηγούμενες εφαρμογές και πιο συγκεκριμένα στην εφαρμογή της τεχνολογίας και των δικτύων 5G στις επικοινωνίες C-V2X με έμφαση στην τεχνολογία MEC (Mobile Edge Computing) και στις υπηρεσίες CAM (Connected and Automated Mobility). Το C-V2X αποτελεί μια ενοποιημένη πλατφόρμα συνδεσιμότητας που έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (low latency) σε επικοινωνίες οχήματος προς οχήματος (V2V), υποδομής προς όχημα (V2I) και οχήματος προς πεζό (V2P). Συνδέοντας μεμονωμένα οχήματα και επιτρέποντας την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων μεταφοράς (ITS) τα οποία μειώνουν τη συμφόρηση, η πλατφόρμα έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίσει τις πληροφορίες υπηρεσιών και ασφάλειας σε αυτοκινητοδρόμους και πόλεις. Είναι η κύρια πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για Διασυνδεδεμένη και Αυτοματοποιημένη Κινητικότητα (Connected and Automated Mobility). Το C-V2X χρησιμοποιεί δύο συμπληρωματικούς τρόπους μετάδοσης. Ο πρώτος είναι η άμεση επικοινωνία μεταξύ οχημάτων, μεταξύ οχημάτων και υποδομών, και μεταξύ οχημάτων και άλλων χρηστών του δρόμου, όπως ποδηλάτες και πεζοί. Σε αυτή τη λειτουργία, το C-V2X λειτουργεί ανεξάρτητα από τα κυψελοειδή δίκτυα. Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τις δικτυακές επικοινωνίες, στις οποίες το C-V2X χρησιμοποιεί το συμβατικό κινητό δίκτυο για να επιτρέψει σε ένα όχημα να λαμβάνει πληροφορίες σχετικές με τις οδικές συνθήκες, την κυκλοφορία στην περιοχή

και άλλες λειτουργίες. Η πλατφόρμα συνδυάζει ασφαλή συνδεσιμότητα ευρείας κλίμακας σε μια μονάδα και επιτρέπει στους οδηγούς να επωφεληθούν από υπηρεσίες όπως e-call, συνδεδεμένη ψυχαγωγία και εκτεταμένα χαρακτηριστικά ασφάλειας. Ιδιαίτερα στο χώρο των τεχνολογιών C-V2X και της διασύνδεσης με τα δίκτυα 5G, υπάρχει η επιπλέον απαίτηση οι συσκευές που πραγματοποιούν τη σύνδεση με τα στοιχεία του δικτύου 5G, να έχουν ενσωματωμένη και την απαιτούμενη τεχνολογία. Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών πρέπει να καλύπτουν την ανάγκη μετακίνησης από μια χώρα σε μια άλλη, απαιτείται συνεννόηση και συμφωνία μεταξύ των παρόχων κινητών δικτύων (Mobile Network Operators- MNO). Ακόμη, η χρήση της υπάρχουσας κυψελοειδούς υποδομής μειώνει την ποσότητα της οδικής υποδομής που απαιτείται να εγκατασταθεί και να συντηρηθεί. Το C-V2X στοχεύει στην αξιοποίηση της ολοκληρωμένης κάλυψης καθιερωμένων δικτύων LTE, των αναδυόμενων (σημερινών) 5G για να επιτρέψει αξιόπιστη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο σε υψηλές ταχύτητες και σε κυκλοφορία υψηλής πυκνότητας. Καθίσταται σαφές ότι μια πλήρη μελέτη συνδεσιμότητας 5G και C-V2X απαιτεί και περιλαμβάνει τόσο τεχνική ανάλυση όσο και διευρυμένη τεχνοοικονομική, δεδομένης και της βούλησης της ΕΕ για πλήρη ψηφιακή διασύνδεση της Ευρώπης μέσω του προγράμματος CEF2 (Connecting Europe Facility 2 Digital), με χρονικό ορίζοντα 2021 – 2025 και 2030 ως μεταγενέστερα.

Σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιάσει τις τελευταίες εξελίξεις όσον αφορά την εφαρμογή της τεχνολογίας και των επιχειρηματικών πρακτικών για δίκτυα 5G σε τεχνολογίες C-V2X (Cellular-Vehicle to Everything) με εστίαση στις τεχνολογικές και τεχνοοικονομικές προκλήσεις για εγκαθίδρυση και λειτουργία του συνδυασμένου συστήματος 5G / C-V2X στην Ευρώπη.

Η εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια.

Στο **κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στις τεχνολογίες C-V2X. Το κεφάλαιο 2 εστιάζει στις επικοινωνίες οχημάτων τόσο μεταξύ τους (V2V) όσο και με τα υπάρχοντα δομικά στοιχεία του δικτύου 5G (V2I, V2N, C-V2X). Παρουσιάζεται η υπάρχουσα κατάσταση όσον αφορά την τεχνολογία που είναι διαθέσιμη εμπορικά, καθώς και τα προβλήματα που έχουν ανακύψει από την αναβάθμιση των υπαρχόντων On Board Units (OBU) -τα οποία εξυπηρετούν 4G ADVANCED-LTE εφαρμογές- για εφαρμογή των δικτύων 5G σε αυτοκινητοδρόμους στην Ευρώπη. Αναφέρονται επίσης τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι MNO στις περιοχές όπου υπάρχει μετακίνηση αυτοκινήτων και ανάγκη αλλαγής δικτύου από μια χώρα σε μια άλλη.

Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται μια εισαγωγή στα δίκτυα 4G Advanced-LTE (τα οποία αποτελούν την υπάρχουσα υποδομή εγκατεστημένη σε όλο τον κόσμο) και στα δίκτυα 5G (έμφαση σε αυτή τη γενιά), η εγκαθίδρυση των οποίων έχει ξεκινήσει και σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες C-V2X.

Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφεται η τεχνική Multi-Access Edge Computing (MEC) η οποία αναπτύχθηκε με στόχο να έχει βρει ευρεία εφαρμογή ιδιαίτερα στα δίκτυα 5G με κύριο στόχο την επίτευξη χαμηλής καθυστέρησης και

αποδοτικής εκμετάλλευσης των παραγόμενων δεδομένων στο σημείο στο οποίο παράγονται. Βασίζεται στην τεχνολογία cloud computing και λειτουργεί συμπληρωματικά σε αυτήν.

Στο **κεφάλαιο 5** αναπτύσσονται τα μοντέλα συνεργασίας για την ανάπτυξη και χρήση υποδομών 5G σε εφαρμογές CAM στην Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται το συνεργατικό οικοσύστημα, δίδονται κάποιες γενικές οδηγίες ενώ αναλύονται υποψήφια συνεργατικά μοντέλα για επένδυση είτε μόνο από τους MNOs (για ανάπτυξη πλήρων ενεργών δικτύων 5G), είτε μόνο από τους ROs (Road Operators) (για παθητικές υποδομές) είτε για συνεπένδυση από MNOs και ROs (σε υποδομή που περιλαμβάνει δίκτυο 5G και υποδομή για RSU).

Το **κεφάλαιο 6** περιγράφει τους μηχανισμούς ανάπτυξης των κινητών δικτύων από τους MNOs ώστε να καλυφθούν οι αυξημένες απαιτήσεις για διασυνδεδεμένα δίκτυα. Αναλύονται οι απαιτήσεις αυτές τόσο για αστικές όσο και για περιφερειακές περιοχές ενώ επίσης συζητείται ποιο μέρος (και πώς) της υπάρχουσας υποδομής μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να μειωθεί το κόστος ανάπτυξης.

Έχοντας χτίσει αρθρωτά το οικοδόμημα της ανάπτυξης δικτύων 5G για επικοινωνίες C-V2X και λαμβάνοντας υπόψη τις (ρεαλιστικές) συνθήκες όπως παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 2-6, στο **κεφάλαιο 7** πραγματοποιείται μια πλήρης τεχνοοικονομική μελέτη ανάπτυξης δικτύου 5G για επικοινωνίες οχημάτων και αυξημένων υπηρεσιών η οποία περιλαμβάνει τόσο υπολογισμό του γενικού κόστους ανάπτυξης όσο και περαιτέρω ανάλυση και υπολογισμό για διαφορετικές αρχιτεκτονικές συσταδοποίησης πλατφορμών MEC (MEC clustering). Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι επηρεάζει και τη λειτουργία και την ανάπτυξη των υποδομών από την πλευρά των παροχών των δικτύων. Αυτό γίνεται πιο σημαντικό όταν εξετάζονται C-V2X επικοινωνίες στα σύνορα των κρατών (cross-border communications) διότι πρέπει να εξασφαλίζεται αξιόπιστη μεταβίβαση (handover) και χαμηλή καθυστέρηση όταν ένας χρήστης μεταβαίνει από μια χώρα σε μια άλλη, οπότε αλλάζει και ο πάροχος (MNO).

Τέλος στο **κεφάλαιο 8**, το οποίο είναι και το τελευταίο της εργασίας, συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αυτά μπορούν να ληφθούν υπόψη τόσο για την ανάπτυξη (deployment) στον Ευρωπαϊκό χώρο (μέσω του προγράμματος CEF2) όσο και στον Ελλαδικό χώρο (μέσω του προγράμματος Διάδρομοι 5G που μόλις ανακοινώθηκε).

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Επικοινωνίες C-V2X

Το Cellular-Vehicle-to-Everything (C-V2X) βρίσκεται στην πρώτη γραμμή του ψηφιακού μετασχηματισμού του φάσματος λειτουργίας και των συσκευών που διατίθενται από μέλη της 5G Automotive Association (5GAA), και εμπορικές εφαρμογές που ανακοινώνονται τόσο από τους κατασκευαστές OEMs όσο και από τους χειριστές δρόμων (Road Operators). Αυτή η δυναμική υπάρχει επίσης και σε άλλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της Ασίας και της Αμερικής. Καθώς το C-V2X και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας εισέρχονται στην εποχή του 5G, θα υποστηρίζονται νέες υπηρεσίες με νέους τρόπους επικοινωνίας και νέες διαθέσιμες επιχειρηματικές ευκαιρίες.

Η 5GAA προσδιόρισε μια νέα λίστα υπηρεσιών ως παραδείγματα που απεικονίζουν τις ανάγκες των απαιτήσεων επικοινωνίας και τις υποδομές των ευφυών συστημάτων μεταφοράς (ITS) υποδομές. Το όχημα προς την υποδομή (V2I), το οποίο μπορεί να προσφέρει άμεσα οφέλη ανεξάρτητα από το ποσοστό διείσδυσης των C-V2X, είναι κατάλληλο για αυτές τις νέες υπηρεσίες. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να αντιληφθούμε τις υπηρεσίες V2I μαζί με νέες προσεγγίσεις για την ανάπτυξη οδικών μονάδων (RSU), συμπεριλαμβανομένων των κινητών RSU, κατανεμημένων RSU και εικονικών RSU. Επίσης, προτείνεται η συνδυασμένη χρήση του Edge Computing μαζί με τη δυνατότητα PC5 για πραγματοποίηση της επικοινωνίας από συσκευή σε συσκευή σε υπηρεσίες V2I. Η λειτουργία Vehicle-to-Network (V2N) χρησιμοποιεί το κινητό 5G δίκτυο ως συμπληρωματικό εργαλείο για να βοηθήσει το V2I με την παροχή ορισμένων υπηρεσιών από άκρο σε άκρο και παρέχει μια εναλλακτική λύση για υπηρεσίες χωρίς κρίσιμη καθυστέρηση στο V2I.

Πρέπει να διατεθεί περισσότερο φάσμα στις ζώνες ITS για να υποστηρίξει προηγμένο σύνολο υπηρεσιών. Η ανάλυση, βασισμένη στην ανασκόπηση των ανωτέρω υπηρεσιών, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι πρέπει να διατεθεί 40 MHz περισσότερο φάσμα στις ζώνες ITS με καλύτερη προστασία στις μη δανειοδοτούμενες εκτός ζώνης εκπομπές (OOBE).

Πρόσθετες εκτιμήσεις ανάπτυξης (deployment) αποκάλυψαν ότι νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για κατασκευαστές OEM αυτοκινήτων και φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας παρέχουν ακόμη περισσότερες δυνατότητες για συσκευές και βασική συνδεσιμότητα. Τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα περιλαμβάνουν βελτίωση των κοινωνικών επιπτώσεων, προσφέροντας αποκλειστικές υπηρεσίες δικτύου και ανοιχτών πλατφορμών που επιτρέπουν ενσωματώσεις τρίτων υπηρεσιών.

Η ασφάλεια αποτελεί μια άλλη σημαντική πτυχή ανάπτυξης που περιλαμβάνεται σε αυτό το πλαίσιο. Το σωστό πλαίσιο διαχείρισης πιστοποιητικών, η ανίχνευση κακής συμπεριφοράς το σύστημα αναφοράς προσδιορίζονται ως τα πιο σημαντικά συστατικά (στοιχείο) για τη διασφάλιση της επιτυχούς ανάπτυξης συστημάτων ITS.

Επιπλέον, εξετάζονται οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις στο C-V2X σε 3GPP. Αυτές οι νέες εξελίξεις παρέχουν στους OEMs, σε φορείς κινητής τηλεφωνίας, και προγραμματιστές εφαρμογών τρίτων ολοκληρωμένη κατανόηση των απαιτήσεων και εκτιμήσεων για την ανάπτυξη υπηρεσιών έξυπνων μεταφορών που χρησιμοποιούν τη τεχνολογία 5G C-V2X.

Τα οδικά ατυχήματα αποτελούν ένα μείζον πρόβλημα για τις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς είναι η αιτία για περισσότερους από 20000 θανάτους ετησίως, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης μόνο [1]. Ενώ στις αρχές του 21ου αιώνα το ποσοστό θνησιμότητας μειωνόταν σταδιακά, έχει παραμείνει σχεδόν στάσιμο κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας. Επομένως, τα μέτρα που έχουν ληφθεί για τη βελτίωση της ασφάλειας των οδηγών και των επιβατών δεν είναι επαρκή για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί για μείωση των ατυχημάτων κατά το ήμισυ από το 2011 έως το 2020 [2]. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αποφευχθούν τα ατυχήματα, τα ίδια τα οχήματα πρέπει να διαθέτουν επίγνωση της κατάστασης που επικρατεί γύρω τους και να είναι σε θέση να ενημερώσουν έγκαιρα τους οδηγούς για επικείμενους κινδύνους. Για να είναι αυτό εφικτό, επιβάλλεται τα οχήματα να ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους. Οι επικοινωνίες στις οποίες συμμετέχουν οχήματα χαρακτηρίζονται ως «επικοινωνίες οχήματος προς οτιδήποτε» (Vehicle to Everything – V2X), ενώ τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που περιλαμβάνουν οχήματα είναι γνωστά ως «ευφυή συστήματα μεταφορών» (Intelligent Transport System – ITS). Οι επικοινωνίες V2X, όμως, δεν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας. Τα δεδομένα που ανταλλάσσουν τα οχήματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της εμπειρίας των οδηγών, παρέχοντάς τους επιπλέον πληροφορίες για την κατάσταση της κυκλοφορίας ή για την ύπαρξη σημείων ενδιαφέροντος. Για την πραγματοποίηση των εφαρμογών V2X, απαιτείται η συνεργασία των τηλεπικοινωνιακών παρόχων με επιχειρήσεις άλλων τομέων, όπως κατασκευαστές αυτοκινήτων ή ειδικού εξοπλισμού. Επιπλέον, οι επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων μπορούν να αποτελέσουν ένα ενδιάμεσο στάδιο προς την ενεργοποίηση της βιομηχανίας των αυτοοδηγούμενων οχημάτων, η οποία θέτει πρωτοφανείς προκλήσεις προς όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς

2.1 Υποδομή ITS

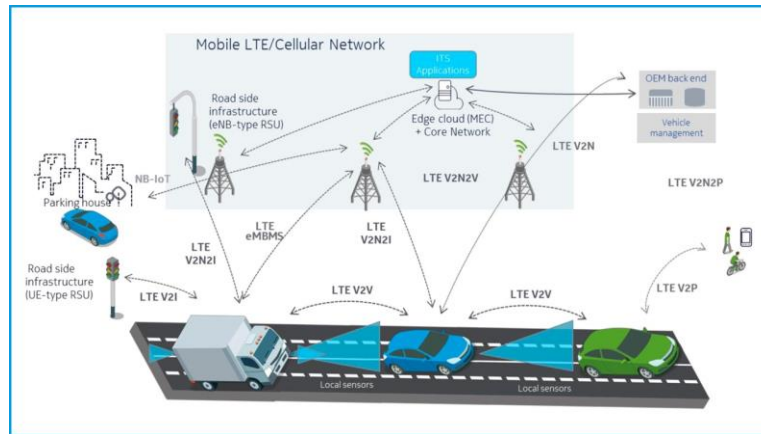
Στη γενική του μορφή, ένα ITS περιλαμβάνει μία δικτυακή υποδομή και τα οχήματα, τα οποία αποτελούν τους χρήστες της υπηρεσίας. Σε ένα ITS, κάθε όχημα είναι εξοπλισμένο με ένα OBU (On Board Unit), δηλαδή μία συσκευή που παρέχει σε αυτό δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα οχήματα, καθώς και με τη δικτυακή υποδομή. Ο κύριος ρόλος της αποστολής μηνυμάτων στα γειτονικά οχήματα είναι η ενημέρωση των οδηγών αυτών για την κυκλοφοριακή κατάσταση, με απώτερο σκοπό την αποφυγή ατυχημάτων και τη διευκόλυνση της διαδικασίας οδήγησης. Τα οχήματα μπορούν να επικοινωνούν και με τη δικτυακή υποδομή για την αποστολή δεδομένων κυκλοφορίας σε αυτήν και τη λήψη υπηρεσιών. Ο εξοπλισμός των οχημάτων περιλαμβάνει και άλλες μονάδες, οι οποίες συμβάλλουν στην αποτελεσματική διαδικασία της επικοινωνίας. Τα ECUs (Electronic Control Units) είναι υπεύθυνα για τη συλλογή και αποθήκευση δεδομένων του ίδιου του οχήματος (μέγεθος, θέση, ταχύτητα κλπ.) και του περιβάλλοντος αυτού (πλήθος γειτονικών οχημάτων και κατάσταση του δρόμου) σε συνεργασία και με τους διάφορους αισθητήρες που διαθέτει το όχημα. Το AU (Application Unit) είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση εφαρμογών από άκρη σε άκρη είτε μεταξύ γειτονικών οχημάτων είτε μεταξύ ενός οχήματος και κάποιου παρόχου υπηρεσιών, ο οποίος έχει πρόσβαση στη δικτυακή υποδομή του ITS. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια της επικοινωνίας, το όχημα πρέπει να διαθέτει μία μονάδα που εκτελεί λειτουργίες επιβεβαίωσης χρηστών και παρόχων, η οποία καλείται TPM (Trusted Platform Module). Τέλος, τα οχήματα κάνουν χρήση ενός παγκοσμίου συστήματος πλοήγησης μέσω δορυφόρου (Global Navigation Satellite System – GNSS), για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης αυτών.



Σχήμα 2.1 Συστήματα ITS

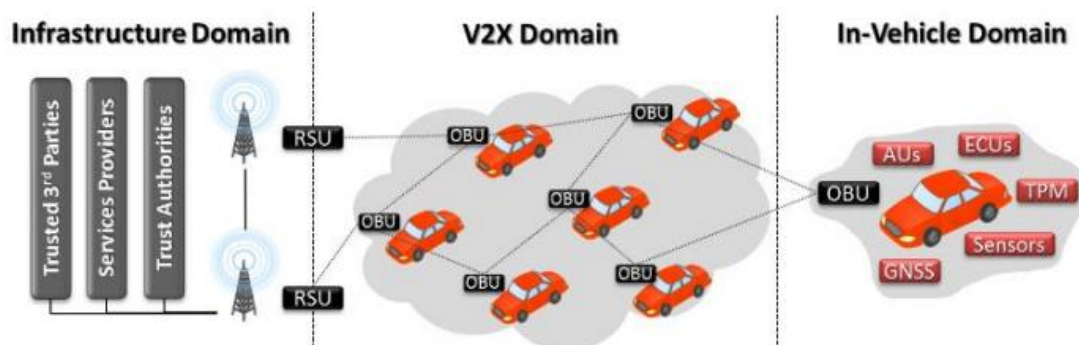
2.2 Τρόποι επικοινωνίας και εφαρμογές C-V2X

Στο Σχήμα 2.2, απεικονίζονται οι δυνατοί τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των οντοτήτων του συστήματος ITS και στο Σχήμα 2.3 η αρχιτεκτονική συστημάτων ITS. Οι επικοινωνίες V2X διαίρούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:



Σχήμα 2.2 Τρόποι επικοινωνίας σε συστήματα ITS

(<https://www.telecomtv.com/content/automotive/ngmn-alliance-selects-c-v2x-technology-for-the-connected-car-31854/>)



Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική ITS

- Επικοινωνία οχήματος με όχημα (Vehicle to Vehicle – **V2V**): Σε αυτήν την περίπτωση, δύο ή περισσότερα οχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους, χωρίς τη μεσολάβηση κάποιας άλλης οντότητας (πχ. RSU). Ο τρόπος αυτός προτιμάται για εφαρμογές οδικής ασφάλειας, όπως την ειδοποίηση του οδηγού για τα γειτονικά οχήματα με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων, προειδοποίηση για προσπέραση ή αλλαγή λωρίδας κλπ.
- Επικοινωνία οχήματος με υποδομή (Vehicle to Infrastructure – **V2I**): Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων είναι εφικτή μόνο με τη μεσολάβηση των RSUs. Ο τρόπος επικοινωνίας V2I μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές ασφάλειας, όπως ευρεεκτομπή ενός μηνύματος έκτακτης

ανάγκης, όσο και για τη βελτίωση της κυκλοφορίας. Η τελευταία επιτυγχάνεται με τη συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας από τα RSUs και την ενημέρωση ενός απομακρυσμένου εξυπηρετητή. Στην περίπτωση όπου τα RSUs ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλες δικτυακές μονάδες, πρόκειται για επικοινωνία οχήματος με δίκτυο (Vehicle to Network – **V2N**).

- Επικοινωνία οχήματος με πεζό (Vehicle to Pedestrian – **V2P**): Οι πεζοί και οι ποδηλάτες εμφανίζονται στη βιβλιογραφία ως ευάλωτοι χρήστες (Vulnerable Road Users – VRUs). Οι εφαρμογές αυτού του τύπου αποσκοπούν στην προστασία των VRUs από τα οχήματα. Ένα όχημα μπορεί να πληροφορηθεί για τη θέση ενός VRU είτε με απευθείας επικοινωνία του OBU του οχήματος και της συσκευής που διαθέτει ο VRU είτε με την παρεμβολή ενός RSU. Ο δεύτερος τρόπος επικοινωνίας είναι πιο εφικτός στην περίπτωση που οι πεζοί είναι ήδη χρήστες κάποιας άλλης δικτυακής υπηρεσίας.

Οι πιο άμεσες V2X εφαρμογές προέρχονται από τη χρήση V2I οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν μόλις ένα C-V2X εξοπλισμένο όχημα μπορεί να αλληλεπιδρά με την υποδομή του δρόμου. Η υποδομή ITS με υποστήριξη V2I μπορεί να υποστηρίξει τη χρήση περιπτώσεων που ωφελούν τους παραγωγούς, όπως

- Προκατάληψη σήματος κυκλοφορίας
- Προτεραιότητα διέλευσης
- Προειδοποίηση παραβίασης κόκκινου φωτός
- Φάση και χρονισμός σήματος (SPaT)/Πληροφορίες χάρτη
- Προειδοποίηση Ζώνης Εργασίας, προειδοποίηση σχολικής ζώνης
- Προειδοποίηση ορίου ταχύτητας: Προειδοποίηση ζώνης μειωμένης ταχύτητας, προειδοποίηση καμπύλης ταχύτητας
- Πληροφορίες για τον καιρό
- Προειδοποίηση παραβίασης πινακίδας διακοπής
- Παράβαση Διασταυρώσεων Σιδηροδρόμων
- Προειδοποίηση υπερμεγέθους οχήματος

Το V2I που διαθέτει C-V2X είναι έτοιμο για ανάπτυξη. Ειδικότερα:

- Οι μονάδες δρόμου C-V2X (RSU) ήδη διατίθενται στο εμπόριο.
- Το NEMA TS 10, το οποίο είναι ένα πρότυπο RSU, είναι επίσης κοντά σε ολοκλήρωση και εφαρμογή. Αυτό το πρότυπο θα επιτρέψει την ανάπτυξη οδικών φορέων με ομοίομορφη απόδοση C-V2X RSUs.

Οι περιπτώσεις χρήσης (use cases), στις οποίες εφαρμόζονται οι επικοινωνίες οχημάτων, διαιρούνται σύμφωνα με τον ETSI [6] στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ασφάλεια – Υποβοηθούμενη οδήγηση (Security – Assisted Driving): Αποσκοπούν στην αποφυγή οδικών ατυχημάτων με έγκαιρη

ενημέρωση των οδηγών για την κυκλοφοριακή και οδική κατάσταση μέσω μηνυμάτων που αποστέλλονται από γειτονικά οχήματα ή από κάποιο RSU. Επίσης, παρέχουν στους οδηγούς χρήσιμες πληροφορίες, προκειμένου να διευκολύνουν τη διαδικασία οδήγησης. Σε αυτήν την κατηγορία, περιλαμβάνονται και όσες περιπτώσεις χρήσης σχετίζονται με την προστασία των πεζών.

- Κυκλοφοριακή αποτελεσματικότητα (Traffic Efficiency): Στόχος αυτής της κατηγορίας είναι η διαχείριση της κυκλοφοριακής κίνησης. Κατά κύριο λόγο, ένας εξυπηρετητής συλλέγει δεδομένα είτε από τα ίδια τα οχήματα είτε από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι επί του οδοστρώματος, οι οποίοι διαθέτουν πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα των οχημάτων. Αφού τα επεξεργαστεί, ο εξυπηρετητής ενημερώνει τους οδηγούς για την κυκλοφοριακή κατάσταση που επικρατεί εντός μίας περιοχής, με χρήση, για παράδειγμα, γραπτού κειμένου ή χαρτών υψηλής ανάλυσης.
- Άλλες εφαρμογές: Περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις χρήσης που δεν σχετίζονται άμεσα με τη βελτίωση της κυκλοφοριακής κατάστασης. Στόχος τους είναι η ενίσχυση της εμπειρίας του οδηγού, μέσω ενημερώσεων για σημεία ενδιαφέροντος και χώρους στάθμευσης ή κατανάλωση υπηρεσιών πολυμέσων. Τα τελευταία χρόνια, έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον για νέες κατηγορίες εφαρμογών, με εξαιρετικά υψηλότερες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις από όσες περιπτώσεις έχουν εξεταστεί έως τώρα. Αυτές περιλαμβάνουν τα τηλεχειριζόμενα (tele-operated) και αυτοοδηγούμενα (self-driving) αυτοκίνητα.
- Εφαρμογές οδικής ασφάλειας: Για την προειδοποίηση των οδηγών για επερχόμενους κινδύνους, έχουν οριστεί δύο τύποι μηνυμάτων. Τα πρώτα μηνύματα, επονομαζόμενα CAMs (Cooperative Awareness Messages) [8], εκπέμπονται περιοδικά από ένα όχημα προς τα γειτονικά του. Τυπικές πληροφορίες που ενδεχομένως περιλαμβάνονται σε ένα CAM είναι η θέση, η ταχύτητα και το μέγεθος του οχήματος-αποστολέα. Η μετάδοση μπορεί να γίνει είτε απευθείας μεταξύ των οχημάτων είτε μέσω της δικτυακής υποδομής. Τα μηνύματα τύπου DENM (Decentralized Environmental Notification Messages) [9] παράγονται από μία οντότητα του ITS κατόπιν κάποιου γεγονότος, όπως ατύχημα ή ανίχνευση οδικού κινδύνου. Ο σκοπός τους είναι να ενημερώσουν έγκαιρα τα οχήματα εντός μιας συγκεκριμένης περιοχής για το είδος, την τοποθεσία και τη χρονική στιγμή ανίχνευσης του συμβάντος. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με την οδική ασφάλεια καθώς και οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις για αυτές. Εκτός από τις απαιτήσεις

καθεμιάς περίπτωσης, οι μεταδόσεις μηνυμάτων ασφαλείας έχουν ανάγκη από όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοπιστία (>99%).

- Εφαρμογές διαχείρισης/αποδοτικότητας κυκλοφορίας: Η πλειονότητα των περιπτώσεων διαχείρισης κυκλοφορίας βασίζεται στην εκπομπή μηνυμάτων I2V (Infrastructure to Vehicle). Τα RSUs συλλέγουν τα περιοδικά μηνύματα που εκπέμπουν τα οχήματα και τα προωθούν σε κάποιο απομακρυσμένο κέντρο δεδομένων (data center), αφού ενδεχομένως τα φιλτράρουν. Ο εξυπηρετητής της εφαρμογής επεξεργάζεται τα δεδομένα των οχημάτων μαζί με όσα λαμβάνει από διάφορους αισθητήρες και εκπέμπει χρήσιμες πληροφορίες προς τα οχήματα που βρίσκονται εντός μίας γεωγραφικής περιοχής. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, οι περιπτώσεις χρήσης αυτού του τύπου θέτουν χαλαρότερες απαιτήσεις καθυστέρησης, συγκριτικά με τις εφαρμογές της προηγούμενης παραγράφου. Όσο ταχύτερα μεταφέρονται, όμως, τα δεδομένα στον κεντρικό εξυπηρετητή, τόσο περισσότερο επίκαιρες θα είναι οι κυκλοφοριακές πληροφορίες που αυτός θα παράγει. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για επαρκή περιοχή κάλυψης της υπηρεσίας από τα RSUs για την ενημέρωση των υπόλοιπων οχημάτων και για γεγονότα όπως απότομο φρενάρισμα, σύγκρουση ή άλλου κινδύνου επί του οδοστρώματος. Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 10Hz Μέγιστη καθυστέρηση: 50-100ms Ακρίβεια θέσης οχημάτων.

Πίνακας 2.1. Περιπτώσεις χρήσης και τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις

Περίπτωση χρήσης	Περιγραφή	Απαιτήσεις
Μηνύματα έκτακτης ανάγκης	Αποστολή DENMs για την ενημέρωση των υπόλοιπων οχημάτων για γεγονότα όπως απότομο φρενάρισμα, σύγκρουση ή άλλου κινδύνου επί του οδοστρώματος.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 50-100ms
		Ακρίβεια θέσης οχημάτων: <1m
Οχήματα έκτακτης ανάγκης	Οι οδηγοί πληροφορούνται για την ύπαρξη οχήματος έκτακτης ανάγκης, από τα CAMs που αυτό εκπέμπει.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs από το όχημα έκτακτης ανάγκης: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
Προειδοποίηση για ύπαρξη VRUs	Οι οδηγοί των οχημάτων αποκτούν επίγνωση για την ύπαρξη πεζών.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs από τους VRUs: 1Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
Υποβοηθούμενη αλλαγή λωρίδας	Ο οδηγός διευκολύνεται κατά την αλλαγή λωρίδας από μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ γειτονικών οχημάτων.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
		Ακρίβεια σχετικής θέσης οχημάτων: 2m
See-Through	Ένα φορητό παρέχει βίντεο πραγματικού χρόνου για την κατάσταση του δρόμου στους οδηγούς με περιορισμένο οπτικό πεδίο.	Απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης: 10 Mbps
		Μέγιστη καθυστέρηση: 50ms

2.3 Υπηρεσίες C-V2X

Το C-V2X έχει σχεδιαστεί για να είναι συμβατό με το υπάρχον πλαίσιο V2X για υποστήριξη όλων των υπάρχουσών εφαρμογών V2X που ορίζονται από τις ομάδες προτύπων εφαρμογών (Society of Μηχανικοί Αυτοκινήτων [SAE]). Η στοίβα C-V2X που ορίζεται από την 3GPP επιτρέπει διαφάνεια στην παράδοση διαφόρων μορφών μηνυμάτων όπως αυτές που ορίζονται από το IEEE 1609.3. Αυτό επιτρέπει την εύκολη μεταφορά υφιστάμενων εφαρμογών V2X σε πλατφόρμα C-V2X. Από την άλλη πλευρά, το C-V2X-ειδικά το C-V2X που βασίζεται σε 5G NR- παρέχει επιπλέον βελτιώσεις για την καλύτερη εξυπηρέτηση των εφαρμογών V2X. Για παράδειγμα, το εγγυημένο QoS, η ομαδική μετάδοση χωρίς σύνδεση και ο ασφαλής μηχανισμός unicast, επιτρέπουν ανάπτυξη νέων υπηρεσιών V2X.

Εκτός από την επικοινωνία Sidelink, η οποία είναι κατάλληλη για τους τύπους υπηρεσιών V2V και V2I, το C-V2X φέρνει τον τρόπο επικοινωνίας Uu που επιτρέπει τις V2N υπηρεσίες. Αυτό επιτρέπει πολλές εφαρμογές V2X -ειδικά αυτές στις οποίες η ασφάλεια και ο χρόνος δεν είναι κρίσιμοι- για να επαναπροσδιοριστούν, και ακόμη και να υποστηριχθούν για διαφορετικές λειτουργίες πρόσβασης ταυτόχρονα (ανάλογα με τα σενάρια ανάπτυξης). Με την ανάπτυξη συστημάτων 5G Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC), τα οχήματα μπορούν να λαμβάνουν εκπομπές ειδοποιήσεων κυκλοφορίας σχετικά με την επικείμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ατυχήματα. Συνεργατικές πληροφορίες μπορούν επίσης να ανταλλάσσονται μεταξύ οχημάτων ή οδικής υποδομής (όπως φανάρια) για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Το V2N μπορεί επίσης να διευκολύνει άλλες εφαρμογές για ψυχαγωγία ή ευκολία. Για παράδειγμα, οι χρήστες στους δρόμους μπορούν να κάνουν λήψη ενημερωμένων χαρτών ή ροή βίντεο από ένα κέντρο δεδομένων. Άλλη λειτουργία του V2N είναι να συνδέει οχήματα μεταξύ τους και να αυξάνει άλλους τρόπους επικοινωνίας όπως V2V, V2I και V2P. Τα συστήματα V2N μπορούν επίσης να βοηθήσουν τους πεζούς να αποτρέψουν πιθανά ατυχήματα στέλνοντας ειδοποιήσεις ασφαλείας στα οχήματα και σε πεζούς σε διάφορες επικίνδυνες καταστάσεις. Για παράδειγμα, ένα όχημα που οδηγεί μέσω κόκκινου φωτός ή ενός πεζού που διασχίζει διασταύρωση.

Το C-V2X σχεδιάστηκε επίσης για να είναι φιλικό προς ομάδες ευάλωτων χρηστών δρόμου (VRU), συμπεριλαμβανομένων των πεζών και των ποδηλάτων. Υπάρχουν εγγενή χαρακτηριστικά που επιτρέπουν τέτοιες συσκευές να λειτουργούν με επιλογές εξοικονόμησης ενέργειας. Επιπλέον, το 3GPP λειτουργεί σχετικά με νέες δυνατότητες για 5G C-V2X: Η Sidelink Discontinuous Reception (SL-DRX) επιτρέπει το UE να βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας εκτός από ένα προκαθορισμένο παράθυρο λήψης για περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών VRU. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιπτώσεις χρήσης V2P που φάνταζαν δύσκολα εφικτές κατά το παρελθόν τώρα να μπορούν να εφαρμοσθούν .

Οι εφαρμογές ασφάλειας που σχετίζονται με αποφυγή σύγκρουσης έχουν μελετηθεί εδώ και πολύ καιρό εντός της κοινότητας προτύπων V2X για τύπο επικοινωνίας V2V, όπως:

- Προειδοποίηση σύγκρουσης εμπρός
- Ηλεκτρονικά φώτα φρένων έκτακτης ανάγκης
- Προειδοποίηση «Μην περάσετε»
- Υποβοήθηση αριστερής στροφής
- Υποβοήθηση κίνησης διασταυρώσεων
- Προειδοποίηση για τυφλά σημεία/Προειδοποίηση αλλαγής λωρίδας
- Προειδοποίηση έκτακτης ανάγκης οχήματος

Έχοντας κατά νου την τεχνολογία 5G C-V2X, η 5GAA εντόπισε μια ομάδα νέων εφαρμογών V2X καθώς και τις απαιτήσεις σε επίπεδο υπηρεσίας. Στον Πίνακα 2.2, παρουσιάζεται μια λίστα με τέτοια επιλεγμένα παραδείγματα.

Πίνακας 2.2 Υπηρεσίες C-V2X [10]

Service Types	Example use cases	End-to-end latency (ms)	Reliability	Data rate	Recommended C-V2X mode
Safety	Cooperative Traffic Gap	50 ms	99.9%	2 Mbps	V2V
Safety	Interactive VRU crossing	100 ms	99.9%	64 Kbps	V2P
Vehicle Operation management	Software Update of Reconfigurable radio system	Delay tolerant (hours)	99%	200MB (delay tolerant)	V2N
Convenience	Automated Valet Parking (incl. authentication, proof of localization, wake up)	500 ms	99%	16 kbps	V2I
Convenience	Awareness confirmation	20 ms	99.9%	40 kbps	V2V, V2N
Convenience	Cooperative Curbside management	100 – 5000 ms	99.0%	Few kbps	V2P, V2I, V2N
Convenience	Cooperative Lateral Parking	10 – 100 ms	99.9%	27 Mbps	V2V
Convenience	In-vehicle entertainment	20 ms	99%	Up to 250 Mbps	V2N
Convenience	Obstructed view assist	50 ms	99%	5 Mbps	V2I, V2V
Autonomous Driving	Cooperative Lane merge	20 ms	99.9%	12 kbps	V2V
Autonomous Driving	Cooperative Maneuvers of AV for emergency situations	10 ms	95%	48 kbps	V2V
Autonomous Driving	Coordinated, cooperative driving maneuver	20 ms (each for 4 round trips)	99.9%	64 Mbps (system level)	V2V
Autonomous Driving	Vehicle Platoon in steady state	50 ms	99.0%	24 kbps	V2V
Autonomous Driving	Automated Intersection crossing	10 ms	99.9999%	~ 64 kbps	V2I
Autonomous Driving	HD Map Collecting and sharing	100 ms	99%	16 Mbps	V2N, V2I
Autonomous Driving	Infrastructure Assisted Environment perception	100 ms	99.99%	4 – 80 Mbps	V2I, V2N
Autonomous Driving	Infrastructure-based tele-operated driving	50 ms	99.999%	400 kbps	V2I, V2N
Autonomous Driving	Tele-operated Driving (ToD)	100 ms (UL); 20 ms (DL)	99.999%	36 Mbps (UL); 400 kbps (DL)	V2N
Autonomous Driving	Autonomous vehicle disengagement report	10 min	99.99%	26.7 Mbps	V2N
Traffic efficiency and society	Bus lane sharing request/revocation	200 ms	99%	40 kbps	V2I, V2N
Traffic efficiency and society	Continuous traffic flow via green light coordination	100 ms	95%	20 kbps	V2I, V2N
Traffic efficiency and society	Group start	10 ms	99.999%	20 kbps	V2I

2.4 Επίδοση των C-V2X

Η ενισχυμένη οδική ασφάλεια αποτελεί τη βασική απαίτηση οδήγησης των περισσότερων, αν όχι όλων, και σημαντική καινοτομία στον κόσμο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η 5GAA έχει διεξάγει εκτενείς και αντικειμενικές δοκιμές που συγκρίνουν τις δύο διαθέσιμες τεχνολογίες Radio: το DSRC, χρησιμοποιώντας το πρότυπο IEEE 802.11p (DSRC στις ΗΠΑ και ITS-G5 στην Ευρώπη) και το C-V2X, χρησιμοποιώντας την έκδοση 3GPP 14 Sidelink. Πάνω από μια δεκαετία, πραγματοποιήθηκαν τεστ λειτουργικότητας και απόδοσης στο CAMP ώστε να μπορέσει να γίνει αξιολόγηση των δύο τεχνολογιών Radio.

Υπό συνθήκες που παρακολουθούνται στενά, οι δοκιμές πεδίου πραγματοποιήθηκαν σε ιδανικά αλλά και αντιφατικά περιβάλλοντα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με μήκος πακέτου 193 byte για βασικά μηνύματα ασφαλείας μεταδιδόμενα στη ζώνη ITS (κανάλι 184) και με εύρος ζώνης 10 MHz. Η αναλυτική έκθεση δοκιμής από τη 5GAA [20] περιγράφει τη δοκιμαστική ρύθμιση (set up), τις συνθήκες, τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα.

Επίσης εξετάστηκε η συνολική C-V2X απόδοση σε σύγκριση με το DSRC, η συνθετική αξιοπιστία και οι μετρήσεις απόδοσης στο υπόβαθρο (background), και αναλύθηκαν τα ευρήματα του προβλήματος μακρύ-κοντινό πεδίο για το C-V2X [10]. Το C-V2X επέδειξε σαφώς ανώτερη απόδοση και αξιοπιστία σε σύγκριση με το DSRC.

Αυτές οι δοκιμές σχεδιάστηκαν για να αντιπροσωπεύουν πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας για στατική χωρίς οπτική επαφή (NLOS) σε κινούμενα εμπόδια, συμπεριλαμβανομένων του θορύβου και των παρεμβολών στο υπόβαθρο (background).

Το C-V2X έδειξε σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά το εύρος (περιθώριο ζεύξης) έναντι του DSRC, που μεταφράζεται σε ενισχυμένη ασφάλεια για τους οδηγούς και τους ευάλωτους χρήστες του δρόμου (VRU). Συστηματικές δοκιμές μοντελοποίησης όσον αφορά την απώλεια διαδρομής (path loss) με και χωρίς θόρυβο στο υπόβαθρο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας μεταξύ μετάδοσης και λήψης σε οχήματα και για διάφορες εντάσεις σήματος επίσης έλαβαν χώρα.

Το C-V2X έδειξε σημαντικό πλεονέκτημα αξιοπιστίας έναντι του DSRC. Σε σενάρια με πραγματικά εμπόδια (κτίρια, λόφους και άλλα οχήματα που εμποδίζουν), αυτά μπορούν να δημιουργήσουν νεκρά σημεία ή περιοχές με πολύ χαμηλή λαμβανόμενη ισχύ σήματος. Ας θεωρήσουμε ένα αυτοκίνητο που εκπέμπει ένα Intersection Movement Assist (IMA) ή σήμα αριστερής υποβοήθησης στροφής (LTA) προς όχημα που λαμβάνει το σήμα σε λοφώδη δρόμο: η χαμηλή ισχύς του σήματος μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα λήψης του σήματος από το όχημα για να πάρει σήμα εγκαίρως, δυνητικά

οδηγώντας το σε σύγκρουση. Ωστόσο, με μια ζεύξη αυξημένης απόδοσης που προσφέρει το C-V2X μπορεί να εξαλείψει την κατάσταση κακής λήψης του σήματος.

Το 5G οραματίζεται έναν κόσμο ενωμένο με ένα κοινό, ενοποιημένο «πέπλο» συνδεσιμότητας ικανό να υποστηρίζει διάφορες συσκευές σε όλο τον κόσμο σε ποικίλες αναπτύξεις και περιοχές συχνοτήτων. Το C-V2X συνεχίζει να είναι το βασικό πεδίο εστίασης της καινοτομίας σε ένα τέτοιο όραμα. Ενώ το C-V2X στο 3GPP Έκδοση 14 παρείχε αξιοπιστία και απόδοση για τα βασικά μηνύματα ασφαλείας, η επέκταση C-V2X στο 3GPP Release 16+ βασίζεται στο γερό θεμέλιο του 5G core το οποίο θα φέρει υψηλότερα επίπεδα απόδοσης, χαμηλότερη καθυστέρηση και αξιόπιστη ομαδική επικοινωνία, για προχωρημένες και απαιτητικές εφαρμογές V2X. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα οχήματα εξοπλισμένα με την έκδοση 16 βασίζονται επίσης στην τεχνολογία 5G C-V2X με υποστήριξη C-V2X Sidelink από την Release 14/15 για βασικές εφαρμογές ασφάλειας

Η έκδοση 3GPP Release 16 εισήγαγε αξιόπιστη επικοινωνία πολλαπλών εκπομπών για το C-V2X Sidelink και με ομαδική μετάδοση και χωρίς σύνδεση λειτουργία ομαδικής μετάδοσης. Η χωρίς σύνδεση (contactless) ομαδική μετάδοση αποτελεί το κλειδί για θεμελιώδεις καινοτομίες, όπως π.χ. αξιοποιώντας την απόσταση στο φυσικό επίπεδο και τη διεύθυνση επικοινωνίας ειδική για εφαρμογές χρησιμοποιώντας NACK. Χρησιμοποιώντας την απόσταση βοηθά στην επίτευξη ομοιόμορφου εύρους επικοινωνίας και για τα δύο LOS και σενάρια NLOS. Με αυτή τη χωρίς σύνδεση 5G C-V2X λειτουργία, οι ομάδες μπορούν να σχηματιστούν εν πτήση για ανταλλαγή μηνυμάτων με μικρή (σχεδόν μηδενική) επιβάρυνση για τη δημιουργία ομάδας επιτυγχάνοντας ανώτερη αξιοπιστία, εκτεταμένο εύρος, χαμηλή καθυστέρηση και NLOS.

Οι δυνατότητες του 5G C-V2X του επιτρέπουν να υποστηρίζει προηγμένες περιπτώσεις χρήσης ασφαλείας σε υψηλότερες ταχύτητες οχήματος (~ 500kmph) και σε δύσβατους δρόμους καθώς και σε δύσκολες κυκλοφοριακές συνθήκες. Το 5G C-V2X Sidelink περιλαμβάνει προηγμένη τεχνολογία εντοπισμού θέσης που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για περιοχές φτωχές σε υποδοχής GNSS όπως είναι η σήραγγα ή το γκαράζ στάθμευσης. Τα οχήματα μπορούν να συνεχίσουν να επικοινωνούν αξιόπιστα χρησιμοποιώντας 5G C-V2X Sidelink για ασφαλή οδήγηση.

Εκτός από την απόδοση και τις βελτιώσεις των χαρακτηριστικών στο Sidelink, το 5G C-V2X επέφερε επιπλέον βελτιώσεις στη συνδεσιμότητα Uu για την καλύτερη εξυπηρέτηση του προηγμένου δικτύου βασισμένα σε εφαρμογές V2X, οι οποίες απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και εγγύηση εξυπηρέτησης. Αυτά τα νέα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- Αναλύσεις βιωσιμότητας QoS για διακομιστές εφαρμογών C-V2X, όπως ορίζεται στο 3GPP TS 23.287. Αυτή η δυνατότητα είναι επίσης

γνωστή ως "Predictive QoS", η οποία επιτρέπει το δίκτυο να εκτιμά και να αποφασίζει εάν η απαίτηση για το επιθυμητό QoS μπορεί να εκπληρωθεί σε περιοχή στόχου πριν η υπηρεσία αρχίσει. Επιπλέον, επίσης παρέχει εκ των προτέρων ειδοποίηση σε διακομιστές εφαρμογών εάν αναμένεται αλλαγή επιπέδου στο QoS στην περιοχή στόχου. Αυτό επιτρέπει το V2X στρώμα εφαρμογής να προσδιορίζει και να ρυθμίζει τη στρατηγική λειτουργίας του αναλόγως των διακοπών υπηρεσιών. Στο μέλλον οι εξελίξεις στο 3GPP και την τεχνητή νοημοσύνη θα λαμβάνουν υπόψη τη μάθηση για να ξεκλειδώνει την περαιτέρω χρήση του δικτύου για χρήση σε C-V2X εφαρμογές.

- Υποστήριξη εναλλακτικού QoS. Οι απαιτήσεις για διακομιστές εφαρμογών C-V2X ορίζονται στο 3GPP TS 23. 287 και το TS 23.501. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στο επίπεδο εφαρμογής V2X να υποδείξει πολλαπλά επίπεδα QoS απαιτήσεων για το 5G C-V2X σύστημα, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να προσαρμόσει τα επίπεδα QoS ανάλογα με τις συνθήκες radio χωρίς τη διεξαγωγή επιπλέον διαπραγματεύσεων στο επίπεδο εφαρμογής. Μπορεί να επιτυγχάνουν πολύ πιο γρήγορες αντιδράσεις στο σύστημα 5G και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου.
- Τυποποιημένη φέτα/υπηρεσία V2X Τύπος (SST), όπως ορίζεται στο 3GPP TS 23.501. Ο ορισμός του τυποποιημένου V2X SST επιτρέπει ένα συνεπή, διασταυρωμένο έλεγχο MNO της παροχής υπηρεσιών για V2X ακόμη και στην θήκη περιαγωγής. Ο σύνδεσμος GSM έχει ορίσει μια αρχιτεκτονική για τεμαχισμό δικτύου E2E περιγράφοντας πώς τέτοια διαφορετικά μέρη μπορούν να συνεργαστούν ώστε να παραδώσουν την απαιτούμενη απόδοση (καθυστέρηση, αξιοπιστία, για η υπηρεσία V2X). Οι καινοτομίες στο σετ 5G C-V2X παρέχουν ενισχυμένη αυτόνομη οδηγική εμπειρία, γρηγορότερα και πιο αποτελεσματικά ταξίδια, και μειωμένα επίπεδα εκπομπής άνθρακα εκτός από ενισχυμένη οδική ασφάλεια για όλους. Μαζί με το σταθερό και αξιόπιστο LTE C-V2X (3GPP Release 14/15) που έχει δοκιμαστεί και αποδειχθεί κατάλληλο για βασική ασφάλεια, το 5G C-V2X παρέχει ανάπτυξη δύο σταδίων και επιτρέπει αποτελεσματική και ευέλικτη υποστήριξη για τις τρέχουσες και μελλοντικές εφαρμογές ενώ διευκολύνει μια πορεία εξέλιξης προς τα εμπρός.

2.5 C-V2X και δημόσια κινητά δίκτυα

2.5.1 RSU με σύνδεση κινητού δικτύου ως backhaul

Το RSU μπορεί να έχει διπλό ρόλο στην υποδομή ITS. Στην επικοινωνία με τα οχήματα, χρησιμοποιεί το C-V2X βασισμένο στο Sidelink τρόπο επικοινωνίας. Για να παρέχει ταυτόχρονα πληροφορίες για την επικοινωνία Sidelink, ή για να λαμβάνει τα μηνύματα που λαμβάνονται μέσω του PC5 σύνδεσμο, μπορεί επίσης να λειτουργεί κανονικά ως UE (όπως ορίζεται από τα συστήματα 3GPP) σε πρόσβαση σε μια εφαρμογή V2X με back end διακομιστή στο δίκτυο.

Για παράδειγμα, η ανάπτυξη ενός RSU στο φανάρι που χρησιμοποιεί το Uu ως backhaul για την απόκτηση της φάσης και του χρονισμού σήματος (SPaT) για πληροφορίες από τη διαχείριση κυκλοφορίας στα κέντρα (TMC) και χρησιμοποιώντας το Sidelink για τη διανομή των πληροφοριών στο όχημα που το ζητά. Επιπροσθέτως, η Προειδοποίηση Ζώνης Εργασίας μπορεί να χρησιμοποιήσει τέτοια Uu που βασίζονται σε backhaul για το RSU έτσι ώστε προσωρινές RSU να μπορούν να ρυθμιστούν σε οποιαδήποτε χρόνο σε μια τοποθεσία όταν αυτό είναι απαραίτητο. Αυτό μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την οδική ασφάλεια και να μειώσει τα γενικά έξοδα για τις σχετικές διαδικασίες.

Οι φορείς κινητής τηλεφωνίας μπορούν να έχουν σημαντικό μερίδιο στο οικοσύστημα C-V2X προσφέροντας αξιόπιστη κυψελωτή συνδεσιμότητα για τη συσκευή RSU. Μπορούν να κανονιστούν συμφωνίες (SLA) οι οποίες προσφέρουν συνδρομές στις συσκευές RSU ειδικά σχεδιασμένες για χρήση τέτοια ώστε οι RSU μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση με κριτήριο την προτεραιότητα και εγγυημένο QoS. Με αυτή την έννοια, οι RSU μπορούν να θεωρηθούν ως ένας νέος τύπος συσκευών IoT.

2.5.2 RSU με κατανομημένη 5G αρχιτεκτονική RAN

Η 3GPP έχει ορίσει αρχιτεκτονική διαχωρισμού (disaggregation) RAN [31] [32] [33] που επιτρέπει ο σταθμός βάσης να χωριστεί σε κεντρική μονάδα (CU), κατανομημένη μονάδα (DU) και Ράδιο Μονάδα (RU). Αυτός ο διαχωρισμός προσφέρει πιο ευέλικτες επιλογές ανάπτυξης και συγκέντρωση κοινών λειτουργιών· μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης και τη διαχείριση σταθμών βάσης ή δικτύων radio. Επιπλέον, επιτρέπει τη διάσπαση του επιπέδου ελέγχου και των οντοτήτων επιπέδου χρήστη, το οποίο παρέχει περαιτέρω επιλογές για αναπτύξεις. Ορίζονται και δημοσιεύονται τυποποιημένες διεπαφές διαχωρισμού από το Small Cell Forum [34] και το O-RAN [35] για να καθοριστεί ο διαχωρισμός του κάτω στρώματος (στο το επίπεδο MAC και PHY, για παράδειγμα).

Ομοίως, οι RSU μπορούν επίσης να διαχωριστούν και να αναπτυχθούν με καταναμημένους τρόπους. Για παράδειγμα, οι πίνακες radio μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετική τοποθεσία από το στρώμα MAC της RSU, ειδικά σε περίπτωση μεγαλύτερων περιοχών κάλυψης. Είναι επίσης δυνατή η τοποθέτηση του επιπέδου PDCP και RRC του RSU σε κεντρική τοποθεσία (κοντά στην τοποθεσία CU του συστήματος 5G) ενώ τοποθετούνται πολλαπλά καταναμημένα RSU "DU" στις άκρες του δρόμου πιο κοντά στα οχήματα, όπως στο φανάρι. Αυτή η καταναμημένη ανάπτυξη RSU φέρνει τόσο τεχνικά όσο και λειτουργικά οφέλη. Η κατοχή ενός συγκεντρωτικού λογικού ανώτερου επιπέδου θα μπορούσε να επιτρέψει την ίδια RSU να εξυπηρετήσει πολύ ευρύτερες περιοχές και να μειώσει τις πιθανές μεταβάσεις υπηρεσιών. Για παράδειγμα, τα οχήματα μπορούν να εξυπηρετηθούν από την ίδια RSU σε λίγα χιλιόμετρα του δρόμου. Αυτό αυξάνει αποτελεσματικά το εύρος υπηρεσιών V2I και επιτρέπει επιπλέον νέες υπηρεσίες V2I να αναπτυχθούν. Μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για βάση unicast εφαρμογές επειδή η σύνδεση και η διεύθυνση IP μπορούν να διατηρηθούν σε όλους τους χώρους στα διαφορετικά "DU" RSU, έτσι ώστε το όχημα να μπορεί να έχει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χωρίς διακοπή με το διακομιστή εφαρμογών V2X.

Η καταναμημένη ανάπτυξη RSU μπορεί επίσης να μειώσει σημαντικά το κόστος ιδιοκτησίας για τους φορείς υποδομής ITS. Καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία C-V2X, οι φορείς εκμετάλλευσης υποδομής ITS μπορούν να επιλέξουν την αναβάθμιση του συστήματος ανάλογα με τις ανάγκες για αναβάθμιση. Για παράδειγμα, μπορούν να εκτελέσουν μια απλή αναβάθμιση λογισμικού του RSU "CUs" για να αποκτήσει νέες λειτουργίες με βάση τα πιο πρόσφατα πρότυπα, ή μπορούν να αναβαθμιστούν στο καθορισμένο τμήμα του RSU "DU", χωρίς να επηρεάζεται η τρέχουσα λειτουργία του υπόλοιπου RSU. Ο διαχωρισμός RSU μοιράζεται τις ίδιες επιλογές διαχωρισμού με αυτές του 5G συστήματος RAN και τα καταναμημένα στοιχεία RSU (RSU "CU" ή RSU "DU") μπορούν να συνεργαστούν με τις διαχωρισμένες οντότητες 5G RAN. Για παράδειγμα, το RSU Το "DU" μπορεί να τοποθετηθεί στην ίδια θέση κυψέλης με αυτό του gNB DU. Επομένως, ο σύνδεσμος backhaul για το gNB DU μπορεί επίσης να μοιραστεί με το RSU "DU" για να το συνδέσει στο RSU "CU" το οποίο ενδέχεται να συσχετιστεί με το gNB "CU". Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για περιπτώσεις όπου ο σύνδεσμος backhaul είναι επίσης ασύρματος (αναπτύξεις IAB). Δεδομένης της συσχέτισης, η RSU μπορεί επίσης να είναι σε θέση να βοηθήσει το 5G RAN. Για παράδειγμα, η RSU θα μπορούσε να λάβει πληροφορίες V2X (τοποθεσία, ταχύτητα, κατεύθυνση, ενός οχήματος UE) από τη διεπαφή Sidelink (PC5) που θα μπορούσε να είναι χρήσιμο για να βοηθήσει το 5G gNB να διαχειριστεί αντίστοιχες λειτουργίες (διαμόρφωση δέσμης) που εξυπηρετεί τη σύνδεση UU του ίδιου οχήματος.

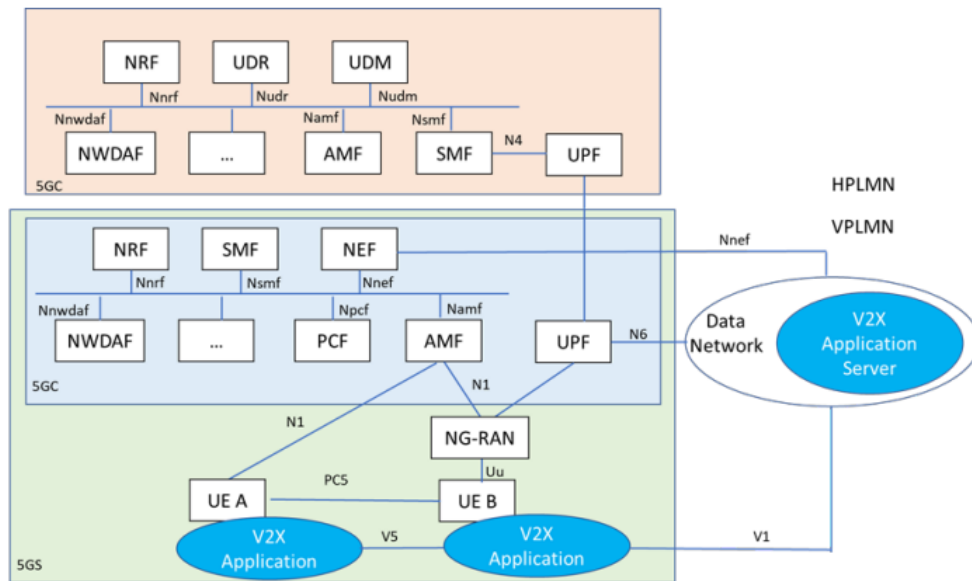
2.5.3 Απευθείας συνδεσιμότητα με όχημα μέσω 5G PLMN

Ένα σύστημα V2N υποστηρίζει την άμεση συνδεσιμότητα μεταξύ οχημάτων και κινητής τηλεφωνίας δικτύου μέσω της διεπαφής Uu. Η αρχιτεκτονική του συστήματος ορίζεται από το 3GPP TS 23.287 [23] και φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Όπως φαίνεται, οι υπάρχουσες λειτουργίες δικτύου (NFs) της αρχιτεκτονικής 5GS μπορούν να υποστηρίξουν επαρκώς την επικοινωνία C-V2X χωρίς εισαγωγή νέου NF. Αντ' αυτού, έχουν δημιουργηθεί νέες λειτουργίες C-V2X οι οποίες έχουν ενσωματωθεί στα υπάρχοντα NF. Τα UE στην αρχιτεκτονική μπορούν να περιλαμβάνουν οχήματα, συσκευές VRU ή συσκευές RSU. Η 3GPP αναφέρει την ικανότητα C-V2X (Uu ή PC5) στον 5G Core (5GC) μέσω N1 και/ή από V2X Application Server μέσω V1.

Εν τω μεταξύ, οι παράμετροι λειτουργίας C-V2X αποστέλλονται από το 5GC σε UE μέσω N1. Η Λειτουργία Ελέγχου Πολιτικής (PCF) παρέχει στα UE εξουσιοδότηση και παραμέτρους πολιτικής για επικοινωνία V2X μέσω PC5 και Uu. Το PCF παρέχει επίσης το AMF με τις απαραίτητες παραμέτρους ως μέρος του περιβάλλοντος UE για διαμόρφωση και διαχείριση επικοινωνιών V2X. Αυτές οι παράμετροι ανακτώνται από μια Ενοποιημένη Αποθήκη Δεδομένων (UDR). Η λειτουργία αποθήκευσης δικτύου (NRF) βοηθά τα άλλα NF να επιλέξουν το κατάλληλο PCF με βάση τις αντίστοιχες δυνατότητες C-V2X. Ο διακομιστής εφαρμογών V2X έχει τις λειτουργίες που απαιτούνται για τα ακόλουθα:

- Παροχή των UE και/ή του 5GC με τις απαραίτητες παραμέτρους για την εκτέλεση επικοινωνίας V2X μέσω του PC5 ή του Uu
- Αίτηση υπηρεσιών 5GC
- Λήψη δεδομένων uplink και παράδοση δεδομένων σε άλλα UE

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός συστήματος 5G (5GS) V2X και 4G LTE V2X δεν απαιτεί νέες διεπαφές σε επίπεδο αρχιτεκτονικής και δεν επηρεάζει τις υπάρχουσες οντότητες λειτουργίας δικτύου στα 4G Evolved Packet Core (EPC) και στο 5GC.



Σχήμα 2.4 Συνδεσιμότητα μέσω 5G PLMN [10]

2.5.4 MEC για υπηρεσίες C-V2X

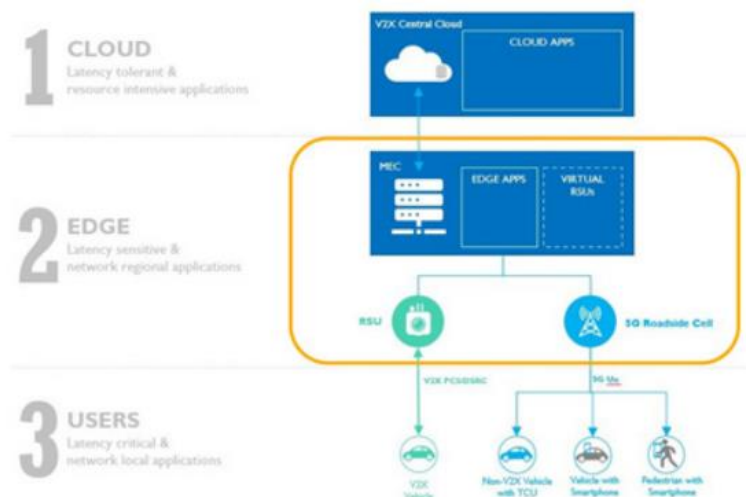
Όπως φαίνεται στις προηγούμενες ενότητες, οι υπηρεσίες υποδομής ITS μπορούν να πραγματοποιηθούν με V2I χρησιμοποιώντας RSU και σύνδεση PC5 με το Uu και το 5G σύστημα που συμπληρώνει τη συνδεσιμότητα. Ωστόσο, οι υπηρεσίες και εφαρμογές υπερβαίνουν τις απαιτήσεις για βασική ασφάλεια και κατευθύνονται προς τη συνολική έξυπνη μεταφορά, (συμπεριλαμβανομένης και της αυτόνομης οδήγησης). Οι περισσότερες από αυτές εξαρτώνται από αποφάσεις ή πληροφορίες που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της υπηρεσίας σχετικές με το περιβάλλον ή πληροφορίες σχετικές με το όχημα. Το Multi-access Edge Computing (MEC), παλαιότερα γνωστό ως υπολογισμός κινητής ακμής, μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη υψηλής επεξεργαστικής ισχύος κοντά στο όχημα με στόχο να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και να μειώσει την κίνηση δικτύου προς ένα κεντρικό κέντρο δεδομένων. Αυτό απαιτεί βελτιώσεις στην υποδομή ITS.

Το MEC είναι ένας τύπος υπολογισμού νέφους που βρίσκεται κοντά στην άκρη του δικτύου. Βοηθάει να προσφέρονται διάφορες υπηρεσίες από άκρο σε άκρο με βάση το εύρος ζώνης και/ή την καθυστέρηση που απαιτείται για διάφορες εφαρμογές. Το δίκτυο της άκρης του δρόμου μπορεί να παρέχει υπηρεσίες οχημάτων (πάνω από PC5) συγκεντρώνοντας διάφορους αισθητήρες και πραγματοποιεί επεξεργασία δεδομένων μέσω πλατφόρμας Edge Computing. Αυτό μπορεί να προσαρμόσει την CPU και τους πόρους αποθήκευσης για να χειριστεί το μεγάλο όγκο δεδομένων από και προς τα οχήματα ή τις μονάδες RSU με βάση τις απαιτήσεις υπηρεσιών. Επιπλέον, η

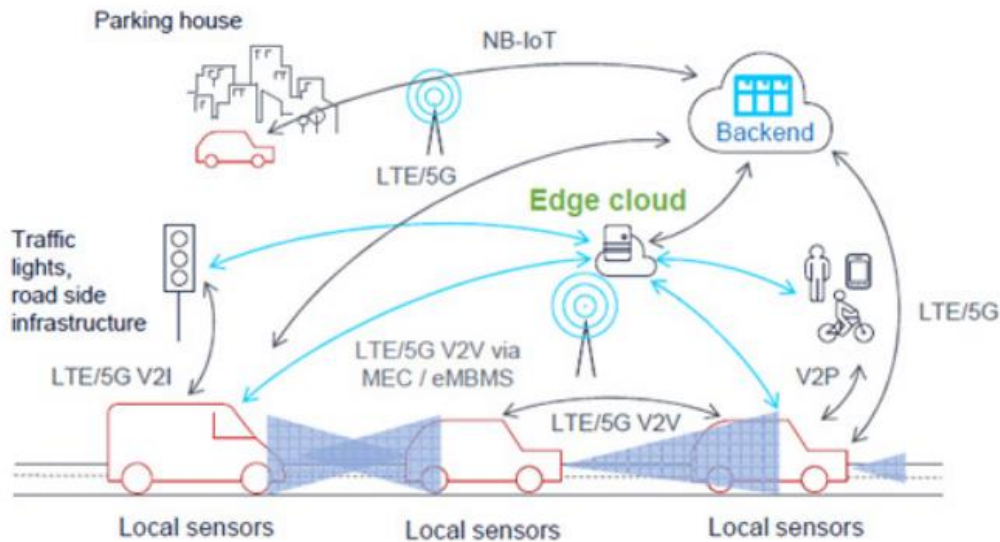
ανάπτυξη MEC μπορεί να χρησιμοποιήσει μια ιεραρχική αρχιτεκτονική (φαίνεται στο Σχήμα 2.5) χρησιμοποιώντας πύλες και μονάδες στο δρόμο για να μειωθεί περαιτέρω η καθυστέρηση και το φορτίο επεξεργασίας του συνολικού δικτύου.

Οι φορείς εκμετάλλευσης ή οι πάροχοι MEC μπορούν να παραδώσουν το cloud και τις υπηρεσίες σε εξουσιοδοτημένους τρίτους που θα επιτρέψουν την ταχεία ανάπτυξη και προσαρμογή εφαρμογών και για υπηρεσίες οχημάτων, συνδρομές για κινητά και άλλες κάθετες αγορές. Το MEC θα επιτρέψει στις εφαρμογές και τις υπηρεσίες να φιλοξενούνται «στην κορυφή» στοιχεία του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (πάνω από το επίπεδο δικτύου) στα οποία μπορούμε να έχουμε πρόσβαση μέσω διαφόρων μεθοδολογιών συμπεριλαμβανομένου του PC5 όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.

Το MEC επιτρέπει σε εφαρμογές λογισμικού να αξιοποιούν το τοπικό περιεχόμενο και τις πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις συνθήκες δικτύου τοπικής πρόσβασης. Για παράδειγμα, ο υπολογιστής edge μπορεί να παρέχει διάφορες υπηρεσίες οχημάτων μέσω της διεπαφής PC5 ή Uu όπως να παρέχει χάρτες σε πραγματικό χρόνο υψηλής ευκρίνειας, παρακολούθηση/ειδοποιήσεις κίνησης σε πραγματικό χρόνο και διάφορα ψυχαγωγικά περιεχόμενα. Οι υπηρεσίες MEC μπορούν να παρέχουν βοήθεια σε αυτόνομα σενάρια οδήγησης παρέχοντας πρόσβαση και ειδοποιήσεις βάσει παρατηρηθέντων/εντοπισμένων οδικών κινδύνων και προβλέψεων βάσει τοπικών υπολογιστών (όπως η ανίχνευση με κάμερα, η διάβαση πεζών και άλλα).



Σχήμα 2.5 Ιεραρχική αρχιτεκτονική των MEC για υπηρεσίες C-V2X [10]



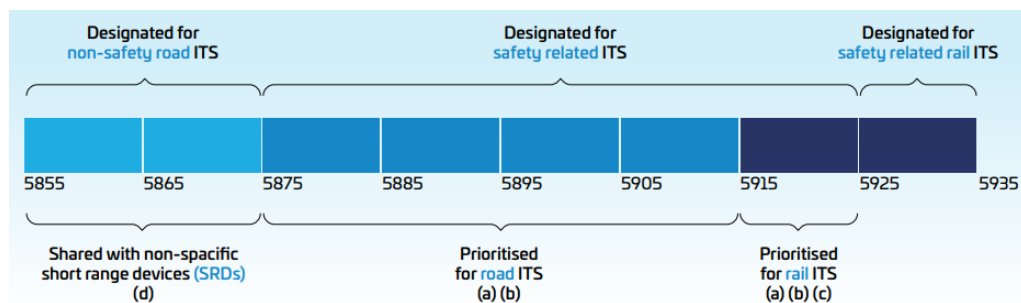
Σχήμα 2.6 Εφαρμογή του cloud edge για υπηρεσίες C-V2X [10]

2.6 Διαθέσιμο φάσμα για τις C-V2X επικοινωνίες

Οι ευρωπαϊκές διοικήσεις έχουν ορίσει τις ζώνες 5855 – 5875 MHz και 5875 – 5925 MHz -αναφέρεται ως ζώνη 5,9 GHz – για χρήση από οδικά ευφυή συστήματα μεταφοράς (ITS) όπως καθορίζεται στη σύσταση ECC (08) 01 και στην απόφαση ECC (08) 01 αντίστοιχα, και οι οποίες εγκρίθηκαν το Μάρτιο του 2020. Αυτές συμπληρώνονται με την απόφαση 2020/1426 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, όπως εγκρίθηκε τον Οκτώβριο του 2020.

Η βιομηχανία σχεδιάζει την ανάπτυξη τεχνολογιών C-V2X (LTE-V2R και NR-V2X) για άμεσες επικοινωνίες (μέσω της διεπαφής PC5) στη ζώνη των 5,9 GHz. Για να διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα σε ολόκληρο τον κλάδο, η 5GAA θεωρεί ότι απαιτείται μια συμφωνία με τη βιομηχανία που προσφέρει C-V2X επικοινωνίες για την ίδια ζώνη των 5,9 GHz.

Το σχέδιο με τις ζώνες συχνοτήτων φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Ζώνες συχνοτήτων για το 5G στις c-V2X επικοινωνίες [12]

Συγκεκριμένα, τα 5855 – 5875 MHz προορίζονται για μη ασφαλή οδικά ITS, ενώ η ζώνη 5875 – 5935 έχει καθορισθεί για ITS που σχετίζονται με την ασφάλεια. Επιπλέον, οι συχνότητες 5875 – 5915 MHz και τα 5915 – 5925 MHz έχουν προτεραιότητα για οδικές εφαρμογές ITS και σιδηροδρομικές εφαρμογές ITS, αντίστοιχα, με το εύρος συχνοτήτων 5925 – 5935 MHz να είναι διαθέσιμο μόνο για σιδηροδρομικά συστήματα ITS. Η λειτουργία των μονάδων OBU και RSU επιτρέπονται μόνο με συγκεκριμένη άδεια.

Τα ακόλουθα σημεία πρέπει να σημειωθούν σε σχέση με το ανωτέρω Σχήμα 2.7.

- I. Δεν προκαλείται επιβλαβής παρέμβαση στην εφαρμογή που έχει προτεραιότητα.
- II. Το οδικό ITS και το σιδηροδρομικό ITS παραμένουν περιορισμένα στις αντίστοιχες προτεραιότητές τους με συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων μέχρι τη στιγμή που απαιτείται κατάλληλη κοινή χρήση φάσματος όπως ορίζεται από το ETSI
- III. Οι επικοινωνίες μεταξύ οχήματος και οχήματος (V2V) για δρόμους-ITS επιτρέπονται μόνο στα 5915-5925 MHz όταν έχουν αναπτυχθεί λύσεις κοινής χρήσης φάσματος για την προστασία των σιδηροδρομικών ITS στο ETSI. Ελλείψει τέτοιων λύσεων κοινής χρήσης για την προστασία των σιδηροδρομικών-ITS, οι εθνικές διοικήσεις μπορούν να επιτρέπουν επικοινωνίες υποδομής σε οχήματα (I2V) για οδικούς-ITS στα 5915-5925 MHz υπό την επιφύλαξη του συντονισμού με το σιδηροδρομικό δίκτυο ITS.
- IV. Η χρήση του φάσματος στο εύρος συχνοτήτων 5855-5875 MHz γίνεται σε μη παρεμβολές/μη προστατευμένες βάσεις [49], και περιλαμβάνει τη χρήση μη ασφαλών road-ITS και μη ειδικών συσκευών μικρής εμβέλειας. Η πρόσβαση στην αγορά στην Ευρωπαϊκή Ένωση διέπεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία Ράδιο εξοπλισμού (RED) [50] της οποίας οι βασικές απαιτήσεις καλύπτονται από το εναρμονισμένα πρότυπα ETSI. Συμμόρφωση με τις βασικές απαιτήσεις του το RED στο πλαίσιο των ITS στα 5,9 GHz μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω της συμμόρφωσης με τις τεχνικές προδιαγραφές που ορίζονται στο ETSI EN 302 571 [51].

2.7 Υπηρεσίες εκτός φάσματος ITS

Οι ενότητες 2.2 – 2.6 προσδιόρισαν ορισμένες κατάλληλα υπηρεσίες για υπηρεσίες V2N εκτός από αυτά που συζητήθηκαν. Αυτές είναι υπηρεσίες V2X που μπορούν να προσφερθούν εκτός του φάσματος ITS. Το πότε η διεπαφή Uu χρησιμοποιείται για αυτές τις υπηρεσίες, που ανήκουν στο αδειοδοτημένο φάσμα, θα εξαρτηθεί από το φορέα κινητής τηλεφωνίας για τις υπηρεσίες V2X. Αυτό απαιτεί συσκευή C-V2X με συνδρομή με το φορέα κινητής

τηλεφωνίας. Βασισμένος στη συνδρομή, ο φορέας κινητής τηλεφωνίας μπορεί να καθορίσει το ακριβές φάσμα και τους αντίστοιχους ράδιο πόρους που χρησιμοποιούνται για τέτοιες υπηρεσίες. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι εκτιμήσεων σχετικά με την προσφορά υπηρεσιών V2N. Στην πρώτη περίπτωση, αυτό παρουσιάζει μια μεγάλη ευκαιρία για φορείς κινητής τηλεφωνίας να επεκταθούν σε νέες περιοχές της αγοράς με δυνατότητα για να αντικαταστήσει το V2I με το μοντέλο V2N. Αυτό καθίσταται δυνατό με τη μεγάλη ανάπτυξη cloud και edge πλατφορμών υπολογιστών στο κινητό δίκτυο. Σε περιοχές με καλή κάλυψη δικτύου (αστικές ή πολύ πυκνοκατοικημένες περιοχές) αυτό μπορεί να επηρεάζει την καθυστέρηση στην απόδοση V2I.

Στη δεύτερη περίπτωση, μπορεί να υπάρχουν απρόσμενες επιπτώσεις από τις άλλες υπηρεσίες που μοιράζονται το ίδιο δίκτυο αφού το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεν είναι αποκλειστικά αφιερωμένο στην υπηρεσία V2X. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει δίκτυο με πτώση της συμμόρφωσης ή της ποιότητας των υπηρεσιών. Λόγω των μεγαλύτερων περιοχών κάλυψης των σταθμών βάσης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, υπάρχουν λιγότερες πιθανότητες να επιτευχθεί επαναχρησιμοποίηση του χωρικού φάσματος όπως στο V2I. Δύο RSU μπορούν να λειτουργήσουν σε απόσταση εκατό μέτρων μεταξύ τους με Sidelink στο ίδιο κανάλι και χωρίς να παρεμβάλλεται κάτι μεταξύ τους. Αυτό δεν θα ήταν είναι δυνατό με τους σταθμούς βάσης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας στην περίπτωση των V2N. Μπορεί να υπάρχουν άλλες καταστάσεις (περιοχές μη κάλυψης) που μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση των V2N. Κάποιο σύστημα 5G με βελτιώσεις όπως ο τεμαχισμός δικτύου ή ο τεμαχισμός RAN θα μπορούσε να μετριάσει ορισμένες πτυχές του προβλήματος, αλλά όχι να τις εξαλείψει πλήρως. Οι φορείς κινητής τηλεφωνίας κατά την προσφορά των υπηρεσιών του V2N αναμένουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της V2X υπηρεσίας που χρησιμοποιείται μέσω V2N θα σχετίζεται με ανταλλαγή πληροφοριών που προσφέρονται μέσω V2V ή V2I.

2.8 Θέματα ασφαλείας

Πολλοί στην αυτοκινητοβιομηχανία πιστεύουν ότι η ευρεία χρήση του C-V2X θα μπορούσε δυνητικά να σώσει χιλιάδες ζωές και να αποτρέψει εκατοντάδες χιλιάδες συγκρούσεις κάθε χρόνο. Το C-V2X προσφέρει επίσης στους κατασκευαστές αυτοκινήτων και τους φορείς εκμετάλλευσης των δρόμων μια τεχνολογία που ενισχύει την κινητικότητα, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα. Ως εκ τούτου, τα μηνύματα C-V2X που παραδίδονται με ασφάλεια αποτελούν μια πολύ σημαντική παράμετρο.

Με οποιαδήποτε μορφή τεχνολογίας επικοινωνιών, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος από κυβερνοεπιθέσεις. Ωστόσο, η επιτυχία ή η αποτυχία τέτοιων επιθέσεων

εξαρτάται συχνά από της ποιότητα της εφαρμογής του συστήματος επικοινωνίας. Το C-V2X δημιουργήθηκε από την αρχή με γνώμονα την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα και σχεδιάστηκε συνειδητά ώστε να διευκολύνει την ασφαλή εφαρμογή.

Ο έλεγχος ταυτότητας χρησιμοποιείται ευρέως στο C-V2X και σε όλα τα συστήματα επικοινωνιών παγκοσμίως. Για παράδειγμα, ο έλεγχος ταυτότητας τοποθεσίας (website) με κωδικό πρόσβασης, έλεγχος τηλεφώνου με αποτύπωμα αντίχειρα ή ο έλεγχος ταυτότητας συστήματος εργασίας (μερικές φορές με έξυπνη κάρτα). Στο σύστημα V2X, ο έλεγχος ταυτότητας έχει μοναδικές τεχνικές προκλήσεις και μοναδικές λύσεις:

- Μετάδοση: Το σύστημα είναι ένα σύστημα εκπομπής, ad-hoc δικτύωσης. Στην αρχή, κάθε χρήστης μπορεί να επικοινωνήσει, αλλά δεν είναι ρεαλιστικό να δημιουργήσει μια ασφαλή σχέση εκ των προτέρων με όλους τους χρήστες του συστήματος. Αντί αυτού, το C-V2X χρησιμοποιεί ψηφιακά πιστοποιητικά για τον έλεγχο ταυτότητας των μηνυμάτων μετάδοσης. Αυτό αποτελεί μια γνωστή τεχνολογία διαδικτύου, αν και προσαρμοσμένη για C-V2X, που επιτρέπει ένα μέρος να εμπιστεύεται τα μηνύματα ενός άλλου μέρους, ακόμη και αν τα δύο μέρη δεν έχουν επικοινωνήσει ποτέ πιο πριν. Το προσαρμοσμένο πιστοποιητικό και οι μορφές μηνύματος καθορίζονται στο IEEE 1609.2, η ανάπτυξη του οποίου οδηγήθηκε από την Qualcomm Technologies και χρησιμεύει ως το βασικό πρότυπο για το C-V2X ασφαλεία παγκοσμίως.
- Η ταυτότητα δεν είναι χρήσιμη: Ο έλεγχος ταυτότητας της τοποθεσίας μπορεί να χρησιμοποιήσει τη ταυτότητά ενός χρήστη για να αναζητήσει τα στοιχεία του λογαριασμού. Στη ρύθμιση C-V2X, η ταυτότητα ενός αποστολέα είναι επίσης δύσκολη κατά τη χρήση, υπάρχουν απλώς πάρα πολλές υπάρχουσες ταυτότητες που αλλάζουν επίσης ταχέως. Αντί αυτού, ο έλεγχος ταυτότητας αποστολέα χρησιμοποιεί το AID που αναφέρθηκε προηγουμένως, όχι την ταυτότητα του αποστολέα, για να υποδείξει ποιες δραστηριότητες εφαρμογής ο αποστολέας μπορεί να πραγματοποιήσει. Αυτό ταυτόχρονα πιστοποιεί τον αποστολέα και βοηθά το sandbox μήνυμα. Το IEEE 1609.2 καθορίζει αυτήν την προσέγγιση.
- Περιορισμένα κανάλια: Αν και το C-V2X έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού από ανταγωνιστικές τεχνολογίες, το συνολικό εύρος ζώνης που διατίθεται για επικοινωνίες V2X είναι ακόμα περιορισμένο. Το IEEE 1609.2 χρησιμοποιεί μια ειδική συμπαγή μορφή κρυπτογραφίας η οποία ονομάζεται κρυπτογραφία ελλειπτικής καμπύλης, ικανή να κρατήσει τα μεγέθη χαμηλά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Δίκτυα 4G LTE-ADVANCED και 5G

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν ήδη επωφεληθεί από το «ψηφιακό μέρισμα» που έγινε όταν μεταφέρθηκε η τηλεοπτική μετάδοση από την αναλογική στην ψηφιακή μετάδοση καθώς απελευθερώθηκε φάσμα στην περιοχή των 700 - 800 GHz συχνοτήτων. Τα χαρακτηριστικά διάδοσης αυτής της περιοχής συχνοτήτων, καθιστούν το φάσμα αυτό ιδανικό για την κάλυψη αγροτικών περιοχών και για την κάλυψη δικτύου μέσα σε ένα κτήριο. Τα δημόσια δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ανέκαθεν βασίζονταν στην αποκλειστική πρόσβαση σε αδειοδοτημένο φάσμα, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος των διάφορων επιπέδων παρεμβολών και να επιτυγχάνονται προβλεπόμενα επίπεδα απόδοσης. Το αδειοδοτημένο φάσμα θα συνεχίσει να παρέχεται και στα 5G δικτύων. Όμως, υπάρχουν μεγάλα τμήμα μη αδειοδοτούμενου φάσματος σε ελκυστικές συχνότητες, για παράδειγμα στα 5GHz, όπου τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα μπορούσαν να το εκμεταλλευτούν χρησιμοποιώντας την τεχνολογία WiFi ή LTE-Advanced. Μια πιθανότητα είναι ότι τα δίκτυα χρησιμοποιούν αδειοδοτημένο φάσμα για ισχυρές συνδέσεις ευρείας περιοχής, για παράδειγμα για τον έλεγχο του σήματος κατά την τηλεφωνική επικοινωνία, υποστηριζόμενο από τη δυναμική πρόσβαση σε μη αδειοδοτημένο φάσμα για την ενίσχυση της μετάδοσης των δεδομένων

Ακόμη και όταν συνδυαστεί με τις βελτιωμένες δυνατότητες του LTE-Advanced, αυτό το πρόσθετο φάσμα δεν θα είναι αρκετό για να ικανοποιήσει τις πιο έντονες απαιτήσεις επικοινωνίας δεδομένων. Για παράδειγμα, η παράδοση όλων των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας που απαιτούνται σε πυκνές αστικές περιοχές είναι πιθανό να χρειαστεί να μετακινηθεί στο τέλος της υψηλής συχνότητας της ζώνης των εκατοστών κύματος (κάπου μεταξύ 6GHz και 30GHz) ή στο τέλος της χαμηλής συχνότητας της ζώνης χιλιοστομετρικών κυμάτων κάπου μεταξύ 30GHz και 100GHz). Αυτές οι ζώνες προσφέρουν μεγάλη χωρητικότητα, αλλά «υποφέρουν» από χαμηλής ποιότητας χαρακτηριστικών διάδοσης και παράλληλα βασίζονται σε μικρά μεγέθη κυψελών και σε προηγμένες τεχνικές κεραίας

Ο κατακερματισμός της κατανομής του ραδιοφάσματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε κινητές συσκευές που είναι ασυμβίβαστες μεταξύ των αγορών ή έχουν διαφορετικές δυνατότητες μεταξύ των αγορών και θα μπορούσε να τεθεί σε κίνδυνο επίπεδου οικονομικής κλίμακας. Οι συνέπειες του κατακερματισμού μπορούν ήδη να παρατηρηθούν στην εφαρμογή της συνάθροισης των φορέων (carrier aggregation) στην τεχνολογία LTE, όπου κάθε συνδυασμός ζωνών συχνοτήτων πρέπει να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά στα πρότυπα και οδηγεί στην αποσπασματική εισαγωγή νέων δυνατοτήτων. Καθώς οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα κινητής

τηλεφωνίας έχουν επεκταθεί, θα είναι ζωτικής σημασίας να αναπτυχθεί ένα εναρμονισμένο πλαίσιο για τη χρήση του ραδιοφάσματος

Η επίτευξη των στόχων για τα δίκτυα 5G θα απαιτήσει διάφορες νέες τεχνικές για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των υφιστάμενων και των νέων ασύρματων τεχνολογιών. Υπάρχουν διάφορες απόψεις για το τι μπορεί να χρειαστεί. Ωστόσο, ορισμένες προσεγγίσεις εμφανίζονται ήδη στο πλαίσιο των συστημάτων 4G και είναι πιθανό να εξελιχθούν στα συστήματα 5G τα επόμενα χρόνια.

3.1 Δίκτυα τεχνολογίας 4G

Η μεθοδολογία της παγκόσμιας πιστοποίησης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας στην οποία στηρίχθηκε η ανάπτυξη των 3G δικτύων κληροδοτήθηκε και στην επόμενη γενιά, την 4η. Έτσι, για την ανάπτυξη των 4G δικτύων κινητής τηλεφωνίας δημιουργήθηκαν τα πρότυπα IMT-Advanced23 (International Mobile Telecommunications Advanced) στα οποία περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι κύριες δυνατότητες που πρέπει να έχει μία τεχνολογία έτσι ώστε να αναγνωριστεί ως 4G τεχνολογία και να ενσωματωθεί στα 4G δίκτυα, καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες που πρέπει να έχει ένα δίκτυο έτσι ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως “4G δίκτυο”. Λόγω των ανωτέρω, τα HSPA και HSPA+, παρόλο που εξέλιξαν τα υπάρχοντα 3G δίκτυα, δεν χαρακτηρίζονται ως 4G αλλά ως 3G+ τεχνολογίες, γιατί δεν είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές που καθορίζονται στα πρότυπα IMT-Advanced.

Οι προδιαγραφές και τα χαρακτηριστικά που καθορίζονται από τα πρότυπα IMT Advanced πρέπει να χαρακτηρίζουν μία τεχνολογία ώστε αυτή να θεωρείται ως “4G τεχνολογία”, να είναι:

- Δυνατότητα δυναμικής διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων του δικτύου (όπως συμβαίνει στις HSPA και HSPA+ που αναφέρθηκαν προηγουμένως), και ειδικά του εύρους των καναλιών το οποίο να μπορεί να κυμαίνεται από εύρος μικρότερο των 5MHz μέχρι και μέγιστο εύρος 40MHz, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου και τις ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών.
- Επίτευξη ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης για Downlink 100Mbps και 50Mbps για Uplink για χρήστες υψηλής κινητικότητας (μέγιστης ταχύτητας 350 km/h).
- Δυνατότητα χρήσης των δικτύων αυτών και από χρήστες με εξοπλισμό διαφορετικής τεχνολογίας ή παλαιότερης γενιάς και η δυνατότητα handover από ένα είδος δικτύου σε άλλο χωρίς τη διακοπή της σύνδεσης.

- Χρήση και των τριών μεθόδων πολύπλεξης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, συνδυαστικά.
- Να βασίζεται αποκλειστικά στη μέθοδο μεταγωγής πακέτων με χρήση των IP πρωτοκόλλων
- Υποστήριξη υψηλής ποιότητας παρεχόμενων υπηρεσιών, όπως παραδείγματος χάριν οι ευρυζωνικές υπηρεσίες που χρησιμοποιούν οι VoIP24 εφαρμογές.
- Τέλος, πρέπει να έχει φασματική απόδοση των συνδέσεων των χρηστών με το σταθμό βάσης μέχρι 15bit/sec/Hz για Downlink και 6.75 bit/sec/Hz για Uplink ενώ για περιπτώσεις εσωτερικών χώρων πρέπει να έχει φασματική απόδοση συστήματος 3bit/sec/Hz/cell για Downlink και 2.25 bits/sec/Hz/cell για Uplink.

3.2 Δίκτυα τεχνολογίας 4G ADVANCED-LTE

Ως 4G τεχνολογίες δικτύων θεωρούνται το LTE, που είναι η εξέλιξη του UMTS, και το LTE-Advanced. Το LTE, όπως και το UMTS (της τρίτης γενιάς), αναπτύχθηκε και εξελίσσεται από την 3GPP και αποτελεί την εξέλιξη των τεχνολογιών του UMTS έτσι ώστε αυτές να είναι σύμφωνες με τα πρότυπα IMT-Advanced. Και μάλιστα, το LTE, αν και προωθείται από τους παρόχους υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και συχνά χαρακτηρίζεται ως 4G τεχνολογία, λόγω του ότι δεν επιτυγχάνει τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των 100Mbps, δεν έχει αναγνωριστεί επίσημα ως 4G τεχνολογία. Ως 4G τεχνολογία έχει αναγνωριστεί επίσημα η εξέλιξη του LTE, το LTE-Advanced, το οποίο υποστηρίζει, θεωρητικά, μέχρι και ρυθμό 1Gbps για Downlink και 500Mbps για Uplink συνδέσεις. Η μορφή της αρχιτεκτονικής είναι παρόμοια με του UMTS, με τον πυρήνα του δικτύου να ονομάζεται “Enhanced Packet Core” (EPC) και να χρησιμοποιεί αποκλειστικά τη μέθοδο μεταγωγής πακέτων και τα πρωτόκολλα IP. Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN) των χρηστών ονομάζεται “Evolved UTRAN” (E-UTRAN), που αποτελεί εξέλιξη του UTRAN του UMTS και του GERAN του GSM/EDGE που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μία ακόμα σημαντική εξέλιξη είναι οι σταθμοί βάσης, οι οποίοι ονομάζονται eNodeBs (Evolved Node B) και εκτός των υπολοίπων καινοτόμων τεχνολογιών και τεχνικών που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν, μπορούν να κάνουν αυτόνομη διαχείριση των συνδέσεων των χρηστών της κυψέλης τους, ενώ οι σταθμοί βάσης των προηγούμενων γενιών ελέγχονταν από κάποιο κεντρικό σύστημα.

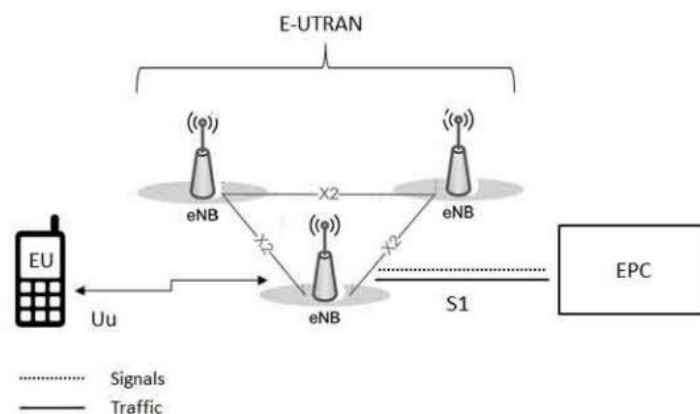
3.2.1 Αρχιτεκτονική και δομικά στοιχεία LTE

Όπως και στα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, το δίκτυο του συστήματος LTE χωρίζεται στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network – RAN), το οποίο είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία των τερματικών με τους σταθμούς βάσης και στο δίκτυο 36 κορμού (Core Network – CN), που

συνδέει τους σταθμούς βάσης με τα εξωτερικά δίκτυα. Το RAN του LTE καλείται E-UTRAN (Evolved UTRAN) και το δίκτυο κορμού είναι ο EPC (Evolved Packet Core). Το LTE διαθέτει επίπεδη αρχιτεκτονική, υπό την έννοια ότι δεν απαιτεί κάποιον κεντρικό ελεγκτή για τους σταθμούς βάσης, όπως στην περίπτωση του RNC (Radio Network Controller) των συστημάτων τρίτης γενιάς.

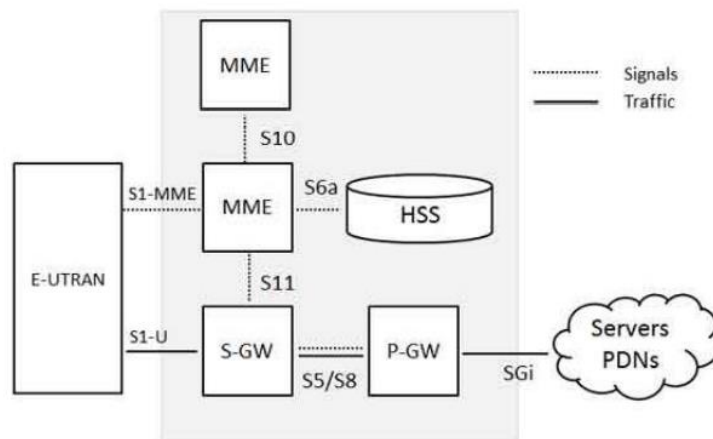
Ο E-UTRAN αποτελείται από τους σταθμούς βάσης που ονομάζονται eNB (evolved Node B) και τα τερματικά που στην ορολογία της 3GPP καλούνται UE (User Equipment). Τα UEs επικοινωνούν με κάποιον eNB μέσω της διεπαφής Uu, ενώ οι eNBs συνδέονται μεταξύ τους μέσω των διεπαφών X2 και με τον EPC μέσω της S1. Η διεπαφή Uu μεταφέρει δεδομένα χρήστη και σηματοδοσίας στις κατευθύνσεις Uplink (UL) και Downlink (DL), ενώ ο κύριος ρόλος της διεπαφής X2 είναι η σηματοδοσία και η προώθηση πακέτων μεταξύ γειτονικών eNBs σε περιπτώσεις μεταπομπής. Η διεπαφή S1 μεταφέρει τόσο δεδομένα χρήστη όσο και ελέγχου μεταξύ του E-UTRAN και του EPC.

Τα προηγούμενα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Σύνδεση στο E-UTRAN

Τα κυριότερα στοιχεία του EPC είναι η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Entity – MME), η πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway – S-GW), η πύλη του δικτύου πακέτων (Packet Data Network Gateway – P-GW) και ο οικείος εξυπηρετητής συνδρομητών (Home Subscriber Server – HSS). Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι ανωτέρω οντότητες μεταξύ τους και με το E-UTRAN απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Αρχιτεκτονική του EPC

3.3 Εισαγωγή στα δίκτυα 5G: απαιτήσεις και προτυποποίηση

Ήδη από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς είχε αρχίσει η προσπάθεια δημιουργίας ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η προσπάθεια αυτή ήταν το GSM, το οποίο εξελίχθηκε στα 4G δίκτυα LTE Advanced. Όμως, σε κάθε γενιά δικτύων υπήρχαν περισσότερα του ενός διαφορετικά δίκτυα που θεωρούνταν δίκτυα της συγκεκριμένη γενιάς. Η 5η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (5G), έχει ως έναν από τους κύριους στόχους τη δημιουργία ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου, το οποίο να ενοποιεί όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύωσης. Ένα τέτοιο δίκτυο, λόγω του ότι θα αποτελείται από πολλές διαφορετικές τεχνολογίες δικτύωσης, θα χαρακτηρίζεται ως “Ετερογενές Δίκτυο” (**HetNet - Heterogeneous Network**). Το ετερογενές αυτό δίκτυο θα ενώνει, όπως προαναφέρθηκε, όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύωσης. Κάποιες από αυτές θα είναι τα δίκτυα των παλαιότερων γενεών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δίκτυα υπολογιστών και το ενσύρματο τηλεφωνικό δίκτυο. Εκτός όμως από αυτές, θα ενσωματώνει και νέες τεχνολογίες οι οποίες βρίσκονται κοντά στο στάδιο ωρίμανσης. Χαρακτηριστικότερη τέτοια τεχνολογία δικτύωσης που είναι ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης είναι το “Διαδίκτυο Πραγμάτων” (Internet of Things-IoT). Είναι ένα δίκτυο παρόμοιο με το Διαδίκτυο, το οποίο όμως δεν συνδέει ανθρώπους μεταξύ τους αλλά συσκευές. Πλέον, σχεδόν κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται σε οποιοδήποτε τομέα της καθημερινότητας, όπως οι οικιακές συσκευές, τα μηχανήματα ενός εργοστασίου, τα κλιματιστικά και τα νέα “έξυπνα” αυτοκίνητα, είναι εφοδιασμένη με έναν μικροελεγκτή και μπορεί να λειτουργεί με αρκετή αυτονομία καθώς και να ελέγχεται από απόσταση.

Για να μπορέσει να ενσωματωθεί το IoT στα 5G δίκτυα, τα δίκτυα αυτά θα υποστηρίζουν επικοινωνία τύπου μηχανής (**Machine Type Communication**), δηλαδή την επικοινωνία ενός χρήστη με μία αυτόνομη συσκευή, ή ακόμα και μεταξύ δύο αυτόνομων συσκευών. Η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται ως “M2M” επικοινωνία (Machine-to-Machine Communication) και με τον τρόπο αυτό μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο οποιαδήποτε συσκευή, καθιστώντας εφικτό τον απομακρυσμένο έλεγχο της, σε πραγματικό χρόνο, μέσω κάποιας άλλης συσκευής αυτόματου ελέγχου, όπως παραδείγματος χάριν οι “έξυπνες συσκευές” σε ένα “έξυπνο σπίτι”.

Με την υλοποίηση της επικοινωνίας τύπου μηχανής γίνεται εφικτή και η επικοινωνία των χρηστών απευθείας, χωρίς τη χρήση ενός σταθμού βάσης (eNode-B), που ονομάζεται **D2D** (Device to Device – Συσκευή σε Συσκευή) επικοινωνία. Μέχρι και τα 4G δίκτυα η επικοινωνία των χρηστών μεταξύ τους γίνεται point-to-point, με την διαμεσολάβηση όμως του σταθμού βάσης, ο οποίος επικοινωνεί point-to-point με τους χρήστες, δημιουργώντας έτσι ένα δίκτυο με τοπολογία αστέρα. Οπότε, όλος ο όγκος δεδομένων διέρχεται μέσω του σταθμού βάσης, περιορίζοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου ανάλογα με τις δυνατότητες του σταθμού βάσης και κάθε χρήστης θα είναι συνδεδεμένος άμεσα μόνο με το σταθμό βάσης που εξυπηρετεί την περιοχή στην οποία βρίσκεται. Με την υλοποίηση όμως της D2D, δεν θα είναι απαραίτητη η διαμεσολάβηση του σταθμού βάσης και θα μπορούν δύο χρήστες να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι ένα δίκτυο πλήρως καταναμημένο. Ο σταθμός βάσης μπορεί να έχει το ρόλο του ελεγκτή της επικοινωνίας των συσκευών ή ακόμα και να μην εμπλέκεται καθόλου στη διαδικασία της επικοινωνίας των χρηστών.

Για την υλοποίηση της D2D επικοινωνίας είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες τεχνολογίες που θα χρησιμοποιούν την τεχνική Network MIMO, γνωστή και ως **Cooperative MIMO** (Co-MIMO - Συνεργατική MIMO), η οποία στηρίζεται στην επικοινωνία τύπου μηχανών και θα υποστηρίξει την ενσωμάτωση στους διαθέσιμους πόρους του δικτύου του εξοπλισμού των χρηστών, όπως ο πομπός και ο δέκτης της κάθε συσκευής, και τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης τους από όλους τους χρήστες.

Συνδυάζοντας όλες τις προαναφερθείσες τεχνολογίες και μεθόδους, σχηματίζεται μία γενική μορφή την οποία αναμένεται να έχει ένα 5G δίκτυο, δηλαδή μία γενική αρχιτεκτονική των 5G δικτύων. Αυτή καθορίζεται με βάση προτεινόμενα πρότυπα.

Η **προτυποποίηση** των 5G δικτύων γίνεται με την οικογένεια προτύπων IMT-2020 και βρίσκεται υπό ολοκλήρωση. Η οικογένεια αυτή προτύπων άρχισε να αναπτύσσεται από την ITU, με τη βοήθεια και άλλων φορέων οι οποίοι εργάζονται για την ανάπτυξη και οριστικοποίηση των τεχνολογιών που θα

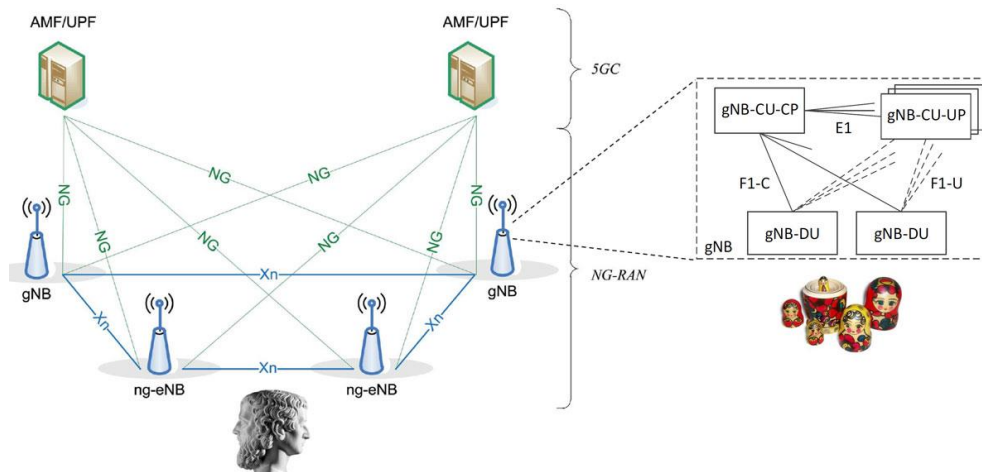
ενσωματωθούν στα 5G δίκτυα. Οι φορείς αυτοί είναι οργανισμοί και εταιρίες οι οποίες δραστηριοποιούνται στο χώρο των Τηλεπικοινωνιών είτε ως φορείς που ασχολούνται με την προτυποποίηση και την εξέλιξη των τεχνολογιών, όπως οι 3GPP28 και 3GPP2 που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και ο αντίστοιχος που δημιουργήθηκε αποκλειστικά για τα 5G δίκτυα, 5GPPP (5G Infrastructure Public Private Partnership), που είναι μία συνεργασία εταιριών και φορέων, δημόσιων και ιδιωτικών, που δραστηριοποιούνται στον τομέα των Τηλεπικοινωνιών και είναι υπό την αιγίδα του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Horizon 2020. Η ίδρυση του έγινε το 2013 με την υπογραφή του συμβολαίου συμφωνίας (Contractual Agreement) από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission-EC), που αντιπροσώπευε τους δημόσιους φορείς, και την “5GIA” (5G Infrastructure Association-5G Ένωση Υποδομών), που αντιπροσώπευε του ιδιωτικούς φορείς. Όπως και στις προηγούμενες γενιές δικτύων, έχουν τεθεί κάποια κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα δίκτυα αυτά και οι τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να αναγνωρίζονται ως 5G δίκτυα και τεχνολογίες. Έτσι λοιπόν, τα 5G δίκτυα θα είναι δίκτυα που θα έχουν τα εξής κύρια χαρακτηριστικά: 28 Η 3GPP έχει συμπεριλάβει στην έκδοση 14 (Release 14) των προτύπων της κάποιες υποψήφιες 5G τεχνολογίες, αλλά η κοινώς αποδεκτή προτυποποίηση θα γίνει από την ITU με το IMT-2020.

3.3.1. Αρχιτεκτονική δικτύων 5G

Τα δίκτυα 5G ακολουθούν σαν γενικό πλαίσιο τη λογική των προκατόχων τους σχετικά με τα κύρια δομικά τους στοιχεία, καθώς η αρχιτεκτονική τους χωρίζεται σε δύο βασικές μονάδες: το δίκτυο πρόσβασης, που για την περίπτωση του 5G ονομάζεται **Next Generation Radio Access Network (NG-RAN)** και τον πυρήνα του δικτύου ή **5G Core (5GC)**.

3.3.2. 5G Next Generation Radio Access Network

Το **Next Generation Radio Access Network** αποτελείται από δύο είδη κόμβων, τους **next Generation NodeB (gNB)** και τους **next Generation Evolved NodeB (ng-eNB)**. Οι πρώτοι παρέχουν τερματισμό των πρωτοκόλλων UP (User Plane, στρώμα δεδομένων χρήστη) και CP (Control Plane, στρώμα ελέγχου δικτύου) νέας γενιάς προς τους χρήστες, ενώ οι δεύτεροι είναι υπεύθυνοι για την επικοινωνία με τα πρωτόκολλα του E-UTRAN που αναλύθηκε στα δίκτυα LTE. Το ρόλο των διεπαφών X2 που συναντήθηκε στο LTE αναλαμβάνουν οι διεπαφές Xn, ενώ όλα τα στοιχεία του NG-RAN επικοινωνούν με το 5GC μέσω των διεπαφών NG.



Σχήμα 3.3 Σύνδεση στο 5G NG RAN

(<https://www.3gpp.org/images/articleimages/NG-RAN.jpg>)

Η ενσωμάτωση του NG-RAN στο ήδη υπάρχον δίκτυο αναμένεται να ακολουθήσει δύο στάδια. Αρχικά, οι κόμβοι του θα επικοινωνούν με τον EPC του LTE μέσω των ήδη εγκατεστημένων eNBs, δημιουργώντας μια μη-αυτόνομη έκδοση του 5G. Τελικά, με την εισαγωγή της αυτόνομης έκδοσης οι gNB και ng-eNB θα επικοινωνούν απευθείας με το δίκτυο κορμού του 5G.

3.3.3. 5G Core Network

Σε αυτήν την ενότητα θα παρέχουμε μια επισκόπηση της αρχιτεκτονικής 5G και θα περιγράψουμε τα βασικά στοιχεία 5G. Θα δείξουμε επίσης πώς η αρχιτεκτονική 5G συγκρίνεται με την τρέχουσα αρχιτεκτονική 4G.

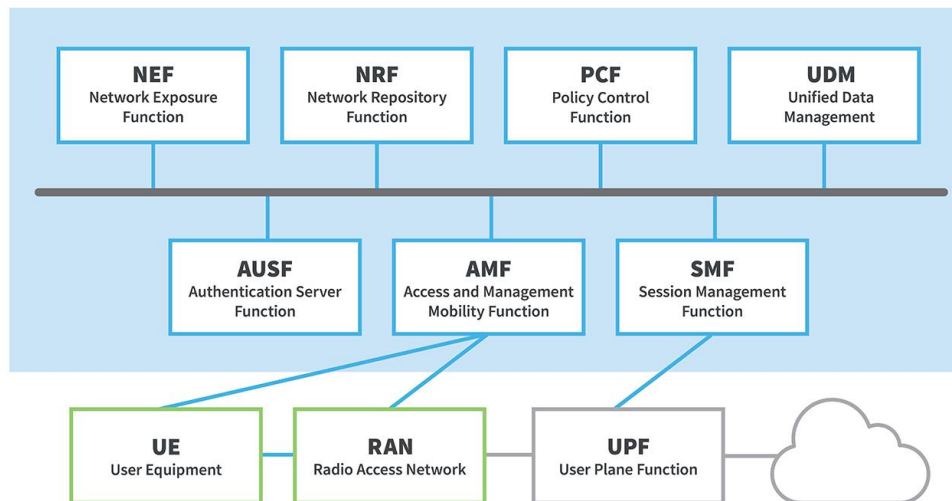
Το κεντρικό δίκτυο 5G, το οποίο επιτρέπει την προηγμένη λειτουργικότητα των δικτύων 5G, είναι ένα από τα τρία κύρια συστατικά του συστήματος 5G, γνωστό και ως 5GS (πηγή). Τα άλλα δύο συστατικά είναι το δίκτυο πρόσβασης 5G (5G-AN) και ο εξοπλισμός χρηστών (UE). Ο πυρήνας 5G χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες cloud (SBA) για να υποστηρίξει τον έλεγχο ταυτότητας, την ασφάλεια, τη διαχείριση συνεδριών και τη συγκέντρωση επισκεψιμότητας από συνδεδεμένες συσκευές, τα οποία απαιτούν πολύπλοκη διασύνδεση λειτουργιών δικτύου, όπως φαίνεται στο βασικό διάγραμμα 5G.

Τα συστατικά της αρχιτεκτονικής του πυρήνα 5G περιλαμβάνουν:

- Λειτουργία επιπέδου χρήστη (UPF)
- Δίκτυο δεδομένων (DN), π.χ. υπηρεσίες χειριστή, πρόσβαση στο Διαδίκτυο ή υπηρεσίες τρίτων
- Core Access and Mobility Management Function (AMF)
- Λειτουργία διακομιστή ελέγχου ταυτότητας (AUSF)

- Λειτουργία διαχείρισης συνεδριών (SMF)
- Λειτουργία επιλογής τεμαχίου δικτύου (NSSF)
- Λειτουργία έκθεσης δικτύου (NEF)
- Λειτουργία αποθήκευσης NF (NRF)
- Λειτουργία ελέγχου πολιτικής (PCF)
- Ενιαία διαχείριση δεδομένων (UDM)
- Λειτουργία εφαρμογής (AF)

Το ακόλουθο διάγραμμα αρχιτεκτονικής δικτύου 5G απεικονίζει πώς σχετίζονται αυτά τα στοιχεία.



Σχήμα 3.4 Αρχιτεκτονική του 5G Core

(<https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>)

Το 5G σχεδιάστηκε από την αρχή ώστε οι λειτουργίες του δικτύου να χωρίζονται ανά υπηρεσία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αυτή η αρχιτεκτονική ονομάζεται επίσης 5G core Service-based Architecture (SBA).

Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής:

- Ο Εξοπλισμός Χρήστη (UE) όπως τα smartphone 5G ή οι κυψελοειδείς συσκευές 5G συνδέονται μέσω του 5G New Network Access Network με τον πυρήνα 5G και περαιτέρω με τα Δίκτυα Δεδομένων (DN), όπως το Διαδίκτυο.
- Η λειτουργία διαχείρισης πρόσβασης και κινητικότητας (AMF) λειτουργεί ως ένα σημείο εισόδου για τη σύνδεση UE.
- Με βάση την υπηρεσία που ζητά το UE, το AMF επιλέγει την αντίστοιχη συνάρτηση διαχείρισης συνεδριών (SMF) για τη διαχείριση της περιόδου λειτουργίας χρήστη.
- Η συνάρτηση επιπέδου χρήστη (UPF) μεταφέρει την κίνηση δεδομένων IP (επίπεδο χρήστη) μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και των εξωτερικών δικτύων.

- Η λειτουργία διακομιστή ελέγχου ταυτότητας (AUSF) επιτρέπει στον AMF να πιστοποιήσει το UE και να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες του πυρήνα 5G.
- Άλλες λειτουργίες όπως η λειτουργία διαχείρισης συνεδριών (SMF), η λειτουργία ελέγχου πολιτικής (PCF), η συνάρτηση εφαρμογής (AF) και η λειτουργία διαχείρισης ενοποιημένων δεδομένων (UDM) παρέχουν το πλαίσιο ελέγχου πολιτικής, εφαρμόζοντας αποφάσεις πολιτικής και πρόσβαση σε πληροφορίες συνδρομής. τη συμπεριφορά του δικτύου.

3.3.4 Βασικές σχεδιαστικές ανάπτυξης δικτύων 5G

Ο σχεδιασμός των αρχιτεκτονικών δικτύων 5G που υποστηρίζει πολύ απαιτητικές εφαρμογές είναι πολύπλοκος. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει μια προσέγγιση που να ταιριάζει σε όλους. Το εύρος των εφαρμογών απαιτεί δεδομένα για μεγάλες αποστάσεις, μεγάλο όγκο δεδομένων ή για κάποιο συνδυασμό. Η αρχιτεκτονική 5G πρέπει να υποστηρίζει φάσμα χαμηλού, μεσαίου και υψηλού εύρους ζώνης-από αδειοδοτημένες, κοινόχρηστες και ιδιωτικές πηγές-για να προσφέρει το πλήρες όραμα 5G.

Για το λόγο αυτό, το 5G είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε ραδιοσυχνότητες που κυμαίνονται από κάτω από 1 GHz έως εξαιρετικά υψηλές συχνότητες, που ονομάζεται «κύμα χιλιοστών» (ή mmWave). Όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο πιο μακριά μπορεί να ταξιδέψει το σήμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο περισσότερα δεδομένα μπορεί να μεταφέρει.



Σχήμα 3.5 Ανάπτυξη δικτύων 4G και 5G

<https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>

Υπάρχουν τρεις ζώνες συχνοτήτων στον πυρήνα των δικτύων 5G:

- Η 5G υψηλής ζώνης (mmWave) η οποία παρέχει τις υψηλότερες συχνότητες 5G. Αυτές κυμαίνονται από 24 GHz έως περίπου 100 GHz. Επειδή οι υψηλές συχνότητες δεν μπορούν να κινηθούν εύκολα μέσα από εμπόδια, το 5G υψηλής ζώνης είναι από τη φύση του μικρό σε εύρος. Επιπλέον, η κάλυψη mmWave είναι περιορισμένη και απαιτεί περισσότερη κυψελοειδή υποδομή.
- Η μεσαία ζώνη 5G λειτουργεί στην περιοχή 2-6 GHz και παρέχει ένα επίπεδο χωρητικότητας για αστικές και προαστιακές περιοχές. Αυτή η ζώνη συχνοτήτων έχει ταχύτητες αιχμής σε εκατοντάδες Mbps.
- Η χαμηλή ζώνη 5G λειτουργεί κάτω από 2 GHz και παρέχει ευρεία κάλυψη. Αυτή η ζώνη χρησιμοποιεί φάσμα που είναι διαθέσιμο και χρησιμοποιείται σήμερα για 4G LTE, παρέχοντας ουσιαστικά μια αρχιτεκτονική LTE 5g για συσκευές 5G που είναι έτοιμες τώρα. Η απόδοση του 5G χαμηλής ζώνης είναι επομένως παρόμοια με το 4G LTE και υποστηρίζει τη χρήση για συσκευές 5G στην αγορά σήμερα.

Εκτός από τη διαθεσιμότητα φάσματος και τις απαιτήσεις εφαρμογής για λόγους απόστασης σε σχέση με το εύρος ζώνης, οι χειριστές πρέπει να λάβουν υπόψη τις απαιτήσεις ισχύος του 5G, καθώς ο τυπικός σχεδιασμός του σταθμού βάσης 5G απαιτεί διπλάσια ισχύ από έναν σταθμό βάσης 4G.

3.3.5 Απαιτήσεις σε στοιχειοκεραίες

Εκτός της χρήσης συχνοτήτων σε υψηλότερες ζώνες, με τη χρήση κυμάτων μικρότερου μήκους μειώνονται και οι διαστάσεις των κεραιών που απαιτείται να διαθέτει ο εξοπλισμός των χρηστών μιας και μία κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κύματα μήκους της ίδιας τάξης μεγέθους με τις διαστάσεις της κεραίας. Ειδικά για την περίπτωση μίας στοιχειοκεραίας, κάθε στοιχείο της μπορεί να είναι ένα δίπολο μισού μήκους από το μήκος του κύματος, δίνοντας τη δυνατότητα υλοποίησης κεραιών πολύ περισσότερων στοιχείων, οι οποίες θα έχουν πολύ βελτιωμένα χαρακτηριστικά εκπομπής και λήψης. Οι κεραίες αυτές θα ενσωματωθούν και στον εξοπλισμό του δικτύου, όπως οι σταθμοί βάσης, αλλά και στον εξοπλισμό των χρηστών.

Η μεγάλη βελτίωση των χαρακτηριστικών εκπομπής και λήψης που θα επιτευχθεί με τη χρήση κυμάτων μικρότερου μήκους με την υλοποίηση στοιχειοκεραιών περισσότερων στοιχείων θα έχει και κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Ένα πολύ βασικό είναι το ότι, στις υψηλότερες συχνότητες, οι αποσβέσεις από τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές των χαμηλότερων συχνοτήτων, μειώνοντας έτσι την απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ. Ακόμα, όταν οι εξοπλισμοί των χρηστών και του δικτύου διαθέτουν πολύ καλά χαρακτηριστικά εκπομπής, η ισχύς που θα χρησιμοποιεί ο πομπός θα είναι πολύ μικρότερη, μειώνοντας έτσι πολύ περισσότερο, σε συνδυασμό με τις μειωμένες αποσβέσεις του σήματος, την κατανάλωση ενέργειας από τον πομπό. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας ανά ψηφίο και τη βελτίωση της αποδοτικότητας ενέργειας από

πλευράς δικτύου, καθώς και την αύξηση του “χρόνου ζωής” των μπαταριών του εξοπλισμού χρήστη. Ακόμα, με καλύτερη κατευθυντικότητα της εκπεμπόμενης δέσμης από τον πομπό, θα είναι μικρότερη η πιθανότητα ένας δέκτης να λάβει ένα σήμα από άλλον χρήστη, μειώνοντας έτσι το θόρυβο στο συγκεκριμένο δίκτυο. Λόγω του μειωμένου θορύβου, θα μπορούν το συγκεκριμένο δίκτυο να το χρησιμοποιήσουν περισσότεροι χρήστες, βελτιώνοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου αλλά και την ποιότητα του σήματος των συνδεδεμένων χρηστών.

3.3.6 Πυκνές κυψέλες (Network Densification)

Η εξέλιξη των υπάρχοντων κυψελών και η δημιουργία μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας (Hyperdense small cells), δηλαδή κυψελών με μειωμένες διαστάσεις και αυξημένες δυνατότητες υποστήριξης μεγάλου πλήθους χρηστών. Με τις κυψέλες αυτές θα μπορεί να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου πολύ αλλά και να μειωθεί η εκπεμπόμενη ισχύς από τις συσκευές των χρηστών, μιας και αυτές θα βρίσκονται πιο κοντά στο σταθμό βάσης. Τέτοιες κυψέλες θα είναι δυνατόν να υλοποιηθούν ακόμα και εντός κτιρίων, την ευθύνη της εγκατάστασης και της διαχείρισης των οποίων θα μπορούν να την έχουν οι χρήστες. Και μάλιστα, με την τεχνολογία MulteFire είναι ήδη εφικτή η ύπαρξη τέτοιων κυψελών, οι οποίες μπορούν να εγκατασταθούν από τους χρήστες και όχι τους διαχειριστές του δικτύου, όπως γίνεται με ένα τοπικό ασύρματο δίκτυο υπολογιστών (με την τεχνολογία δικτύωσης WiFi).

Για την ενσωμάτωση, λοιπόν, των ανωτέρω, τα 5G δίκτυα πρέπει να έχουν την ικανότητα της αυτο-οργάνωσης έτσι ώστε μία νέα μικρή κυψέλη υψηλής πυκνότητας να μπορεί να ενσωματωθεί στο 5G δίκτυο προσαρμόζοντας τις παραμέτρους επικοινωνίας της σύμφωνα με την κατάσταση του δικτύου της περιοχής στην οποία αυτή εγκαταστάθηκε. Για να έχουν όμως την ικανότητα της προσαρμογής του δικτύου στις διάφορες αλλαγές, με χαρακτηριστικότερη τη δημιουργία μίας νέας κυψέλης υψηλής πυκνότητας σε περίπτωση μεγαλύτερης κίνησης δεδομένων και χρηστών από την συνηθισμένη, πρέπει αυτά να έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν, τουλάχιστον σε τοπικό επίπεδο, αρκετά αυτόνομα, όσον αφορά την οργάνωση του δικτύου. Να έχουν δηλαδή την ικανότητα της αυτο-οργάνωσης που αναφέρθηκε προηγουμένως, κάτι που απαιτεί την κατάργηση του μεγαλύτερου μέρους των υποδομών ελέγχου του δικτύου, οι οποίες θα υλοποιούνται προγραμματιστικά και τον έλεγχο του δικτύου θα αναλαμβάνει ένα κεντρικό λογισμικό, δημιουργώντας έτσι ένα πιο ευέλικτο και φθινό, όσον αφορά το κόστος εγκατάστασης, δίκτυο, αυξάνοντας έτσι και τις δυνατότητες αυτο-οργάνωσης του δικτύου αυτού. Και τέτοια δίκτυα θα έχουν τη δυνατότητα της προσθήκης, ανάλογα με τις ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών σε μία περιοχή, μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του συνολικού δικτύου, βελτιώνοντας την ποιότητα επικοινωνίας των χρηστών και προσανατολίζοντας την ανάπτυξη των δικτύων αυτών με βάση τις αρχές των “Πράσινων Επικοινωνιών”.

3.4 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές δικτύων 5G

Το MEC υπερτερεί σημαντικά από τα MCC συστήματα σε συγκεκριμένους τομείς εφαρμογών. Ακολούθως θα αναφερθούν κάποια από τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία αυτή συγκριτικά με το Cloud Computing.

3.4.1 Χαμηλή Καθυστέρηση

Η καθυστέρηση (*latency*) σε μια υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας είναι συνάρτηση τριών συνιστωσών:

- 1) Καθυστέρηση μετάδοσης (propagation latency)
- 2) Καθυστέρηση επικοινωνίας (communication latency)
- 3) Καθυστέρηση υπολογισμών (computation latency)

Η μετάδοση δεδομένων σε ένα MEC δίκτυο αφορά κατά κανόνα χαμηλές αποστάσεις της τάξεως μερικών εκατοντάδων μέτρων, εάν πρόκειται για μεταδόσεις D2D σε ένα small-cell δίκτυο και τυπικά όχι μεγαλύτερες του 1km σε γενικές περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις μεταδόσεις δεδομένων σε απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου και σε αποστάσεις με εύρος από δεκάδες χιλιόμετρα μέχρι διαηπειρικές διαδρομές που συναντάμε στο Cloud Computing. Σαν αποτέλεσμα, τα συστήματα MEC προσφέρουν σημαντικά λιγότερη καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων από και προς το χρήστη.

Στα MCC συστήματα η καθυστέρηση επικοινωνίας εισάγεται διότι τα δεδομένα πρέπει να περάσουν από μια σειρά κόμβων. Κάποιοι από αυτούς όπως το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (*Radio-Access Network, RAN*), το backhaul network και το Διαδίκτυο, όπου διαδικασίες όπως ο έλεγχος διακίνησης (traffic control, routing) εισάγουν σημαντική καθυστέρηση. Αντιθέτως, στην περίπτωση του MEC η επικοινωνία παραμένει και περιορίζεται στα σύνορα (edges) του δικτύου αποφεύγοντας έτσι τον ανωτέρω κίνδυνο.

Τέλος, ένα MCC σύστημα διαθέτει υπολογιστική ισχύ που υπερτερεί σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο MEC κατά πολλές τάξεις μεγέθους. Όμως την ίδια στιγμή το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται από έναν αριθμό ενεργών χρηστών επίσης σημαντικά μεγαλύτερο. Σαν αποτέλεσμα, ένας Cloud Server μπορεί να εισάγει καθυστέρηση στην εκτέλεση μιας εφαρμογής καθώς αναζητεί ελεύθερους πόρους για να την εκτελέσει. Αντιθέτως, ένας Base Station (BS) που μπορεί να χρησιμοποιεί ένα MEC δίκτυο διαχειρίζεται τις λιγότερες αιτήσεις για εκτέλεση εφαρμογών που δέχεται σε μικρότερο χρόνο. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, πως οι σύγχρονοι BSs που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία του 5G και του MEC μπορεί να μην προσφέρουν τους πολυάριθμους πόρους ενός Cloud συστήματος, αλλά διαθέτουν υπολογιστική ισχύ ικανή να εκτελέσει επαρκώς απαιτητικές εφαρμογές και διεργασίες.

3.4.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας

Ένα διαχρονικό πρόβλημα των φορητών συσκευών τεχνολογίας αποτελεί η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, ώστε να διατηρούν υψηλό επίπεδο αυτονομίας. Επιπλέον, οι σύγχρονες συσκευές προσφέρουν ασύρματη συνδεσιμότητα χρησιμοποιώντας πληθώρα ανάλογων τεχνολογιών (λ.χ. Bluetooth, NFC, Wi-Fi) η χρήση των οποίων απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του MEC, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί η δυνατότητα μεταφοράς της εκτέλεσης μιας διεργασίας από τη συσκευή ενός χρήστη σε έναν διακομιστή MEC. Με αυτό τον τρόπο, ο υπολογιστικός φόρτος που υπό άλλες συνθήκες θα βάραινε τη συσκευή του χρήστη αυξάνοντας έτσι την κατανάλωση της αποθηκευμένης της ενέργειας μεταφέρεται στην άκρη του δικτύου, ώστε να εκτελεστεί εκεί. Ενδεικτικά, πειράματα έχουν δείξει πως η μετάθεση διεργασιών σε διακομιστές MEC από συσκευές που εκτελούν Augmented Reality (AR) εφαρμογές μπορεί να αυξήσει την αυτονομία της μπαταρίας τους από 30 έως 50 τοις εκατό.

3.4.3 Επίγνωση Γενικού Πλαισίου

Με τον όρο επίγνωση γενικού πλαισίου (Context-Awareness) περιγράφεται η δυνατότητα ενός διακομιστή MEC να χρησιμοποιεί την πρόσβασή του σε πολλαπλές συσκευές συνδεδεμένες σε αυτόν, ώστε να αντλήσει δεδομένα σχετικά με πληροφορίες, όπως η τοποθεσία και οι συνθήκες περιβάλλοντος του χρήστη. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόσει τις υπηρεσίες του στις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη. Εφαρμογές που βασίζονται σε τέτοιου είδους δεδομένα μπορούν έτσι να εκτελεστούν αποδοτικά βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη και την ποιότητα των υπηρεσιών.

3.4.4 Ιδιωτικότητα/Ασφάλεια

Το μοντέλο του MCC υπαγορεύει τη συγκέντρωση μεγάλου αριθμού πληροφοριών χρηστών σε μια κεντρική τοποθεσία, το Cloud. Πλατφόρμες όπως το Microsoft Azure ή το Amazon Web Services αποτελούν κόμβους συγκέντρωσης δεδομένων σε απομονωμένα data centers καθιστώντας τα έτσι ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις ή απώλειες λόγω δυσλειτουργίας του λογισμικού. Επιπλέον, οι χρήστες καλούνται να παραχωρήσουν το δικαίωμα διαχείρισης των προσωπικών τους δεδομένων σε εξωτερικούς φορείς. Αντιθέτως, η κατανομημένη φύση των διακομιστών MEC καθώς και η σαφώς χαμηλότερη συγκέντρωση δεδομένων που προσφέρουν τους καθιστούν λιγότερο πιθανούς στόχους μιας κακόβουλης επίθεσης μέσω του δικτύου. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να διαθέτουν ιδιωτικά υπολογιστικά νέφη μικρής κλίμακας (small-scale Cloudlets) μέσω των

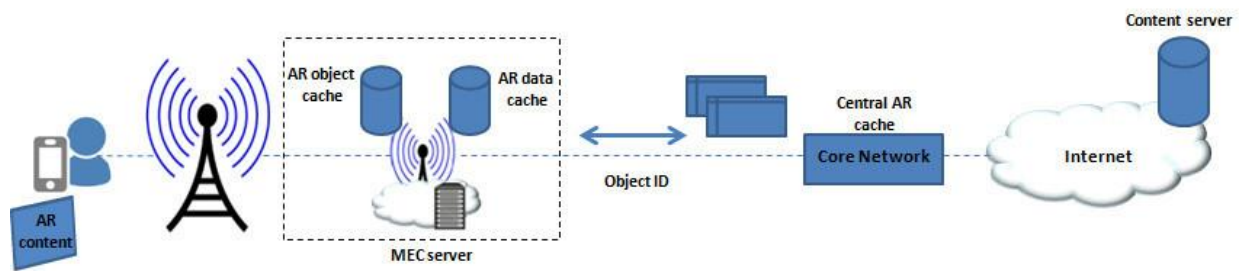
διακομιστών MEC. Η διαχείριση της προσβασιμότητας σε αυτά, θα υπόκειται στους ίδιους και όχι σε εξωτερικούς φορείς.

Οι ποικίλες εφαρμογές αυτές χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα του MEC προσφέρουν υψηλό επίπεδο QoS, καθώς εκμεταλλεύονται βέλτιστα τα μοναδικά πλεονεκτήματα που αυτή προσφέρει. Συγκεκριμένα, θα αναφερθούν οι περιπτώσεις της **επαυξημένης πραγματικότητας** (*Augmented Reality, AR*), της **έξυπνης επιτάχυνσης παροχής βίντεο** (*Intelligent Video Streaming Acceleration*), των **διασυνδεδεμένων έξυπνων αυτοκινήτων** (*Connected Smart Cars*) και τέλος του **Internet of Things (IoT)**.

3.4.5 Επαυξημένη πραγματικότητα

Η τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας αναλύει ένα πραγματικό περιβάλλον και το εμπλουτίζει με ψηφιακά προβαλλόμενες πληροφορίες όπως ήχος, βίντεο, εικονικά γραφικά και δεδομένα GPS. Για παράδειγμα, ένας επισκέπτης μουσείου, γκαλερί, αρχιτεκτονικού μνημείου ή αθλητικού γεγονότος μπορεί να επωφεληθεί άμεσα από αυτή την τεχνολογία. Ο χρήστης μπορεί στρέφοντας τη συσκευή του προς ένα σημείο ενδιαφέροντος, να λάβει στην οθόνη του δεδομένα σχετικά με την εικόνα που απεικονίζει η κάμερά του. Στην περίπτωση του εκθέματος ενός μουσείου ή μιας γκαλερί, ο χρήστης μπορεί να πληροφορηθεί σχετικά με το ιστορικό του υπόβαθρο ή τον καλλιτέχνη που το δημιούργησε. Η εφαρμογή μπορεί να αναγνωρίσει στην περίπτωση ενός αγώνα μπάσκετ έναν παίκτη και να πληροφορήσει με γραφικό το χρήστη για τα στατιστικά του στον εν λόγω αγώνα.

Τέτοιου είδους υπηρεσίες απαιτούν τη χρήση μιας εφαρμογής, η οποία θα λαμβάνει τα δεδομένα που καταγράφει η κάμερα του χρήστη και μέσω αυτών εξάγει συμπεράσματα σχετικά με τη θέση και τον προσανατολισμό του. Η εφαρμογή οφείλει να προσαρμόσει το output της καταλλήλως και σε πραγματικό χρόνο αν τα δεδομένα αυτά αλλάξουν στην περίπτωση που ο χρήστης μετακινηθεί. Η εκτέλεση μιας τέτοιας υπηρεσίας σε MEC πλατφόρμα αντί του cloud αποδεικνύεται άκρως αποδοτικότερη, καθώς το χαμηλό latency στη μετάδοση της πληροφορίας και η δυνατότητα ταχείας επεξεργασίας δεδομένων σε μικρό χρόνο βοηθούν στην άμεση ενημέρωση του interface σε πραγματικό χρόνο ανεξάρτητα των διαρκών αλλαγών στη θέση και τον προσανατολισμό του χρήστη. Η διαδικασία που μόλις περιεγράφηκε φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 MEC στην επαυξημένη πραγματικότητα

3.4.6 Έξυπνη επιτάχυνση παροχής βίντεο

Τα διαδικτυακά μέσα όπως οι υπηρεσίες παροχής βίντεο χρησιμοποιούν για την ανταλλαγή δεδομένων το **Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου (HyperText Transfer Protocol, HTTP)** πάνω από το γνωστό **Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς) (Transmission Control Protocol, TCP)**. Η χωρητικότητα του ραδιοδικτύου μπορεί να περάσει από αλλαγές της τάξεως πολλών μονάδων μέτρησης μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, εξαιτίας της διαρκούς σύνδεσης και αποσύνδεσης χρηστών σε αυτό. Το πρωτόκολλο TCP είναι πιθανό να μην μπορεί έτσι να προσαρμοστεί στις συνεχώς εναλλασσόμενες αυτές συνθήκες, οδηγώντας σε αναποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση μιας εφαρμογής επιταχυντή που θα τρέχει σε ένα διακομιστή MEC.

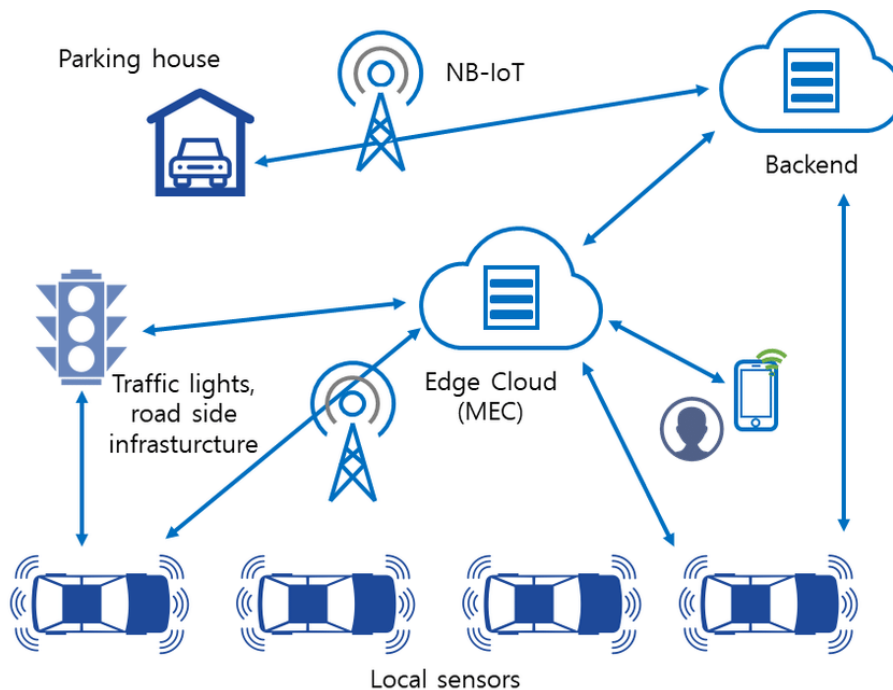
Ο επιταχυντής αυτός παρέχει στον εξυπηρετητή βίντεο την πληροφορία της διαθεσιμότητας σχετικά με τη διεκπεραιωτική ικανότητα της downlink διεπαφής. Ο εξυπηρετητής προσαρμόζει κατάλληλα το ρυθμό μετάδοσης προς κάθε χρήστη, με τρόπο ώστε η διαθεσιμότητα του δικτύου να χρησιμοποιείται βέλτιστα, ενώ ταυτόχρονα βοηθάει το πρωτόκολλο TCP να πραγματοποιεί σωστό έλεγχο συμφόρησης.

3.4.7 Διασυνδεδεμένα Έξυπνα Αυτοκίνητα

Η τεχνολογία των έξυπνων αυτοκινήτων γνωρίζει τα τελευταία χρόνια σημαντική άνθηση και ολοένα αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η επικοινωνία μεταξύ οχήματος και αισθητήρων παροχής πληροφοριών σχετικά με τη γεωμετρία του οδικού δικτύου, των καιρικών συνθηκών και της κίνησης γειτονικών οχημάτων, είναι κομβικής σημασίας για την ασφάλεια του οδηγού. Ένα έξυπνο όχημα μπορεί να προσφέρει στον οδηγό πληθώρα άλλων χαρακτηριστικών εκτός του προφανούς παραδείγματος της αυτόνομης οδήγησης, όπως εύρεση σημείου στάθμευσης και συστήματα ψυχαγωγίας.

Καθώς η δημοφιλία των μέσων αυτών αυξάνεται ο αριθμός τους θα πληθαίνει, όπως και ο όγκος των εισερχόμενων εξ αυτών δεδομένων.

Γίνεται αντιληπτό πως η διασύνδεση των έξυπνων οχημάτων μεταξύ τους αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την πλήρη εκμετάλλευση της εν λόγω τεχνολογίας. Κάθε μονάδα ξεχωριστά λειτουργεί σαν κόμβος συλλογής πληροφοριών, δημιουργώντας έτσι ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων οχημάτων, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας το δίκτυο LTE (Long-Term Evolution). Στους σταθμούς βάσης του LTE φιλοξενούνται διακομιστές MEC οι οποίοι δεχόμενοι όλα αυτά τα δεδομένα, συμβάλλουν στην επεξεργασία και την άμεση αποστολή τους στους χρήστες. Έτσι, ένα έξυπνο όχημα μπορεί να βελτιστοποιήσει την ασφάλεια και την αξιοπιστία των συστημάτων του χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα του MEC να προσφέρει πληροφορία σε πραγματικό χρόνο. Στο ακόλουθο Σχήμα 3.7 φαίνεται συνοπτικά η διαδικασία που μόλις περιεγράφηκε:

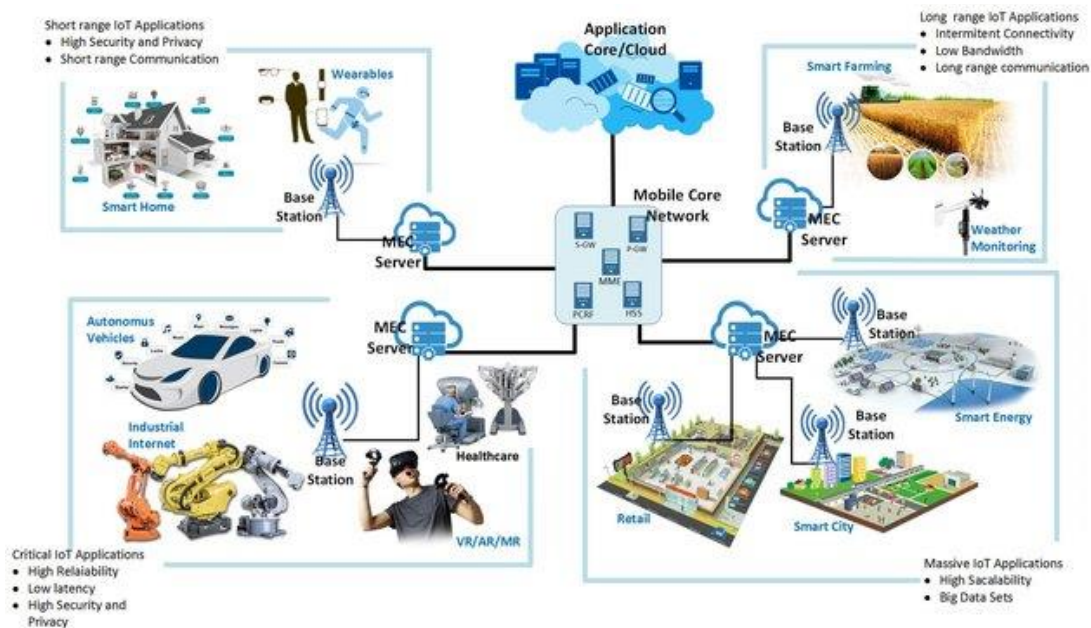


Σχήμα 3.7 MEC σε διασυνδεδεμένα οχήματα

3.4.8 Internet of Things

Ο όρος Internet of Things (*IoT*) αναφέρεται στη διασύνδεση (μέσω του διαδικτύου) πληθώρας συσκευών (λ.χ. οικιακές συσκευές, οχήματα, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα). Οι συσκευές αυτές φέρουν κάποιο τύπο λογισμικού ή αισθητήρων, με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Οι συσκευές αυτές διαθέτουν σε αρκετές περιπτώσεις υπολογιστικούς πόρους περιορισμένων δυνατοτήτων και αποθηκευτικής ικανότητας. Ως συνέπεια η σύνδεσή τους με κάποιον εξωτερικό εξυπηρετητή

με τον οποίο θα συνδέονται μέσω ενός δικτύου ασύρματης μετάδοσης, κρίνεται αναγκαία. Η τεχνολογία MEC προσφέρει αυτούς ακριβώς τους εξυπηρετητές, οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι στους σταθμούς βάσης του LTE δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, οι εφαρμογές IoT μπορούν να εκτελούνται άμεσα στους διακομιστές MEC αναλύοντας τα δεδομένα που δέχονται από τις διάφορες συσκευές, εκτελώντας τη μεταξύ τους επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, εκμεταλλευόμενες το χαμηλό latency που προσφέρουν οι MEC πλατφόρμες. Η δυναμική αυτή διαδικασία φαίνεται συνοπτικά στο ακόλουθο Σχήμα 3.8.

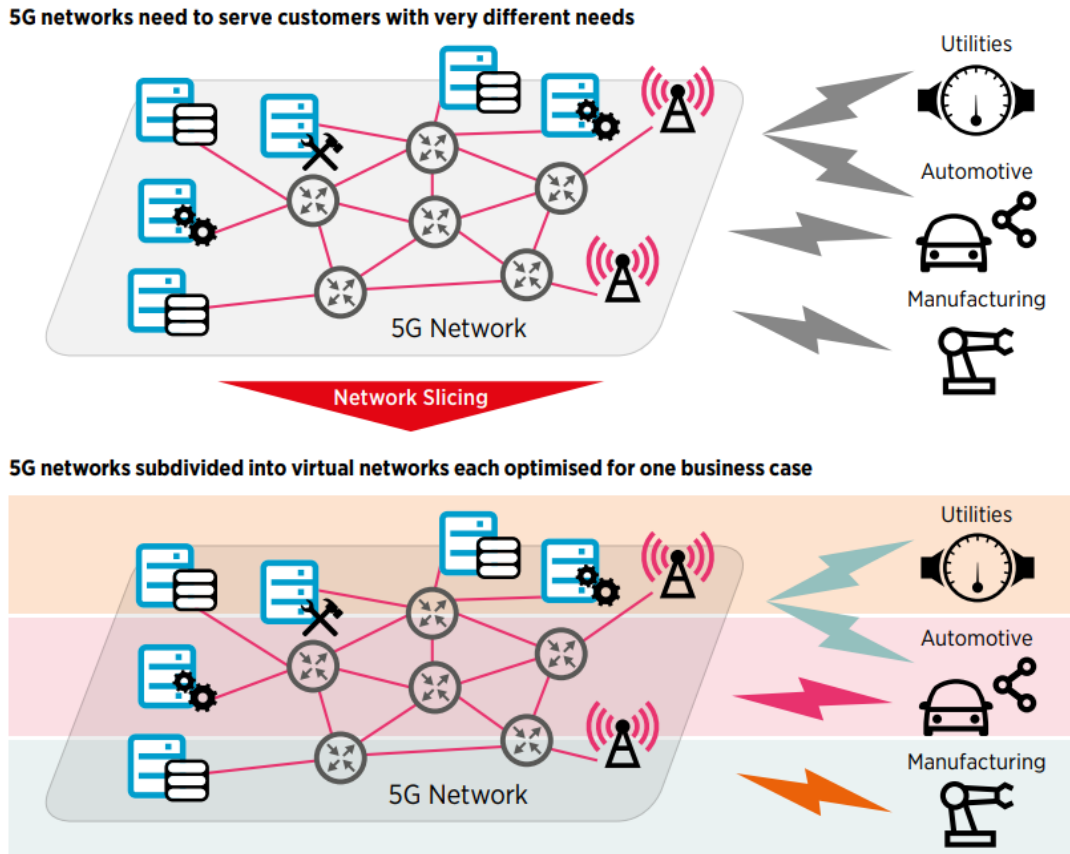


Σχήμα 3.8 MEC σε IoT εφαρμογές

3.6 Ανάγκη (απαίτηση) για Τεμαχισμό Δικτύου (Network Slicing)

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου, ο βασικότερος στόχος της ανάπτυξης των 5G δικτύων είναι η ενοποίηση όλων των υπάρχοντων τεχνολογιών δικτύωσης σε ένα ενιαίο και ετερογενές δίκτυο. Για την επίτευξη του στόχου αυτού αλλά και για να ικανοποιηθούν οι διαφορετικές (μεταξύ τους) εφαρμογές (προηγούμενο εδάφιο), εκτός των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, έχει προταθεί η ιδέα του τεμαχισμού του δικτύου (Network Slicing) ως λύση για την επίτευξη της καλύτερης διαχείρισης του δικτύου και των πόρων αυτού. Η ιδέα αυτή είναι σχετικά απλή. Ένα “τεμάχιο δικτύου” (Network Slice) ορίζεται ως ο συνδυασμός συγκεκριμένων λειτουργιών, εφαρμογών αλλά και πόρων που μπορεί να προσφέρει ένα ασύρματο δίκτυο, ο οποίος θα ορίζει ένα “προφίλ” δικτύου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά έτσι ώστε να εξυπηρετούνται καλύτερα οι ανάγκες των χρηστών του δικτύου αυτού. Τέτοιοι συνδυασμοί θα μπορούν να ορίζουν ποικίλα εικονικά δίκτυα πάνω στην κοινή υποδομή του πραγματικού δικτύου, τα “τεμάχια δικτύου”, όπου κάθε συνδυασμός θα

εξυπηρετεί συγκεκριμένες ανάγκες των χρηστών. Έτσι, το Network Slicing θα επιτρέψει στους παρόχους υπηρεσιών δικτύωσης να έχουν μία φυσική κοινή υποδομή δικτύου και πάνω σε αυτήν να υλοποιηθούν πολλά εικονικά δίκτυα τα οποία να εξυπηρετούν αποδοτικότερα τις διάφορες ανάγκες των χρηστών τους, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Τεμαχισμός δικτύου (network slicing)

Στο προηγούμενο Σχήμα 3.9, στο πάνω μέρος παρατίθεται αρχικά η υποδομή και οι πόροι ενός 5G δικτύου στα αριστερά και οι “χρήστες” του δικτύου αυτού, στα δεξιά, που ως “χρήστες” θεωρούνται διάφορες εφαρμογές έξυπνων συσκευών (Utilities), εφαρμογές αυτοκίνησης και κινούμενων χρηστών (Automotive) καθώς και βιομηχανικές εφαρμογές (Manufacturing). Το 5G δίκτυο αυτό είναι ενιαίο και όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν όλους τους πόρους του δικτύου και συνδέονται με το δίκτυο αυτό, έχοντας τα ίδια χαρακτηριστικά σύνδεσης. Στο κάτω μέρος του σχήματος παρατίθεται ένα παράδειγμα του πως θα μπορούσε να εφαρμοστεί η μέθοδος τεμαχισμού του δικτύου για τη βελτίωση της εξυπηρέτησης των εν λόγω χρηστών. Έτσι, “τεμαχίζοντας” το δίκτυο μπορούν να ανατεθούν διαφορετικοί πόροι για κάθε εφαρμογή, παρέχοντας έτσι μία σύνδεση με καταλληλότερα χαρακτηριστικά.

Οι διάφορες εφαρμογές (Utilities) καθώς και οι εφαρμογές αυτοκίνησης (Automotive) που αφορούν το IoT (Internet of Things) θα μπορούν να συνδέονται στο IoT μέσω κατάλληλης για τις συγκεκριμένες εφαρμογές

σύνδεσης μέσω του “IoT slice” ενώ κάποια άλλη εφαρμογή ή κάποιος χρήστης που θα απαιτεί ευρυζωνική σύνδεση, θα μπορεί να συνδεθεί μέσω του “Broadband slice”. Τέλος, οι βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν μικρό χρόνο απόκρισης μπορούν να συνδεθούν μέσω του “Low latency slice”.

Με την τεχνική, λοιπόν, του Network Slicing μπορεί κάποιος πάροχος να χρησιμοποιεί τους ίδιους πόρους δικτύου για την υλοποίηση εικονικών δικτύων με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών καθώς και την καλύτερη απόδοση της χρήσης των πόρων του δικτύου. Εκτός των ανωτέρω, με το Network Slicing μπορεί να δημιουργηθεί κάποιο τεμάχιο δικτύου το οποίο να χρησιμοποιεί πόρους ακόμα και από διάφορους παρόχους, αν είναι ανάγκη, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών τους. Για να γίνει όμως εφικτό αυτό πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κοινοί πόροι και η φυσική υποδομή του δικτύου και, εντοπίζοντας τις κοινές λειτουργίες που χρειάζεται κάθε χρήστης καθώς και τους πόρους που πρόκειται, ή είναι δυνατόν, να χρησιμοποιηθούν, σχεδιάζεται το ζητούμενο τεμάχιο δικτύου (network slice).

Η μέθοδος του Network Slicing πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στα 5G δίκτυα που πρόκειται να υλοποιηθούν. Τα σενάρια χρήσης της μεθόδου αυτής είναι κυρίως δύο. Το πρώτο αφορά την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών και προβλέπει τη δημιουργία κατάλληλων “τεμαχίων δικτύου” τα οποία να “ακολουθούν” τις ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών των δικτύων αυτών. Η βασική ιδέα αφορά τη μελέτη της χρήσης του συγκεκριμένου δικτύου και την δημιουργία πολλών διαφορετικών “τεμαχίων” όπου κάθε διαφορετικό τεμάχιο να προσφέρει διαφορετικό τύπο υπηρεσιών και να εγγυάται την ποιότητα συγκεκριμένων υπηρεσιών “QoS” (Quality of Service). Έτσι, κάθε πάροχος θα προσφέρει συγκεκριμένων παραμέτρων τεμάχια δικτύου από τα οποία θα μπορεί ένας χρήστης να επιλέξει τον τρόπο επικοινωνίας του. Το δεύτερο σενάριο αφορά τη χρήση της μεθόδου Network Slicing για την καλύτερη αξιοποίηση των υπαρχόντων πόρων ενός δικτύου. Στο κομμάτι αυτό, η βασική ιδέα είναι η εικονικοποίηση του δικτύου μέσω του οποίου έχει ασύρματη πρόσβαση ο χρήστης στις υποδομές του δικτύου, του RAN (Radio Access Network). Με τον τρόπο αυτό, κάποιο RAN θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από άλλους φορείς, κάνοντας καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση της φυσικής υποδομής του δικτύου, μιας και αυτή χρησιμοποιείται από περισσότερους του ενός παρόχους. Στην ουσία, με το σενάριο αυτό, έχει δημιουργηθεί μία υποδομή δικτύου από έναν πάροχο, ο οποίος εκχωρεί κάποια από τα τεμάχια του δικτύου του σε άλλους παρόχους, οι οποίοι μπορούν να παρέχουν διάφορες υπηρεσίες στους χρήστες τους σαν να είχαν κάποιο αυτόνομο δίκτυο το οποίο διαχειρίζονταν. Με τον τρόπο αυτό βελτιστοποιείται η χρήση του δικτύου και μειώνεται το γενικό κόστος υλοποίησης ενός τέτοιου δικτύου.

3.7 Network Function Virtualization – NFV

Η τεχνολογία NFV εξαλείφει την εξάρτηση μεταξύ μιας δικτυακής λειτουργίας (Network Function) με τον απαραίτητο εξειδικευμένο υπολογιστή για την

υλοποίηση της -όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά φυσικά δίκτυα, δημιουργώντας ένα περιβάλλον εκτέλεσης και διαχείρισης των διασυνδέσεων για τις εικονικές δικτυακές λειτουργίες (virtual network functions). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαμοιρασμό του υλικού του υπολογιστή από διαφορετικές VNFs (virtual network functions) με τη μορφή των VMs (Virtual Machines). Επιπλέον, η συγκέντρωση του συνολικού υλικού του υπολογιστή ευνοεί το μαζικό και εύκολο διαμοιρασμό της NFV υποδομής, σχηματίζοντας τους πόρους NFVI (Network Function Virtualization Infrastructure), φαινόμενο που παρατηρείται και στο υπολογιστικό νέφος. Όπως και με τις υπηρεσίες του υπολογιστικού νέφους, η τεχνολογία NFV δημιουργεί επιχειρηματικά μοντέλα και ευκαιρίες αντίστοιχα των IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Platform as a Service) και SaaS (Software as a Service) του νέφους. Για παράδειγμα, ο πάροχος μιας VNF δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιοκτήτης της VNF υποδομής που απαιτείται για την υλοποίηση και τη λειτουργία της VNF.

Με την τεχνολογία Εικονικών Δικτύων, διαχωρίζεται ο ρόλος των παραδοσιακών παρόχων ίντερνετ (Internet Service Providers) και δημιουργούνται δύο νέα επιχειρηματικά πεδία ανεξάρτητα μεταξύ τους: α) οι InPs (Infrastructure Providers), οι οποίοι διαχειρίζονται τη φυσική υποδομή του δικτύου και οι β) SPs (Service Providers), οι οποίοι δημιουργούν εικονικά δίκτυα συναθροίζοντας πόρους από διαφορετικούς InPs και προσφέροντας ολοκληρωμένες υπηρεσίες.

Πιο συγκεκριμένα οι InPs εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου, με τη μορφή κέντρων δεδομένων (data centers) και φυσικών δικτύων. Πάνω σε αυτούς τους πόρους, υλοποιούνται οι εικονικοί πόροι οι οποίοι προσφέρονται σε διαφορετικούς SPs μέσω μιας προγραμματιζόμενης διασύνδεσης. Επίσης οι InPs, μπορούν να αποφασίσουν με ποιο τρόπο θα διατεθούν οι διαθέσιμοι διαμοιραζόμενοι πόροι στους SPs. Ένας InP μπορεί να χρησιμοποιεί δημόσια κέντρα δεδομένων ή ιδιωτικούς διακομιστές όπως διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι. Αν ένας InP δεν είναι ικανός να προσφέρει τους απαραίτητους πόρους σε έναν SP για να υλοποιήσει την υπηρεσία του, μπορούν να γίνουν συμφωνίες έτσι ο SP να λαμβάνει πόρους από 2 διαφορετικούς InPs προκειμένου να συμπληρώσει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων. Οι SPs νοικιάζουν πόρους από πολλαπλούς InPs προκειμένου να δημιουργήσουν και να εγκαταστήσουν εικονικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας τους διαμοιραζόμενους πόρους που τους δόθηκαν για να προσφέρουν στους πελάτες τους ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Κάθε εικονικό δίκτυο αποτελείται από εικονικούς κόμβους οι οποίοι συνδέονται με εικονικές συνδέσεις. Ένας εικονικός κόμβος είναι ένα στοιχείο λογισμικού που εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης. Μια εικονική σύνδεση είναι μια λογική σύνδεση μεταξύ 2 εικονικών κόμβων, η οποία διαθέτει δυνατότητα να αλλάζει με δυναμικό τρόπο τις ιδιότητες της. Κάθε εικονικός κόμβος φιλοξενείται σε ένα φυσικό κόμβο ενώ κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα εικονικά δίκτυα, διαμοιράζοντας τους πόρους τους σε άλλους SPs δίνοντας τους την εικόνα ότι πρόκειται για έναν εικονικό InP. Ένας SP μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε άλλους SPs. Ακόμη οι πάροχοι υπηρεσιών προσφέρουν υλοποιήσεις λογισμικού για NFs (Network Functions).

3.8 Software Defined Network (SDN)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε αυτό το κεφάλαιο, οι στόχοι που έχουν τεθεί για τα 5G δίκτυα, απαιτούν την εισαγωγή νέων τεχνολογιών που αφορούν το σχεδιασμό αλλά και τη διαχείριση των ασύρματων δικτύων. Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των έξυπνων συσκευών, η ανάγκη για αποδοτική εκμετάλλευση των υπαρχόντων πόρων, το IoT κ.α., καθιστούν επιτακτική ανάγκη την πραγμάτωση σημαντικών αλλαγών στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τις τηλεπικοινωνίες μέχρι σήμερα. Η χρήση μικρών κυψελών και της τεχνολογίας UDN είναι το πρώτο βήμα προς την ικανοποίηση των απαιτήσεων του 5G σε πόρους και σε RANs. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μικρές κυψέλες λειτουργούν σαν σταθμοί βάσης χαμηλής κατανάλωσης, όπου τοποθετούνται μαζί με τις παραδοσιακές μακροκυψέλες σε περιοχές όπου βρίσκονται πολλοί χρήστες, προκειμένου να αυξήσουν τον αριθμό των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετούνται στις περιοχές αυτές. Ωστόσο, η τεχνολογία των μικρών κυψελών παρά την επέκταση του διαθέσιμου φάσματος που επιτυγχάνει, εισάγει και προβληματισμούς σχετικά με τη διαχείριση των πόρων ασύρματης πρόσβασης καθώς και με τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών τα οποία δεν είναι στατικά ούτε ομογενή. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να προκληθούν παρεμβολές μεταξύ των μικρών κυψελών και των μακροκυψελών ή ακόμα παρεμβολές και μεταξύ μικρών κυψελών. Τα μελλοντικά δίκτυα και οι διατιθέμενες από αυτά υπηρεσίες, πρέπει όχι απλώς να ορίζονται με τη χρήση λογισμικού αλλά να μπορούν να προγραμματίζονται και να είναι ικανά να υποστηρίζουν πολλούς διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών στους οποίους ανατίθενται δυναμικά πόροι, ενώ παράλληλα θα απλοποιείται η διαχείριση της ετερογενούς υποδομής του δικτύου.

Η ανάγκη να αντιμετωπίσουμε τα προαναφερθέντα προβλήματα αλλά και να έχουμε αποδοτική εφαρμογή μικρών κυψελών, μας οδήγησε στο σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής όπου οι σταθμοί βάσης του δικτύου θα είναι άμεσα προγραμματιζόμενοι και θα υπάγονται υπό το λογικό έλεγχο ενός κεντροποιημένου ελεγκτή. Με γνώμονα την ανωτέρω «διάταξη» δημιουργήθηκε η τεχνολογία SDN η οποία έρχεται για να επαναπροσδιορίσει τον τρόπο που σχεδιάζαμε τα δίκτυα έως σήμερα. Πιο συγκεκριμένα, η κύρια ιδέα πίσω από το SDN είναι να μετακινηθεί το επίπεδο ελέγχου έξω από τους μεταγωγείς (switches) και να γίνεται ο έλεγχος των δεδομένων εξωτερικά, μέσω μιας λογικής οντότητας λογισμικού που ονομάζεται ελεγκτής. Περιγράφει τα στοιχεία, τις παρεχόμενες λειτουργίες και το πρωτόκολλο για τη διαχείριση του επιπέδου προώθησης από τον ελεγκτή μέσω ενός ασφαλούς καναλιού. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφονται οι κοινές απαιτήσεις των πινάκων προώθησης για την πλειοψηφία των switches και των πινάκων ροής τους. Αυτή η συγκεντρωτική δομή κάνει τον ελεγκτή κατάλληλο να εκτελέσει τις λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω του κεντροποιημένου

επιπέδου ελέγχου. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών NFV και SDN, φαίνεται ότι οδηγεί στη διαμόρφωση ενός νέου επιχειρηματικού περιβάλλοντος δημιουργώντας ευκαιρίες για δικτυακούς παρόχους, SPs, προγραμματιστών ιστοσελίδων και για παρόχους εξοπλισμού. Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί, ότι οι τεχνολογίες SDN και NFV οι οποίες αποτελούν έναν τρόπο για τη δημιουργία εικονικών λειτουργιών του δικτύου και εκτελούνται σε απλούς διακομιστές, δεν πρέπει να μπερδεύονται. Ο συνδυασμός τους μπορεί να αποφέρει πολλά οφέλη τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια ωστόσο οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι μεταξύ τους διαφορετικές και ανεξάρτητες.

3.8.1 Αρχιτεκτονική SDN

Ο διαχωρισμός του ελέγχου από τις συσκευές προώθησης πακέτων, όπου μέχρι πρότινος ήταν στενά συνδεδεμένος με τις δικτυακές συσκευές, επιτρέπει την αξιοποίηση των δικτυακών συσκευών ανεξαρτήτως της φυσικής τους υπόστασης, την απομακρυσμένη διαχείρισή τους και το χειρισμό τους ως εικονικές οντότητες. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων (network operators) να διαχωρίζουν σε κομμάτια το υπάρχον δίκτυο και να δημιουργούν λογικές υπό-οντότητες του δικτύου (virtual networks). Ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου (Control Plane) και του επιπέδου δεδομένων (Data Plane) αίρει πολλούς περιορισμούς που δημιουργούνταν από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική των δικτύων όπως [29] η κλειστή αρχιτεκτονική, καθώς κάθε συσκευή διαθέτει δικό της λογισμικό, δικούς της μηχανισμούς διαμόρφωσης και δικές του παραμέτρους. Η καινοτομία είναι περιορισμένη, γιατί είναι δύσκολο να εισάγεται συνεχώς νέο λογισμικό ή να προσφέρονται νέες υπηρεσίες χωρίς την επένδυση του παρόχου. Οι ίδιοι οι πάροχοι ελέγχουν το ρυθμό της καινοτομίας, ενώ παράλληλα ενυπάρχει και το πρόβλημα να επιτευχθεί διαλειτουργικότητα μεταξύ των υποδομών όλων των διαφορετικών παρόχων. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του δικτύου και ο μικρός βαθμός ευελιξίας αποτελεί εμπόδιο, αφού για εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών απαιτούνται αλλαγές σε χιλιάδες συσκευές γεγονός που αυξάνει πολύ το κόστος. Η ανάγκη λοιπόν για την επικράτηση του SDN γίνεται όλο και πιο επιτακτική γεγονός που οδήγησε στη δημιουργία ενός προτύπου αρχιτεκτονικής σύμφωνα με τον οργανισμό ONF (Open Networking Foundation), η αρχιτεκτονική του SDN μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα [30]:

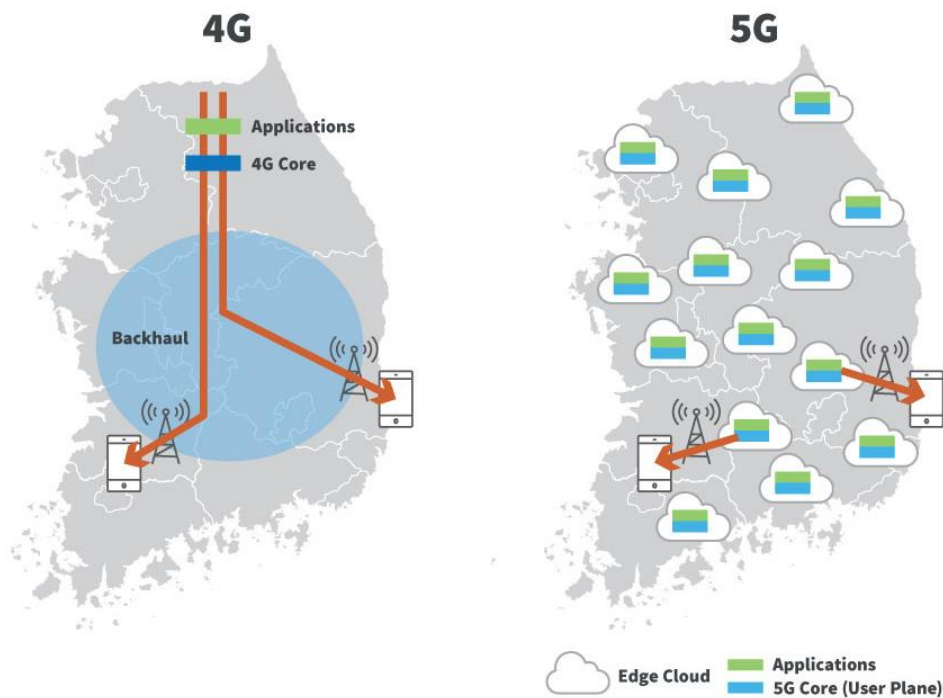
- Επίπεδο υποδομής (Infrastructure Layer): Το επίπεδο αυτό αποτελείται από πολλές δικτυακές συσκευές όπως δρομολογητές (routers), μεταγωγείς (switches) κλπ. Αυτές οι συσκευές απαιτείται να μπορούν να υποστηρίξουν την τεχνολογία SDN προκειμένου να μπορεί να λαμβάνει σήματα και να επικοινωνεί με τα ανωτέρω δίκτυα υποδομής και τεχνολογίες δικτύωσης για συστήματα 5ης Γενιάς. Δεν υπάρχει μεταξύ των δικτυακών συσκευών καμία ανταλλαγή σήματος, αφού όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται από τον SDN-ελεγκτή (controller).

- Επίπεδο ελέγχου (Control Layer): Το επίπεδο αυτό αποτελεί τον εγκέφαλο του συστήματος, αφού εδώ υλοποιείται ο SDN-ελεγκτής. Πολλοί αλγόριθμοι υλοποιούνται σε έναν ελεγκτή του δικτύου, ο οποίος λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν τη δρομολόγηση, τη δυνατότητα καταμερισμού της κίνησης (traffic engineering) κλπ.
- Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer): Το πεδίο αυτό περιέχει τις διεπαφές που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του χρήστη με τη μορφή εφαρμογών. Ωστόσο στις περισσότερες αναφορές είδαμε τα επίπεδα του SDN να χρησιμοποιούν διαφορετικές ονομασίες. Για αυτό μια πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση των επιπέδων του SDN θα μπορούσε να είναι [12] [29] [30]:
 - SDN-Ελεγκτής: Ασχολείται με τις λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου, όπως για παράδειγμα διάφορα APIs (Application Programming Interfaces), το λειτουργικό σύστημα του δικτύου και τη συντήρηση της πλήρους εικόνας για την κατάσταση που βρίσκεται το δίκτυο.
 - Νότιο Μέρος (Southbound part): Προσφέρει μια διεπαφή και ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή και της διαθέσιμης υποδομής προώθησης πακέτων, δεδομένου ότι η υποδομή υποστηρίζει την τεχνολογία SDN. Το πιο γνωστό πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή και του νότιου μέρους είναι το OpenFlow.

3.9 Σύγκριση δικτύων 4G και 5G

Σε αυτήν την ενότητα, θα συζητήσουμε πώς διαφέρουν οι αρχιτεκτονικές 4G και 5G. Σε μια αρχιτεκτονική δικτύου 4G LTE, τα LTE RAN και eNodeB είναι συνήθως κοντά μεταξύ τους, συχνά στη βάση ή κοντά στον πύργο κυψελών που λειτουργεί με εξειδικευμένο υλικό. Το μονολιθικό EPC από την άλλη πλευρά είναι συχνά συγκεντρωτικό και πιο μακριά από το eNodeB. Αυτή η αρχιτεκτονική καθιστά την επικοινωνία υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης από άκρη σε άκρη προκλητική έως αδύνατη.

Καθώς τα πρότυπα όργανα όπως το 3GPP και οι κατασκευαστές υποδομής όπως η Nokia και η Ericsson δημιούργησαν τον πυρήνα 5G New Radio (5G-NR), χώρισαν το μονολιθικό EPC και εφάρμοσαν κάθε λειτουργία έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτό επιτρέπει στον πυρήνα 5G να γίνει αποκεντρωμένος κόμβος 5G και πολύ ευέλικτος ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, οι βασικές λειτουργίες 5G μπορούν πλέον να συσχετιστούν με εφαρμογές σε ένα άκρο του κέντρου δεδομένων, καθιστώντας τις διαδρομές επικοινωνίας μικρές και βελτιώνοντας έτσι την ταχύτητα και την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.



Σχήμα 3.10 Σύγκριση δικτύων 4G και 5G

Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτών των μικρότερων, πιο εξειδικευμένων βασικών στοιχείων 5G που λειτουργούν σε κοινό υλικό είναι ότι τα δίκτυα μπορούν τώρα να προσαρμοστούν μέσω τεμαχισμού δικτύου. Ο τεμαχισμός δικτύου επιτρέπει να έχουμε πολλαπλές λογικές "φέτες" λειτουργικότητας, βελτιστοποιημένες για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, όλες να λειτουργούν σε έναν μόνο φυσικό πυρήνα εντός της υποδομής του δικτύου 5G.

Ένας χειριστής δικτύου 5G μπορεί να προσφέρει ένα κομμάτι που είναι βελτιστοποιημένο για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, ένα άλλο κομμάτι που είναι πιο βελτιστοποιημένο για χαμηλή καθυστέρηση και ένα τρίτο που έχει βελτιστοποιηθεί για έναν τεράστιο αριθμό συσκευών IoT. Ανάλογα με αυτήν τη βελτιστοποίηση, ορισμένες από τις βασικές λειτουργίες 5G ενδέχεται να μην είναι καθόλου διαθέσιμες. Για παράδειγμα, εάν εξυπηρετούνται μόνο συσκευές IoT, δεν θα χρειάζεται η φωνητική λειτουργία που είναι απαραίτητη για κινητά τηλέφωνα. Και επειδή δεν πρέπει κάθε φέτα να έχει ακριβώς τις ίδιες δυνατότητες, η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς χρησιμοποιείται πιο αποτελεσματικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Η εφαρμογή του MEC σε δίκτυα 5G για επικοινωνίες C-V2X

Ένα από τα προβλήματα των συμβατικών κυψελωτών συστημάτων είναι πως τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο τερματικών διέρχονται υποχρεωτικά από το δίκτυο κορμού του συστήματος. Επιπλέον, οι περισσότερες σημερινές εφαρμογές κάνουν χρήση της τεχνικής cloud computing, χάρη στη δυνατότητά της να παρέχει πρακτικά απεριόριστους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους σε αυτές. Κάτι τέτοιο, όμως, αυξάνει περαιτέρω την καθυστέρηση που υφίστανται τα μηνύματα από άκρο σε άκρο, διότι οι εξυπηρετητές cloud βρίσκονται, συνήθως, σε απομακρυσμένα σημεία από τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου. Καίτοι αυτό δεν αποτελεί μείζον πρόβλημα για τις υπηρεσίες mobile broadband, η εξάρτηση από το cloud δυσχεραίνει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση, καθώς και υπηρεσιών Internet of Things (IoT), οι οποίες χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλό αριθμό συσκευών.

Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων, τα τελευταία χρόνια μελετάται η εφαρμογή της τεχνολογίας Mobile Edge Computing (MEC) στα κυψελωτά συστήματα. Η βασική ιδέα είναι η μετακίνηση των ικανοτήτων υπολογισμού από τα κεντρικά data centers στους κόμβους του RAN. Με αυτόν τον τρόπο, οι ακραίοι κόμβοι του δικτύου αποκτούν τη δυνατότητα να επέμβουν στη δρομολόγηση της κίνησης και να την προσαρμόσουν στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, μειώνοντας παράλληλα την καθυστέρηση που εισάγει το δίκτυο κορμού. Το MEC, όμως, δεν καταργεί το ρόλο του cloud computing, αλλά αντίθετα το συμπληρώνει. Οι κόμβοι με δυνατότητες MEC μπορούν να εξυπηρετούν άμεσα τις εφαρμογές για τις οποίες διαθέτουν τους απαραίτητους πόρους, ενώ αναθέτουν σε κάποιον εξυπηρετητή cloud την εξυπηρέτηση αυτών που είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση.

4.1 Εισαγωγή στο MEC

Η τελευταία δεκαετία αποτελεί περίοδο άνθησης και εξάπλωσης της τεχνολογίας του υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Το modus operandi της **συγκεκριμένης** τεχνολογίας βασίζεται στη μέθοδο της κεντρικής διαχείρισης πόρων. Συνοπτικά, ο εκάστοτε χρήστης εκμεταλλεύεται εταιρικά λογισμικά, αποθηκευτικούς χώρους, βάσεις δεδομένων και λοιπούς

υπολογιστικούς πόρους που βρίσκονται διαθέσιμοι στο διαδίκτυο, το οποίο αποτελεί το προαναφερθέν «νέφος». Η μέθοδος αυτή όμως αποκτά ένα εγγενές μειονέκτημα, θεωρώντας πως κάθε cloud server βρίσκεται κατά κανόνα απομακρυσμένος τόσο από το χρήστη, όσο και από το υπόλοιπο δίκτυο. Το μειονέκτημα αυτό είναι η εισαγωγή καθυστέρησης στην ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ χρήστη και εξυπηρετητή. Θα δειχθεί ακολούθως πως το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί σοβαρό ζήτημα σε ένα μεγάλο σύνολο εφαρμογών και υπηρεσιών οι οποίες απαιτούν ελάχιστο latency και απόκριση σε πραγματικό χρόνο.

Η ανάγκη για όσο το δυνατόν περισσότερο άμεση και δυναμική ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ χρήστη και εξυπηρετητή οδήγησε στην ιδέα της μεταφοράς του νέφους στις άκρες του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, η απόσταση του χρήστη από τις πηγές υπολογιστικής ισχύος και δεδομένων που εκμεταλλεύεται, μειώνεται δραστικά. Η μείωση αυτή συνεπάγεται έτσι το επιθυμητό χρονικό κέρδος στην (από άκρο σε άκρο) επικοινωνία συσκευής με εξυπηρετητή. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Mobile Edge Computing και βασίζεται σε αυτή ακριβώς την αποκεντροποίηση των υπολογιστικών πόρων του νέφους. Οι βασικές της αρχές θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο.

4.2 Αρχιτεκτονική MEC

4.2.1 Σκελετός αρχιτεκτονικής

Οι δίαυλοι επικοινωνίας ανάμεσα στο χρήστη και τους cloud εξυπηρετητές του MCC (Mobile Cloud Computing), μοντελοποιούνται συνήθως ως bit pipes με ένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Στα συστήματα MEC, μικρής κλίμακας τοπικοί εξυπηρετητές δίνουν τη δυνατότητα ταχείας ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Ο τρόπος αυτός, διαφέρει σημαντικά από τις αντίστοιχες ενσύρματες διεπαφές κατά τα κάτωθι χαρακτηριστικά του.

I) Χρησιμοποιώντας την ατμόσφαιρα ως αγωγό το ασύρματο σήμα υπόκειται σε φαινόμενα όπως η διάθλαση και η περίθλαση που οδηγούν σε προβλήματα όπως η διασυμβολική παρεμβολή (inter-symbol inference, *ISI*). Παρουσιάζεται λοιπόν η ανάγκη για την αντιμετώπιση αυτών με σκοπό την αξιοπιστία των επικοινωνιών.

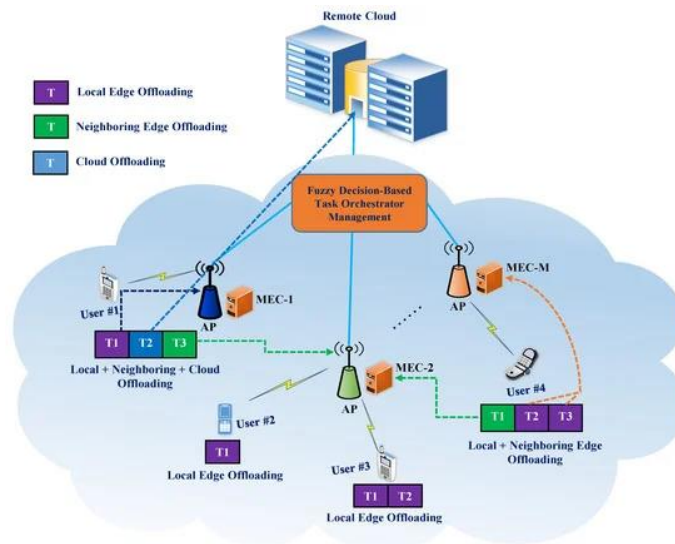
II) Η ασύρματη μετάδοση ενός σήματος μπορεί να οδηγήσει στην παρεμβολή αυτού με σήματα στο ίδιο φάσμα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα λαθών στην αποκωδικοποίηση από μεριάς δέκτη.

III) Η έλλειψη διαθέσιμου φάσματος (spectrum shortage) στις wireless μεταδόσεις αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σύγχρονα ζητήματα της επιστήμης των τηλεπικοινωνιών. Ως εκ τούτου, παρουσιάζεται η ανάγκη

ανάπτυξης μεθόδων που θα επιτρέψει την αξιόπιστη ασύρματη μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε κοινό εύρος ζώνης.

Στα συστήματα MEC η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ κινητών συσκευών και σημείων προσβάσεως (access points, ή APs) με τη δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (device-to-device, ή D2D).

Οι εξυπηρετητές MEC αποτελούν μικρής κλίμακας κέντρα δεδομένων που χειρίζεται ο εκάστοτε πάροχος υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών/Cloud Computing. Αυτά συσχετίζονται με ασύρματα APs, όπως για παράδειγμα Wi-Fi routers και Base Stations. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα 4.1, τα ασύρματα αυτά APs όχι μόνο προσφέρουν στους εξυπηρετητές MEC το interface για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων, αλλά δίνουν επίσης τη δυνατότητα σύνδεσης με άλλους MEC εξυπηρετητές ή με μεγάλα Cloud data centers. Με τον τρόπο αυτό, ο εξυπηρετητής μπορεί να αποθέσει την εκτέλεση μέρους των υπολογιστικών του διεργασιών σε άλλο φορέα με σκοπό τη γρηγορότερη ολοκλήρωσή τους. Ακόμη και σε συνθήκες που η επικοινωνία του χρήστη με κάποιον εξυπηρετητή δεν καθίσταται δυνατή, η τεχνολογία MEC προσφέρει τη δυνατότητα D2D συνδέσεων με γειτονικές συσκευές. Μια τέτοια περίπτωση προσφέρει στο χρήστη δύο λύσεις. Πρώτον, την έμμεση σύνδεσή του με MEC εξυπηρετητή χρησιμοποιώντας ως ενδιάμεσο κόμβο έναν γειτονικό χρήστη. Δεύτερον, οι D2D συνδέσεις πολλαπλών συσκευών που μοιράζονται τους υπολογιστικούς τους πόρους μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά υπολογιστικά «νέφη» με σημαντική ισχύ επεξεργασίας δεδομένων.



Σχήμα 4.1 Συστήματα MEC

4.2.2 Το πλαίσιο MEC

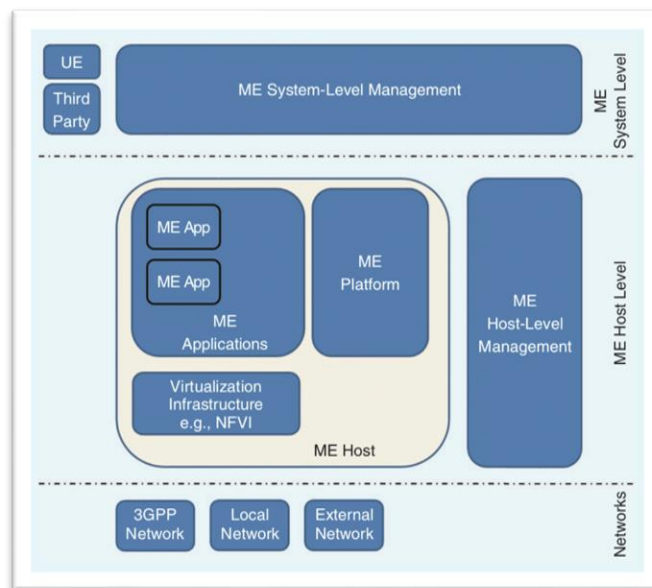
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο σκελετός ενός πλαισίου MEC. Περιλαμβάνει τις λειτουργικές μονάδες του συστήματος οι οποίες περιγράφονται σε υψηλό επίπεδο. Οι μονάδες αυτές χωρίζονται σε τρία επίπεδα:

- 1) Το επίπεδο συστήματος (system level)
- 2) Το επίπεδο διακομιστή (host level)
- 3) Το επίπεδο δικτύου (network level)

Στη βάση του πλαισίου βρίσκεται το **επίπεδο δικτύου**. Αποτελείται από εξωτερικές οντότητες, όπως το δίκτυο του 3GPP (3rd Generation Partnership Project), καθώς και τα εκάστοτε τοπικά ή εξωτερικά δίκτυα. Το επίπεδο αυτό αναπαριστά τη σύνδεση του χρήστη με τοπικά δίκτυα, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, καθώς και εξωτερικά δίκτυα όπως το Διαδίκτυο.

Στο αμέσως επόμενο στρώμα, έχουμε το **επίπεδο του host**, που αποτελείται από δυο μεγάλες υποομάδες: α) Το ME host και β) το τμήμα διαχείρισης του host (Host-level management). Ο ME host χωρίζεται περαιτέρω για να περιλαμβάνει την πλατφόρμα MEC (MEC Platform), τις εφαρμογές MEC (MEC Applications) και τέλος τη δομή visualization.

Στην κορυφή του πλαισίου έχουμε το **επίπεδο διαχείρισης**, το οποίο καθ' ορισμό κατέχει τη γενική επίβλεψη όλου του συστήματος MEC. Περιλαμβάνει το σύνολο του εξοπλισμού των χρηστών (*User Equipment, UE*) και τους φορείς που είναι υπεύθυνοι για την εκτέλεση μιας MEC εφαρμογής από το χρήστη, μέσω του δικτύου που προσφέρει ένας εξωτερικός πάροχος.

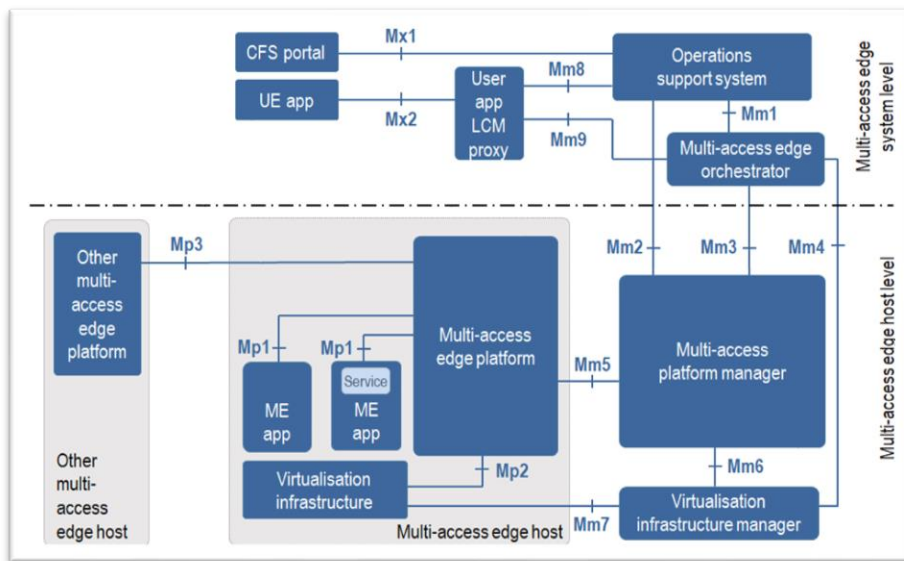


Σχήμα 4.2 Πλαίσιο MEC

4.2.3 Η Αρχιτεκτονική Αναφοράς MEC

Μια περισσότερο εις βάθος κατανόηση των συστημάτων Mobile Edge Computing μπορεί να αποκτηθεί από τη μελέτη της γενικευμένης αρχιτεκτονικής αναφοράς MEC. Η γενική δομή της ακολουθεί το σχήμα του πλαισίου MEC με ειδοποιό διαφορά την έλλειψη του στρώματος δικτύου

(network level). Τα επί μέρους στοιχεία που θα αναλυθούν περαιτέρω απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Αρχιτεκτονική MEC στο Μοντέλο Αναφοράς

Το επίπεδο του MEC host αποτελείται από την **πλατφόρμα ME** (*Multi-access Edge platform, MEP*), τη **μονάδα διαχείρισης της ME πλατφόρμας** (*Mobile Edge Platform Manager, MEPM*) και τη **δομή εικονικοποίησης** (*virtualization infrastructure*).

Η **δομή εικονικοποίησης** (*virtualization infrastructure*) είναι υπεύθυνη για την παροχή εικονικών υπολογιστικών πόρων, αποθηκευτικού χώρου και πρόσβασης στο δίκτυο στις εφαρμογές που τρέχουν μέσω ενός διακομιστή MEC. Επιπλέον, το virtualization infrastructure τρέχοντας το εικονικό λογισμικό και λαμβάνοντας το ρόλο του χειριστή του, είναι υπεύθυνο για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την επίδοση των εικονικών πόρων και την εμφάνιση τυχόν σφαλμάτων. Η ανατροφοδότηση των δεδομένων που συλλέγονται προς τη διαχείριση υποδομών εικονικοποίησης (*Virtualization Infrastructure Manager, VIM*) γίνεται μέσω του σημείου αναφοράς Mm7, ώστε ο VIM να ενημερώνει το MEPM μέσω του σημείου αναφοράς Mm6 για την κατάσταση των πόρων του συστήματος.

Η **πλατφόρμα ME** (*Multi-access Edge platform, MEP*) περιέχει στο εσωτερικό της μια συλλογή βασικών λειτουργιών, οι οποίες είναι αναγκαίες για την εκτέλεση μιας MEC εφαρμογής σε κάποιο MEC host. Η πλατφόρμα λειτουργεί ουσιαστικά ως διαμεσολαβητής μεταξύ των εφαρμογών και δομής εικονικοποίησης. Οι λειτουργίες που περιέχει επιτρέπουν τη σωστή δρομολόγηση δεδομένων ανάμεσα σε εφαρμογές, υπηρεσίες δικτύου και εικονικών πόρων κάθε είδους. Η δρομολόγηση αυτή υπαγορεύεται από τη MEPM, βασίζεται σε πολιτικές και πρωτόκολλα που η ίδια θέτει, και

ενημερώνεται στη MEP μέσω του σημείου αναφοράς Mm5. Τέλος, η MEP μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα με άλλες πλατφόρμες ME, δημιουργώντας ένα δίκτυο επικοινωνίας με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

Η **μονάδα διαχείρισης της ME πλατφόρμας** (*Mobile Edge Platform Manager, MEPM*) με τη σειρά της χωρίζεται σε τρία διακριτά μέρη:

- 1) Μονάδα διαχείρισης κύκλου ζωής των εφαρμογών
- 2) Δομή διαχείρισης ME πλατφόρμας
- 3) Λειτουργίες διαχείρισης κανόνων, απαιτήσεων και πλαισίων ME εφαρμογών

Η μονάδα διαχείρισης κύκλου ζωής εφαρμογών είναι υπεύθυνη για τις διαδικασίες που αποφασίζουν κάθε στιγμή αν μια εφαρμογή θα εκτελεστεί ή θα τερματίσει, καθώς και για την ενημέρωση του Mobile Edge Operator (MEO) σχετικά με γεγονότα που αφορούν τις εφαρμογές. Οι λειτουργίες κανόνων και απαιτήσεων εμπεριέχουν πληροφορίες σχετικά με τους κανόνες, τις εξουσιοδοτήσεις και τις DNS παραμέτρους, οι οποίες χρησιμοποιούνται κάθε φορά που προκύπτει ζήτημα κανόνων σε σύγκρουση. Το σημείο αναφοράς Mm2 χρησιμοποιείται από τη MEPM για να αλληλεπιδράσει με το επίπεδο συστήματος και συγκεκριμένα με το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών (*Operations Support System, OSS*), ώστε να πραγματοποιείται έλεγχος απόδοσης όλης της ME πλατφόρμας. Τέλος, το σημείο αναφοράς Mm3, συνδέει τη MEPM με τη μονάδα ενορχήστρωσης ME του συστήματος επιπέδου (*Mobile Edge Orchestrator, MEO*) παρέχοντας της υποστήριξη στη διαχείριση του κύκλου ζωής των εφαρμογών, καθώς και ανταλλαγή πληροφορίας σχετικά με τη διαθεσιμότητα των ME υπηρεσιών στο σύστημα.

Το **επίπεδο συστήματος** διαχωρίζεται και αυτό σε δυο βασικά επιμέρους στοιχεία, τη **μονάδα ενορχήστρωσης ME του συστήματος επιπέδου** (*Mobile Edge Orchestrator, MEO*) και το **σύστημα υποστήριξης λειτουργιών** (*Operations Support System, OSS*).

Η **μονάδα ενορχήστρωσης ME του συστήματος επιπέδου (MEO)** αποτελεί την κεντρική μονάδα ενός MEC συστήματος, καθώς επιβλέπει τη διαχείριση των πόρων και των δυνατοτήτων όλου του ME δικτύου. Στο εσωτερικό της περιέχεται το σύνολο των πληροφοριών που αφορούν το σύστημα, όπως τους ενεργούς ME hosts, τις υπηρεσίες και τους πόρους που βρίσκονται διαθέσιμοι σε αυτούς, τις εφαρμογές που τρέχουν σε κάθε στιγμή και την τοπολογία του δικτύου. Επιπλέον, ο Orchestrator είναι υπεύθυνος για την επίβλεψη των ME εφαρμογών ελέγχοντας την αξιοπιστία και τις πολιτικές που ακολουθούν κατά την εκτέλεσή τους. Ειδικότερα, αν μια εφαρμογή επιθυμεί να εκτελεστεί, πρέπει να αναφέρει στον ενορχηστρωτή τις προδιαγραφές που χρειάζεται για να τρέξει (λ.χ. ελάχιστη καθυστέρηση, ελάχιστοι υπολογιστικοί πόροι συστήματος), ώστε αυτός να επιλέξει τον κατάλληλο ME host για την εκτέλεσή της. Το σημείο αναφοράς Mm4

χρησιμοποιείται από τη MEO, ώστε να λαμβάνει δεδομένα από τη μονάδα διαχείρισης εικονικοποίησης (VIM) σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους του εκάστοτε host.

Το **σύστημα υποστήριξης λειτουργιών (OSS)** είναι ιεραρχικά το ανώτερο επίπεδο διαχείρισης ενός MEC συστήματος. Λαμβάνει αιτήσεις εκτέλεσης και τερματισμού εφαρμογών, τόσο από τους χρήστες μέσω των συσκευών τους (*user equipment, UE*), όσο και από την υπηρεσία εξυπηρέτησης πελατών (*client-facing service, CFS*). Δεδομένου ότι το OSS βρίσκεται ακριβώς στο σύνορο μεταξύ του δικτύου και του εξωτερικού κόσμου, επωμίζεται την ευθύνη του ελέγχου της αξιοπιστίας κάθε εξωτερικού request. Αν κρίνει πώς ένα request είναι ασφαλές να εκτελεστεί στο σύστημα το προωθεί στη MEO για περαιτέρω επεξεργασία μέσω του σημείου αναφοράς Mm1. Τέλος, το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει εφαρμογές μεταξύ διαφορετικών cloud systems.

Κλείνοντας την ανάλυση του επιπέδου συστήματος συναντάται η **υπομονάδα διαχείρισης κύκλου ζωής (Life Cycle Management, LCM)**. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιείται ως διάυλος από τους χρήστες του συστήματος MEC με σκοπό την επικοινωνία αιτημάτων τους σχετικά με την εκτέλεση ή τον τερματισμό εφαρμογών προς το OSS ή τη MEO (σημεία αναφοράς Mm8, Mm9). Οι εξωτερικές οντότητες (UEs, system clients) χρησιμοποιούν τα σημεία αναφοράς Mx1, Mx2 για να αποκτήσουν πρόσβαση σε όλο το σύστημα MEC.

4.3 Πλεονεκτήματα MEC

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το MEC συμβάλλει στη μείωση της συνολικής καθυστέρησης που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Εκτός από αυτό, όμως, συνεισφέρει και στη μείωση της συνολικής επιβάρυνσης του δικτύου κορμού, αφού μόνο ένα μέρος της συνολικής κίνησης διέρχεται από αυτό. Αυτοί οι παράγοντες όχι μόνο συντελούν στη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη, όσον αφορά τις εφαρμογές mobile broadband, αλλά επιτρέπουν και την ανάπτυξη νέων εφαρμογών, ευαίσθητων σε καθυστέρηση και απώλειες πακέτων.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του MEC είναι πως οι ακραίοι κόμβοι μπορούν να φιλοξενούν υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία των κόμβων αυτών. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να αποθηκεύουν συγκεκριμένες πληροφορίες στους ακραίους κόμβους, οι οποίες ενδιαφέρουν μόνο χρήστες που βρίσκονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Επομένως, η επικοινωνία με το δίκτυο κορμού περιορίζεται στην ανανέωση των πληροφοριών από κάποιο data center και στη συγκεντρωτική αποστολή δεδομένων των χρηστών σε αυτό. Επιπλέον, το MEC διευκολύνει τον εντοπισμό της θέσης των τερματικών συσκευών και επιτρέπει την ανάπτυξη

εφαρμογών που βασίζονται στη θέση των χρηστών. Τέλος, οι εφαρμογές που τρέχουν σε έναν κόμβο MEC έχουν πρόσβαση σε δεδομένα του δικτύου σε πραγματικό χρόνο (κατάσταση ραδιοδιαύλων, στατιστικά δικτύου, θέση συνδρομητών, φορτίο κυψέλης κλπ.) και μπορούν να τα αξιοποιήσουν προκειμένου να διαφοροποιήσουν τις υπηρεσίες που δέχεται κάθε χρήστης.

Εκτός από τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών, η ανάπτυξη του MEC υπόσχεται και πολλά οικονομικά οφέλη για τους παρόχους δικτύων. Οι πάροχοι περιεχομένου έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν γρήγορα νέες εφαρμογές, οι οποίες θα είναι διαθέσιμες είτε σε καταναλωτές είτε σε επιχειρήσεις μέσω του δικτύου κάποιου MNO (Mobile Network Operator). Η ανάπτυξη αυτή θα διευκολυνθεί από τον καθορισμό ανοιχτών προδιαγραφών, APIs (Application Programming Interfaces) και SDKs (Software Development Kits). Επιπλέον, οι MNOs θα μπορούν να παρέχουν το δίκτυό τους σε τρίτους συνεργάτες (Third Party), για τη φιλοξενία των δικών τους εφαρμογών. Το MEC θα παρέχει, επίσης, ευελιξία στους MNOs για τον τρόπο με τον οποίο κατανέμουν τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος (αποθηκευτικούς, εύρος ζώνης, υπολογιστική ισχύ) στους διάφορους συνεργάτες τους.

4.4 Υπηρεσίες MEC

Η MEP προσφέρει υπηρεσίες στις εφαρμογές προς χρήση, προκειμένου αυτές να αποκτήσουν απαραίτητες πληροφορίες ή λειτουργικότητα. Παράλληλα, οι εφαρμογές μπορούν να προσφέρουν άλλες υπηρεσίες στην MEP, τις οποίες αυτή αξιοποιεί, ώστε, στη συνέχεια, να προσφέρει βελτιωμένες υπηρεσίες. Επίσης, μια εφαρμογή μπορεί να κάνει συνδρομή σε μια υπηρεσία, ώστε να λαμβάνει πληροφορίες όταν τροποποιούνται τα δεδομένα που διαθέτει η MEP σχετικά με αυτήν. Οι τρεις βασικότερες υπηρεσίες που πρέπει να υποστηρίζει το MEC είναι οι πληροφορίες ραδιοδικτύου (Radio Network Information – RNI), οι υπηρεσίες τοποθεσίας (Location Services) και η διαχείριση εύρους ζώνης (Bandwidth Manager). Για κάθε μία από αυτές, έχει οριστεί από τον ETSI ένα RESTful API, το οποίο περιλαμβάνει τις λειτουργίες που πρέπει αυτές να υποστηρίζουν, αντίστοιχα με την επικοινωνία των εφαρμογών και της MEP της παραγράφου

4.4.1 Πληροφορίες ραδιοδικτύου

Παρέχει στις εφαρμογές και την MEP πληροφορίες σχετικές με το ραδιοδίκτυο, οι οποίες μπορεί να αφορούν κυψέλη, UE, κλάση QCI κ.α. και μπορεί να ζητούνται για μία χρονική περίοδο. Πιθανές χρήσιμες πληροφορίες είναι:

- Cell-IDs των κυψελών που εξυπηρετεί ο host
- Τοποθεσία κάποιου συνδρομητή

- Ενημερώσεις σχετικές με την κατάσταση του δικτύου, όπως το τρέχον φορτίο μιας κυψέλης
- Μετρήσεις και στατιστικά σχετικά με το UP
- Πληροφορίες σχετικές με τα UEs (πχ. κυψέλη που το εξυπηρετεί, QoS συνδρομητή) που εξυπηρετούνται από τους κόμβους πρόσβασης που σχετίζονται με τον host καθώς και ενημέρωση για αλλαγές αυτών

Για την ανάκτηση και την τροποποίηση των ανωτέρω πληροφοριών, ο χρήστης της υπηρεσίας, που μπορεί να είναι είτε εφαρμογή είτε MEP, κάνει ερωτήσεις HTTP στον εξυπηρετητή RNI.

4.4.2 Υπηρεσίες τοποθεσίας

Παρέχει στις εφαρμογές και την MEP πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικές με την τοποθεσία των χρηστών και των κόμβων του δικτύου πρόσβασης. Τέτοιου είδους πληροφορίες μπορεί να είναι:

- Η τοποθεσία συγκεκριμένων UEs που εξυπηρετούνται από τον host
- Κατάλογος που περιλαμβάνει όλα τα UEs που εξυπηρετούνται από τον host ή μία κατηγορία αυτών
- Πληροφορία για την τοποθεσία όλων των ραδιοκόμβων που σχετίζονται με τον host
- Κατάλογος των UEs που βρίσκονται σε συγκεκριμένη περιοχή
- Τα UEs που εισέρχονται σε και εξέρχονται από συγκεκριμένη περιοχή
Η υπηρεσία τοποθεσίας υποστηρίζει διαφορετικές μορφές αναπαράστασης της θέσης, όπως με γεωγραφικές συντεταγμένες ή με cell-ID.

4.4.3 Διαχείριση εύρους ζώνης

Σε έναν host, τρέχουν πολλές εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ανά κατεύθυνση, άλλοτε στατικές και άλλοτε δυναμικές, ενώ κάποιες μπορεί να απαιτούν και συγκεκριμένη προτεραιότητα έναντι των υπόλοιπων εφαρμογών. Ο σκοπός της υπηρεσίας αυτής είναι η συλλογή όλων των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης και η εκτέλεση κατάλληλων ενεργειών, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χρήση αυτού

4.4.4 Υποστήριξη κινητικότητας

Στην περίπτωση κατά την οποία το MEC εφαρμόζεται πάνω από δίκτυο 3GPP, το UE μπορεί να πραγματοποιήσει μεταπομπή από έναν eNB σε άλλον. Για την υποστήριξη της μεταπομπής, είναι απαραίτητο το σύστημα

MEC να διατηρεί τη συνδεσιμότητα του UE με τις εφαρμογές MEC που χρησιμοποιεί, ιδιαίτερα όταν οι δύο κυψέλες εξυπηρετούνται από διαφορετικό host. Κάποιες εφαρμογές, όπως αυτές που συλλέγουν δεδομένα κίνησης για ένα συγκεκριμένο host, δεν χρειάζεται να διατηρούν την επικοινωνία με το UE κατά την αλλαγή του host. Όσον αφορά τις υπόλοιπες, δηλαδή όσες επηρεάζονται από την κινητικότητα, υπάρχουν διαφορετικά σενάρια διατήρησης της συνδεσιμότητας:

- Διατήρηση της συνδεσιμότητας μεταξύ UE και εφαρμογής: καθώς το UE κινείται, η κίνηση μεταξύ αυτού και της εφαρμογής δρομολογείται προς τον host που το εξυπηρετεί κάθε φορά. Η λύση αυτή, όμως, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της καθυστέρησης, όταν το UE απομακρυνθεί πολύ από τον αρχικό host.
- Επανατοποθέτηση της κατάστασης της εφαρμογής: κατά την κίνηση του UE, μπορεί το σύστημα να ανιχνεύσει κάποιον νέο host, ο οποίος κρίνεται καταλληλότερος για την εξυπηρέτηση αυτού. Σε αυτήν την περίπτωση, η κατάσταση της εφαρμογής (δηλαδή τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στη μνήμη της) μπορεί να τοποθετηθεί στην MEP του νέου host, ώστε το UE να εξυπηρετηθεί πλέον από αυτόν. Προκειμένου να γίνει ομαλότερη η μετάβαση του UE από τον ένα host στον άλλο, μια εφαρμογή μπορεί να τρέχει ταυτόχρονα και στους δύο για κάποιο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο θα γίνεται ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δύο, μέχρι ολόκληρη η κατάστασή της να μεταφερθεί στο νέο host.
- Επανατοποθέτηση της εφαρμογής εντός του συστήματος ME: η εφαρμογή μεταφέρεται εξ ολοκλήρου σε άλλον host. Σε αυτήν την περίπτωση, η επανατοποθέτηση της εφαρμογής εκκινεί από τη διαχείριση του συστήματος και συγκεκριμένα από τον MEO.
- Επανατοποθέτηση της εφαρμογής μεταξύ του συστήματος ME και ενός εξωτερικού περιβάλλοντος cloud: εφόσον υποστηρίζεται, μια εφαρμογή μπορεί να μεταφερθεί από το ME προς κάποιο εξωτερικό cloud ή και αντίστροφα. Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο γειτονικών hosts για την υλοποίηση των ανωτέρω σεναρίων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής Mr3, που συνδέει τις MEPs αυτών.

4.4.5 Ασφάλεια και ρυθμιστικά ζητήματα

Ένα από τα χαρακτηριστικά του MEC είναι ότι επιτρέπει την εκτέλεση εφαρμογών που προέρχονται από διαφορετικούς παρόχους περιεχομένου πάνω από την ίδια δικτυακή υποδομή. Προκειμένου να τεθεί σε εφαρμογή ένα σύστημα MEC, συμμετέχουν φορείς, όπως πάροχοι δικτύου ή περιεχομένου, προγραμματιστές και πωλητές εφαρμογών, καθώς και διαφορετικοί κατασκευαστές MEPs. Αυτή η διαλειτουργικότητα εγείρει σημαντικά ζητήματα

ασφαλείας, που αφορούν όλους τους συμμετέχοντες φορείς, και τα οποία καλούνται να επιλυθούν από τους διαχειριστές των συστημάτων MEC.

Καταρχάς, απαιτείται ο συντονισμός των οντοτήτων που αλληλεπιδρούν εντός του συστήματος MEC. Ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να φροντίσει για την απομόνωση μεταξύ των εφαρμογών που τρέχουν σε έναν host, δηλαδή των VMs που τις απαρτίζουν, ώστε όλες οι εφαρμογές να έχουν εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στα δεδομένα των 70 άλλων. Επιπλέον, ένας από τους ρόλους της MEP είναι η επιβεβαίωση ότι κάθε VM έχει πρόσβαση μόνο στους πόρους και τις υπηρεσίες που του έχουν αποδοθεί, προκειμένου να μη γίνεται κατασπατάληση των πόρων από μια κακοσχεδιασμένη ή κακόβουλη εφαρμογή. Η πλειοψηφία των εφαρμογών MEC προέρχεται από εξωτερικές οντότητες, όπως από τρίτους συνεργάτες. Το σύστημα πρέπει να εξασφαλίζει, λοιπόν, ότι η εξωτερική πηγή είναι έμπιστη, όπως επίσης και ότι το λογισμικό της MEP και των εφαρμογών δεν τροποποιείται από κάποιον κακόβουλο.

Ένα ακόμη ζήτημα που αφορά αποκλειστικά το εσωτερικό του συστήματος MEC είναι η ακεραιότητα των οδηγιών που παράγονται από τον MEO. Οι φυσικές συνδέσεις του MEO με τους διάφορους hosts του συστήματος πιθανώς βρίσκονται εκτός του δικτύου του MNO, οπότε τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών είναι ευάλωτα σε επιθέσεις. Είναι, επομένως, αναγκαία η εξασφάλιση της ακεραιότητας αυτών των μηνυμάτων και της εμπιστευτικότητας μεταξύ των κεντρικών και των τοπικών μονάδων.

Με την έλευση του MEC, ο τερματισμός της συνδεσιμότητας IP και οι λειτουργίες DNS και παροχής περιεχομένου μεταφέρονται πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες. Αυτή η μετάβαση συνοδεύεται από την εγκατάσταση κρυφών μνημών δεδομένων (data caches) με κατανομημένο τρόπο στα ακραία σημεία του δικτύου, οι οποίες διαθέτουν σημαντικά μικρότερη χωρητικότητα από αυτές ενός δικτύου παροχής περιεχομένου (Content Delivery Network – CDN). Εκτός από τις συνηθισμένες επιθέσεις που μπορεί να δεχθεί ένας εξυπηρετητής, οι τοπικές caches είναι ευάλωτες σε νέου είδους επιθέσεις. Για παράδειγμα, η περιορισμένη χωρητικότητα αυτών μπορεί να κορεστεί από κακόβουλες οντότητες, γεγονός που αυτομάτως τις καθιστά ανενεργές και δυσχεραίνει την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνουν οι χρήστες.

Παραβίαση του συστήματος μπορεί να προκύψει και από κενά ασφαλείας του RAN. Καίτοι το LTE προσφέρει ενισχυμένη ασφάλεια στις μεταδόσεις μεταξύ των UEs και των eNBs σε σχέση με τους προκατόχους του (GSM, UMTS), δεν παύει να είναι ευάλωτο σε φυσικές επιθέσεις. Στην περίπτωση κατά την οποία τα μηνύματα διέρχονται από το δίκτυο κορμού, αυτά είναι περαιτέρω προστατευμένα με χρήση κρυπτογράφησης μεταξύ του data center και του τελικού χρήστη. Αντίστοιχες λύσεις πρέπει να βρεθούν και για την επικοινωνία με τους MEC hosts, προκειμένου να περιοριστεί η επίδραση των φυσικών επιθέσεων.

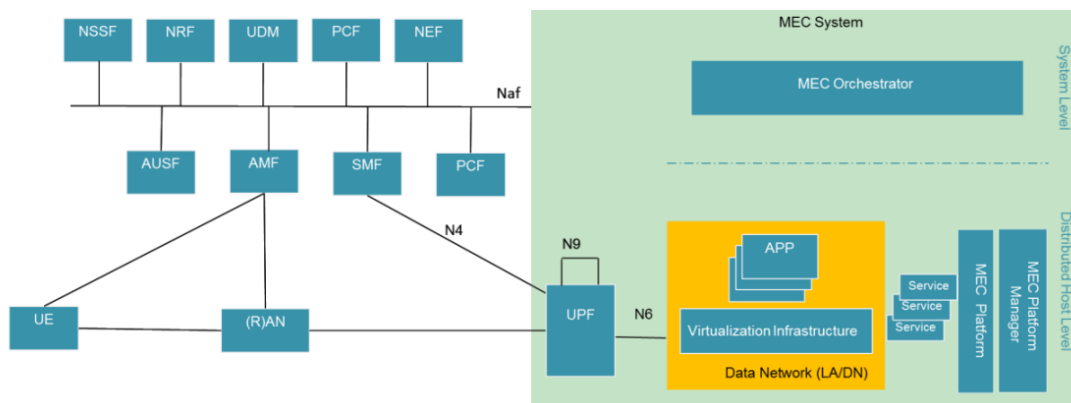
Εκτός από την ακεραιότητα των μηνυμάτων δεδομένων, η εφαρμογή του MEC συνοδεύεται από νέες προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση των λειτουργιών χρέωσης των χρηστών. Ενώ στα συμβατικά κυψελωτά συστήματα η κίνηση των χρηστών χρεώνεται από τις μονάδες του δικτύου κορμού, στην περίπτωση του MEC ένας μεγάλος όγκος δεδομένων διακινείται μεταξύ των UEs και των ακραίων κόμβων, χωρίς να διέλθει από τις μονάδες χρέωσης. Επειδή οι ακραίοι κόμβοι είναι περισσότερο ευάλωτοι σε επιθέσεις, υπάρχει κίνδυνος είτε για λανθασμένες χρεώσεις είτε για σκόπιμη παραποίηση αυτών. Μία πιθανή λύση για την εξασφάλιση της ακρίβειας των χρεώσεων είναι οι περιοδικές ερωτήσεις από το δίκτυο κορμού στα UEs για τον όγκο των δεδομένων που αυτά έχουν καταναλώσει. Εναλλακτικά, τα UEs θα μπορούσαν να ενημερώνουν τα ίδια τις μονάδες χρέωσης με περιοδικό τρόπο. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περαιτέρω μελέτη από τους αρμόδιους φορείς για την εύρεση αξιόπιστων πολιτικών χρέωσης και των τρόπων με τους 71 οποίους μπορούν αυτές να εφαρμοστούν στις διάφορες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης.

Τέλος, το MEC δεν πρέπει να σταθεί εμπόδιο στις αρχές επιβολής νόμου, αναφορικά με την παρακολούθηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τη συλλογή δεδομένων από αυτές. Τα κυψελωτά συστήματα της 3GPP διαθέτουν ένα σύστημα νόμιμης υποκλοπής (Lawful Interception – LI), το οποίο τίθεται σε λειτουργία κατόπιν δικαστικής απόφασης, προκειμένου να βοηθηθούν οι αρχές κατά την εγκληματική έρευνα. Οι λειτουργίες LI εκτελούνται, τυπικά, από τις μονάδες του δικτύου κορμού, όμως στην περίπτωση του MEC δεν διέρχονται όλα τα δεδομένα από αυτές. Αυτήν την περίοδο, βρίσκεται σε εξέλιξη η σύνταξη ανοιχτών προδιαγραφών από το ETSI MEC ISG, σχετικά με την υποστήριξη ρυθμιστικών αναγκών.

4.5 Εφαρμογή του MEC στα δίκτυα 5G

Η ανάπτυξη των προδιαγραφών του MEC από το ομώνυμο ETSI ISG ξεκίνησε ύστερα από μακροχρόνια διαθεσιμότητα των δικτύων LTE. Παρόλο που το MEC είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομο, αφού καλύπτει τόσο τις λειτουργίες του στρώματος δεδομένων όσο και τις μονάδες διαχείρισης, η σχεδιάσή του ήταν μέχρι κάποιο βαθμό προσανατολισμένη στην αξιοποίηση αυτού στα δίκτυα LTE. Από την άλλη πλευρά, η σχεδίαση των δικτύων 5G από τη 3GPP έλαβε εξ αρχής υπόψη την υποστήριξη υπηρεσιών MEC από αυτά. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό μετά από σύγκριση κάποιων εκ των NFs του 5GC με αντίστοιχες λειτουργίες του MEC κατά ETSI. Για παράδειγμα, οι διαθέσιμες υπηρεσίες του συστήματος 5G γνωστοποιούνται στις NFs μέσω της NRF, ο ρόλος της οποίας είναι παρόμοιος με το μητρώο υπηρεσιών που διαθέτει η MEP. Επιπλέον, όπως και το MEC, το 5GC υποστηρίζει την παροχή υπηρεσιών βασιζόμενων στην τοποθεσία των χρηστών, μέσω της LMF. Παράλληλα, στην αρχιτεκτονική SBA, οι NFs διαφημίζουν και

καταναλώνουν υπηρεσίες κατόπιν μεμονωμένων αιτήσεων ή ύστερα από συνδρομή σε αυτές. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με τα APIs που έχουν οριστεί για την παροχή υπηρεσιών στο MEC. Όπως και στα δίκτυα LTE, η ενσωμάτωση του MEC στο 5G αφορά την επιλογή της θέσης εγκατάστασης των ME hosts και των NFs του 5GC. Ο διαχωρισμός των λειτουργιών του στρώματος δεδομένων (UPF) από αυτές του στρώματος ελέγχου (πχ. AMF, SMF) καθιστά εφικτή τη μεταφορά των πρώτων στους ME hosts για τον έλεγχο της κίνησης των δεδομένων μεταξύ του NG-RAN, του 5GC και των εξωτερικών δικτύων. Οι υπόλοιπες NFs μπορούν είτε να παραμείνουν στο δίκτυο κορμού είτε να υλοποιηθούν και αυτές εντός των hosts με τη μορφή VNFs. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται ένας πιθανός τρόπος ενσωμάτωσης του MEC σε ένα δίκτυο 5G, για το οποίο χρησιμοποιείται ο τρόπος αναπαράστασης SBA.



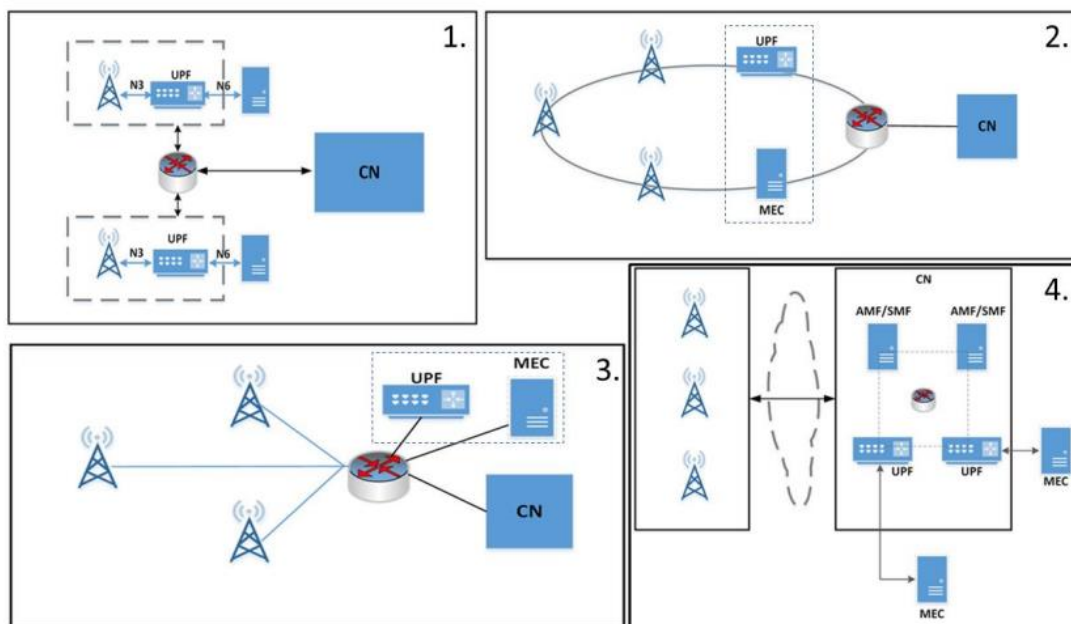
Σχήμα 4.4 Ενσωμάτωση MEC σε δίκτυο 5G

Στην αρχιτεκτονική του προηγούμενου σχήματος (Σχήμα 4.4), οι λειτουργικές μονάδες του MEC, όπως ο MEO και η MEP, συμπεριφέρονται ως AFs, οπότε επικοινωνούν με το 5GC με τη διεπαφή Naf. Ο σκοπός αυτής της υλοποίησης είναι η διαφήμιση υπηρεσιών στο σύστημα 5G, προερχόμενων από εφαρμογές που τρέχουν εντός του Host. Ο MEO μπορεί να εκθέσει τις δυνατότητες του συστήματος MEC είτε απευθείας στις άλλες NFs του 5GC είτε μέσω της NEF. Η επιλογή εξαρτάται από το αν το σύστημα MEC θεωρείται αξιόπιστο από τον MNO που διαχειρίζεται το σύστημα 5G, αλλά και από την απαιτούμενη ασφάλεια των πληροφοριών. Οι υπηρεσίες που πιθανότατα θα εκτίθενται μέσω της NEF περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της κατάστασης των UEs και τον έλεγχο των πολιτικών χρεώσεων. Επίσης, είναι δυνατή η τοποθέτηση μίας NEF εντός του host, η οποία θα προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση κατά τη γνωστοποίηση τοπικών πληροφοριών ραδιοπρόσβασης στις εφαρμογές MEC.

4.5.1 Σενάρια ανάπτυξης MEC

Λογικά οι κεντρικοί υπολογιστές MEC αναπτύσσονται στο άκρο ή στο κεντρικό δίκτυο δεδομένων και είναι η συνάρτηση επιπέδου χρήστη (UPF) που φροντίζει να κατευθύνει την κίνηση των χρηστών προς τις στοχευμένες εφαρμογές στα δίκτυα δεδομένων. Οι τοποθεσίες των δικτύων δεδομένων και του UPF είναι επιλογή του χειριστή δικτύου και του ο διαχειριστής δικτύου μπορεί να επιλέξει να τοποθετήσει τους φυσικούς υπολογιστικούς πόρους βάσει τεχνικών και επαγγελματικών παραμέτρων όπως οι διαθέσιμες εγκαταστάσεις του ιστότοπου, οι υποστηριζόμενες εφαρμογές και οι απαιτήσεις τους, μετρημένες ή εκτιμώμενο φορτίο χρήστη κλπ. Το σύστημα διαχείρισης MEC, εντοχώνοντας τη λειτουργία των οικοδεσποτών MEC και εφαρμογές, μπορεί να αποφασίσει δυναμικά πού θα αναπτύξει τις εφαρμογές MEC.

Όσον αφορά τη φυσική ανάπτυξη των κεντρικών υπολογιστών MEC, υπάρχουν πολλές επιλογές διαθέσιμες με βάση διάφορες απαιτήσεις λειτουργίας, απόδοσης ή ασφάλειας. Το ακόλουθο Σχήμα 4.5 δίνει ένα περίγραμμα ορισμένων εφικτών επιλογών για τη φυσική τοποθεσία του MEC.



Σχήμα 4.5 Σενάρια ανάπτυξης MEC

1. Συνεγκατάσταση MEC και τοπικής UPF στο σταθμό βάσης.
2. Συνεγκατάσταση MEC με έναν κόμβο εκπομπής, πιθανώς με μια τοπική UPF
3. Το MEC και η τοπική UPF συνενώθηκαν σε ένα δικτυακό σημείο συγκέντρωσης

4. Το MEC συνεγκαταστάθηκε με τις λειτουργίες του δικτύου κορμού (πχ. σε ένα κέντρο δεδομένων)

Οι επιλογές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως δείχνουν ότι το MEC μπορεί να αναπτυχθεί με ευελιξία σε διαφορετικές τοποθεσίες κοντά στο σταθμό βάσης ή στο κεντρικό δίκτυο δεδομένων. Κοινή για όλες τις αναπτύξεις είναι η UPF που αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται για να κατευθύνει την κίνηση προς τις στοχευμένες εφαρμογές MEC και προς το δίκτυο.

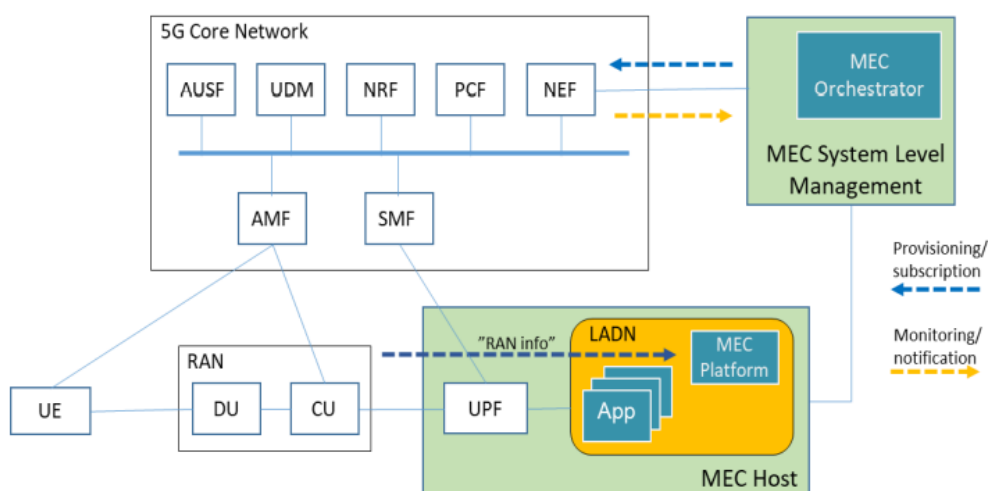
4.5.2 Έκθεση δυνατοτήτων συστήματος

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, υπάρχει μια συγκεκριμένη συνάρτηση, δηλαδή η λειτουργία έκθεσης δικτύου (NEF), η οποία αναθέτει πληροφορίες και υπηρεσίες των λειτουργιών του δικτύου CN 5G σε εξωτερικές οντότητες. Τέτοιος οι οντότητες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν Λειτουργίες εφαρμογής (AF), όπως λειτουργικές οντότητες συστήματος MEC.

Ενώ η υπηρεσία 5G βασισμένη στην αρχιτεκτονική (SBA) επιτρέπει επίσης την άμεση πρόσβαση σε μια λειτουργία δικτύου για ένα εξουσιοδοτημένο AF, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου οι υπηρεσίες και οι δυνατότητες εκτίθενται μέσω NEF. Αυτές περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Παρακολούθηση: Επιτρέπει σε μια εξωτερική οντότητα να ζητήσει ή να εγγραφεί σε εκδηλώσεις ενδιαφέροντος που σχετίζονται με την ΕΕ. Ο τα παρακολουθούμενα γεγονότα περιλαμβάνουν την κατάσταση περιαγωγής μιας UE, απώλεια συνδεσιμότητας UE, προσβασιμότητα UE και γεγονότα που σχετίζονται με την τοποθεσία (π.χ. τοποθεσία συγκεκριμένου UE ή ταυτοποίηση UE εντός γεωγραφικής θέσης περιοχή). Το AMF & UDM είναι οι βασικές οντότητες για την παροχή πρόσβασης σε τέτοιες πληροφορίες συμβάντων.
- Παροχή: Επιτρέπει σε μια εξωτερική οντότητα να παρέχει αναμενόμενη συμπεριφορά UE στο σύστημα 5G, όπως για παράδειγμα προβλεπόμενη κίνηση του UE ή κάποια χαρακτηριστικά επικοινωνίας.
- Πολιτική και χρέωση: Διαχειρίζεται το QoS και την πολιτική χρέωσης για αιτήματα που βασίζονται σε UE από εξωτερικό κόμμα, το οποίο διευκολύνει επίσης τις χορηγούμενες υπηρεσίες δεδομένων. Το PCF είναι η βασική οντότητα όσον αφορά την Πολιτική και Charging Control (PCC), αν και τα περισσότερα NF συμμετέχουν σε κάποιο βαθμό στην υποστήριξη του PCC δομή.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα έκθεσης δυνατοτήτων του 5G στο σύστημα MEC.



Σχήμα 4.6 Έκθεση δυνατοτήτων του 5G στο σύστημα MEC

4.6 Εφαρμογή του MEC στις επικοινωνίες C-V2X

Η διαθεσιμότητα υπηρεσιών cloud στην άκρη του δικτύου έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση της πλειοψηφίας των εφαρμογών V2X που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.3.2. Συγκεκριμένα, οι οργανισμοί προτυποποίησης (ETSI, 5GAA) έχουν ξεχωρίσει τέσσερις κατηγορίες περιπτώσεων χρήσης, οι οποίες συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με το MEC. Αυτές είναι:

- Οδική ασφάλεια (Road Safety)
- Διευκόλυνση (Convenience)
- Εξελιγμένη υποβοηθούμενη οδήγηση (Advance Driving Assistance)
- Ευάλωτοι χρήστες (Vulnerable Road Users)

4.6.1 Οδική ασφάλεια

Οι εφαρμογές οδικής ασφάλειας θέτουν τις αυστηρότερες απαιτήσεις καθυστέρησης, οπότε είναι και αυτές που επιβαρύνονται περισσότερο από τη διέλευση των μηνυμάτων από το δίκτυο κορμού. Οι κυριότερες περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με το MEC είναι η αποστολή μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης και η υποβοηθούμενη διέλευση σε διασταύρωση (Intersection Movement Assist – IMA). Η IMA αποσκοπεί στην αποφυγή συγκρούσεων

μεταξύ οχημάτων που πλησιάζουν μία διασταύρωση από κάθετες κατευθύνσεις, προειδοποιώντας τον έναν οδηγό σε περίπτωση που δεν έχει οπτική επαφή προς το άλλο όχημα. Μία άλλη εφαρμογή που μπορεί να ενταχθεί στην παρούσα κατηγορία είναι η διαχείριση διασταύρωσης με έλεγχο των φωτεινών σηματοδοτών, η οποία μπορεί να αποτρέψει τους πιθανούς κινδύνους που προκύπτουν από τη συσσώρευση οχημάτων σε μία ουρά. Η τελευταία περίπτωση, αν και δεν έχει ανάγκη από ισχυρά αξιόπιστη επικοινωνία, βασίζεται στον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των χρηστών, όπως βέβαια και οι προηγούμενες εφαρμογές. Είναι προφανές ότι όλες οι προαναφερθείσες περιπτώσεις χρήσης αφορούν τα οχήματα μίας συγκεκριμένης περιοχής, οπότε τα κρίσιμα δεδομένα δεν χρειάζεται να είναι διαθέσιμα στο κεντρικό cloud. Ένας ME host, εγκατεστημένος σε σημείο συνάθροισης, έχει τη δυνατότητα να προωθήσει προειδοποιητικά μηνύματα σε ένα σύνολο οχημάτων 92 με ελάχιστη καθυστέρηση, ακόμη και αν αυτά εξυπηρετούνται από διαφορετικό σταθμό βάσης. Επιπλέον, μια εφαρμογή που τρέχει στο edge cloud μπορεί να εκτελεί αλγορίθμους πρόβλεψης κινδύνων σύγκρουσης ή κυκλοφοριακής συμφόρησης σε μια λωρίδα, με βάση πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα των οχημάτων που λαμβάνει από τα ίδια και τους αισθητήρες. Η εύρεση της θέσης των κινούμενων χρηστών θα γίνει πιο αποτελεσματική, με αξιοποίηση του Location API που έχει οριστεί για το MEC.

4.6.2 Διευκόλυνση

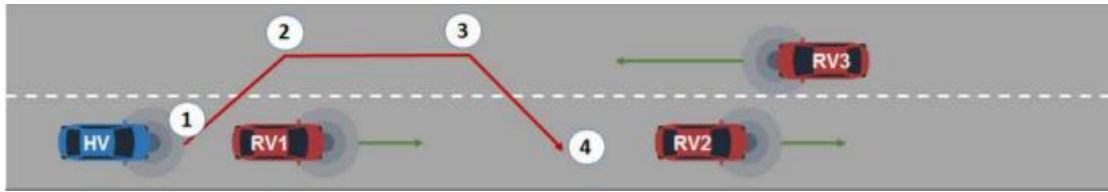
Αυτή η κατηγορία αφορά κυρίως ενημερώσεις λογισμικού και υπηρεσίες τηλεματικής. Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης θέτουν χαλαρότερες απαιτήσεις για το δίκτυο σε σχέση με τις υπόλοιπες εφαρμογές που εξετάζονται, ενώ είναι υποστηρίξιμες και από τις υπάρχουσες τεχνολογίες πρόσβασης. Η εφαρμογή του MEC, όμως, μπορεί να συμβάλει στη μείωση του φορτίου που διακινείται από το δίκτυο κορμού. Σε μια περίπτωση συλλογής δεδομένων κυκλοφορίας, ο διακομιστής MEC λαμβάνει περιοδικά μηνύματα από τα οχήματα και τους αισθητήρες, τα φιλτράρει και αποστέλλει συγκεντρωτικά μηνύματα σε έναν απομακρυσμένο εξυπηρετητή, με πολύ μικρότερο ρυθμό μετάδοσης. Αντίστοιχο όφελος προκύπτει και κατά την κατεύθυνση downlink, αφού οι πληροφορίες κυκλοφοριακής κίνησης και οι ενημερώσεις λογισμικού αποθηκεύονται κοντά στους τελικούς χρήστες και αποστέλλονται σε αυτούς, ενδεχομένως με χρήση πολυεκπομπής. Στις εφαρμογές που βελτιώνουν την εμπειρία των επιβατών ανήκουν και όσες σχετίζονται με την ενημέρωση και τη διασκέδαση (Infotainment). Επειδή πρόκειται κυρίως για κατανάλωση πολυμεσικού περιεχομένου, αυτές οι εφαρμογές δεν αφορούν αποκλειστικά τις επικοινωνίες οχημάτων. Η αποδοτικότητα αυτών βασίζεται στην παράδοση περιεχομένου στους τελικούς χρήστες με υψηλό throughput, χαμηλή καθυστέρηση και ελάχιστες απώλειες, καθώς αυτοί κινούνται. Αυτοί οι στόχοι μπορούν να επιτευχθούν με την τοπική αποθήκευση περιεχομένου και

εφαρμογές όπως η ευφυής επιτάχυνση βίντεο και η καθοδήγηση throughput από το διακομιστή MEC.

4.6.3 Εξελιγμένη υποβοηθούμενη οδήγηση

Οι εφαρμογές υποβοηθούμενης οδήγησης στοχεύουν στη βελτίωση της ροής της κυκλοφοριακής κίνησης, παρέχοντας στον οδηγό χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση που επικρατεί γύρω από αυτόν. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τρεις περιπτώσεις χρήσης, οι οποίες θέτουν τις μεγαλύτερες προκλήσεις για το MEC, καθώς απαιτούν τη μεταφορά υψηλού όγκου δεδομένων προς τα οχήματα με μεγάλη αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση ταυτόχρονα.

- Επίγνωση για την κατάσταση του δρόμου και χάρτες υψηλής ανάλυσης
Μέσω των υπηρεσιών τηλεματικής της προηγούμενης κατηγορίας, τα οχήματα ενημερώνονται για την κυκλοφοριακή κατάσταση με τη λήψη μιας ροής χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Αντίθετα, οι χάρτες υψηλής ανάλυσης παρέχουν στους οδηγούς πληροφορία για το γειτονικό τους περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων τυχόντων κινδύνων επί του οδοστρώματος, σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, το εγγενές χαρακτηριστικό του MEC να παρέχει στους χρήστες τοπική πληροφορία σε πραγματικό χρόνο το καθιστά κατάλληλο για την εξυπηρέτηση τέτοιων εφαρμογών. Προκειμένου να μειωθεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης από την τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης, το MEC μπορεί να συνδυαστεί με υπηρεσίες πολυεκπομπής, όπως η E-MBMS του LTE.
- See-through Ένα σύνηθες πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι οδηγοί σε δρόμους μίας λωρίδας (ανά κατεύθυνση) είναι η μείωση του οπτικού τους πεδίου εξαιτίας ενός φορτηγού. Σε πολλές περιπτώσεις, η απόπειρα προσπέρασης θέτει σε κίνδυνο τόσο τον οδηγό του ίδιου του οχήματος όσο και αυτόν της αντίθετης κατεύθυνσης. Η περίπτωση χρήσης «See-through» αποσκοπεί στη μείωση των ατυχημάτων κατά τη διαδικασία προσπέρασης. Ένα φορτηγό καταγράφει με χρήση κάμερας το οπτικό πεδίο του οδηγού του και το μοιράζεται σε πραγματικό χρόνο με τα οχήματα που βρίσκονται πίσω από αυτό. Αυτή η εφαρμογή θέτει, προφανώς, αυστηρές προϋποθέσεις για υψηλό ρυθμό μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση, οπότε είναι αδύνατο να υλοποιηθεί χωρίς τη χρήση του MEC.

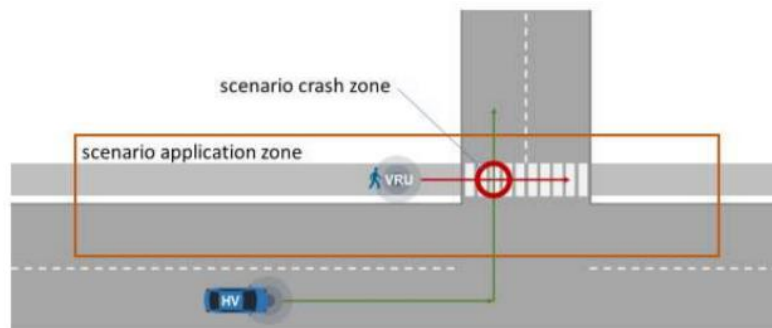


Σχήμα 4.7 Χρήση see through

- iii) Συνεργαζόμενη αλλαγή λωρίδας Ο ρόλος της συνεργαζόμενης αλλαγής λωρίδας (Cooperative Lane Change) είναι παρόμοιος με αυτόν της προηγούμενης περίπτωσης. Αφορά κυρίως αυτόνομα ή ημιαυτόνομα οχήματα, τα οποία επιθυμούν να πραγματοποιήσουν προσπέραση ή να αλλάξουν λωρίδα. Το όχημα ή ο οδηγός αυτού λαμβάνει εντολές από το διακομιστή MEC, για να επιχειρήσει την επιθυμητή μετάβαση ή να την αναβάλει σε περίπτωση κάποιου διερχόμενου οχήματος.

4.6.4 VRUs

Οι VRUs, που αποτελούνται από τους πεζούς και τους ποδηλάτες, γνωστοποιούν την παρουσία τους στο δίκτυο με περιοδικά μηνύματα που αποστέλλουν οι φορητές συσκευές αυτών. Η πληροφορία αυτή αξιοποιείται από τα οχήματα για την αποφυγή ατυχημάτων που συμπεριλαμβάνουν πεζούς. Στο σενάριο του Σχήματος 4.8 ο οδηγός ενός αυτοκινήτου επιθυμεί να πραγματοποιήσει στροφή σε ένα δρόμο, τον οποίο πρόκειται να διασχίσει ένας πεζός. Επομένως, τόσο ο οδηγός όσο και ο πεζός χρήστης πρέπει να ενημερωθούν έγκαιρα για την ύπαρξη και την πρόθεση του άλλου. Όπως και στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας, οι εφαρμογές που σχετίζονται με τους VRUs θα επωφεληθούν από τη μείωση της καθυστέρησης και τη βελτίωση του προσδιορισμού της θέσης των χρηστών που προσφέρει το MEC. Στο [69] συγκρίνεται η απόδοση ενός κυψελωτού συστήματος με και χωρίς την παρουσία του MEC σε μία περίπτωση αυτής της κατηγορίας.



Σχήμα 4.8 VRU

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Μοντέλα συνεργασίας για την ανάπτυξη 5G δικτύων για CAM εφαρμογές

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η «πέμπτη γενιά» τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ή 5G, θα είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την ενίσχυση της ψηφιακής οικονομίας και κοινωνίας στην επόμενη δεκαετία. Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι ένας από τους τομείς που το 5G θα βοηθήσει να μεταμορφωθεί: δυνητικά φαίνεται να έχει τον πιο επαναστατικό αντίκτυπο σώζοντας εκατομμύρια ζωές. Επιπλέον στην ασφάλεια (μείωση οδικών ατυχημάτων), θα παράγει πιο αποτελεσματικά ταξίδια, ελαχιστοποίηση χρόνου ταξιδιών και μποτιλιαρίσματος και βελτίωση των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων. Σε οποιαδήποτε περίπτωση χρήσης που σχετίζεται με την ασφάλεια, έχει επίσης θετικό αντίκτυπο στη συμφόρηση, τις εκπομπές ρύπων και, ως εκ τούτου, οι δημόσιες δαπάνες είναι λιγότερες, υπάρχει δημόσια ικανοποίηση και αποδοχή, καθώς είναι λιγότερα τα ατυχήματα και η ροή της κυκλοφορίας γίνεται πιο ρευστή.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολλές υπηρεσίες αυτοκινήτου, όπως C-ITS, infotainment, ασφαλιστικές, τηλεματικές & διαγνωστικές υπηρεσίες, μπορούν να υποστηριχθούν από το τρέχον παγκόσμια κυψελοειδές πρότυπο LTE-4G, το οποίο θεωρείται ως βασικό θεμέλιο για περαιτέρω πρόοδο προς τη συνδεδεμένη και αυτοματοποιημένη κινητικότητα. Ως συμπληρωματικό, το 5G προσφέρει περαιτέρω (και βελτιωμένες) επιλογές για επικοινωνία C-V2X και φαίνεται να είναι η πιο «μελλοντική απόδειξη» (στροφή) προς την πλήρως αυτόνομη οδήγηση στο μέλλον.

Για παράδειγμα, αν και η τεχνολογία C-V2X είναι διαθέσιμη προς το παρόν, η ένωση 5GAA αναγνωρίζει ότι «για την υποστήριξη των αυτοματοποιημένων οχημάτων του αύριο, η τεχνολογία πρέπει να εξελιχθεί για να καλύψει πιο απαιτητικές απαιτήσεις ασφάλειας. Το 5G θα διευκολύνει αυτήν την εξέλιξη. Προσφέρει εξαιρετική απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και βελτιωμένη αξιοπιστία η οποία επιτρέπει στα οχήματα να μοιράζονται πλούσια δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, υποστηρίζοντας πλήρως αυτοματοποιημένες οδηγικές εμπειρίες».

Επομένως, το 5G-V2X θεωρείται κατάλληλο για προηγμένη οδήγηση και το LTE-V2X για βασικές περιπτώσεις χρήσης ασφάλειας, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει τόσο το δίκτυο όσο και άμεσες επικοινωνίες. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν 5G, βασισμένοι στα δίκτυα 4G. Εν τω μεταξύ, οι προγραμματισμένες εκδόσεις των προτύπων 3GPP περιλαμβάνουν νέα χαρακτηριστικά για άμεσες επικοινωνίες, όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

σε φορητές συσκευές χειρός, επιτρέποντας πρόσθετες περιπτώσεις χρήσης. Η ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών απαιτεί μια καλά ανεπτυγμένη ψηφιακή υποδομή. Όπως και η διάρκεια ζωής, έτσι και οι απαιτήσεις χρήσης της ψηφιακής υποδομής διαφέρουν σημαντικά από τη φυσική υποδομή και συγκεκριμένες (αλλά ολοκληρωμένες) στρατηγικές για τα διάφορα επίπεδα υποδομής μεταφορών απαιτούνται. Αυτό απαιτεί στενότερο συντονισμό μεταξύ διαφορετικών ενδιαφερομένων μερών (και ενδεχομένως ακόμη και άλλα μοντέλα οργάνωσης), όπως είναι τα διάφορα επίπεδα υποδομής που διαχειρίζονται από διαφορετικά μέρη, με κοινές διαμοιρασμένες ευθύνες.

5.1 Συνεργατικό οικοσύστημα

Η διασφάλιση της ταχείας και αποτελεσματικής ανάπτυξης 4G/5G στα οδικά δίκτυα είναι ζωτικής σημασίας για το μέλλον της κινητικότητας και θα έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλά οφέλη για την ασφάλεια, ιδιαίτερα τη μείωση των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων για τους Ευρωπαίους πολίτες [26].

Τρεις μεγάλες βιομηχανίες οι οποίες δραστηριοποιούνται στο συνδεδεμένο περιβάλλον αυτοκινήτου πρέπει να λειτουργήσουν (επιχειρήσουν) στενά για να επιφέρουν αλλαγές εγκαίρως: οι κατασκευαστές οχημάτων (OEMs), οι φορείς εκμετάλλευσης δρόμων (ROs) και οι πάροχοι υπηρεσιών επικοινωνίας (CSP), οι οποίοι περιλαμβάνουν τους φορείς διαχείρισης κινητών δικτύων (MNOs) καθώς και τους ουδέτερους παρόχους υποδομής υποδοχής (NHP). Άλλοι πάροχοι υπηρεσιών (SPs) θα διαδραματίσουν έναν αυξανόμενο ρόλο στο οικοσύστημα, π.χ. αγορά δεδομένων βάσει τοποθεσίας, κινητικότητα ως υπηρεσία (MaaS) κ.λπ.

Κάθε φορέας (OEM, CSP και RO) έχει το δικό του σύνολο απαιτήσεων υψηλού επιπέδου υπηρεσιών, σύμφωνα με τα αντίστοιχα επιχειρηματικά μοντέλα τους, που πρέπει να πληρούνται για να ενεργοποιηθεί η ανάπτυξη. Όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη θα επωφεληθούν από μια σαφή κατανόηση των απαιτήσεων των άλλων, των επιρροών και των μακροπρόθεσμων στόχων καθώς πρέπει να συμβιβαστούν για να επιτευχθεί ένα πραγματικά συνδεδεμένο οικοσύστημα κινητικότητας.

Οι στρατηγικές ανάπτυξης των OEMs καθορίζονται από τις απαιτήσεις εξυπηρέτησης των καταναλωτών, αλλά επηρεάζεται επίσης από το κανονιστικό πλαίσιο (ή από την έλλειψη αυτού). Οι OEMs θα αναπτύξουν μόνο συνδεδεμένες και αυτοματοποιημένες υπηρεσίες κινητικότητας εάν βασίζονται σε ένα βιώσιμο επιχειρηματικό μοντέλο με κερδοφόρες και προστιθέμενης αξίας υπηρεσίες προς τους τελικούς πελάτες. Η βιωσιμότητα ενός τέτοιου επιχειρηματικού μοντέλου θα εκτιμηθεί με βάση το κόστος της απαιτούμενης επικοινωνίας, καθώς και, για ορισμένες υπηρεσίες, την προϋπαρξη της υποδομής C-V2X που απαιτείται για την υποστήριξή τους

(π.χ., 12V). Ρυθμιστική σταθερότητα και προβλεψιμότητα είναι αναγκαίες επίσης για να ενεργοποιηθούν επενδυτικές αποφάσεις.

Αν και υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι οδικών χειριστών (αυτοκινητόδρομος, πόλη, αγροτική, διόδια κτλ), αυτοί μοιράζονται κοινούς στόχους για «ασφαλή, αξιόπιστη, αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική κινητικότητα» απέναντι στην αύξηση της κυκλοφορίας, τη γήρανση των υποδομών και την περιορισμένη κοινή χρηματοδότηση. Οι οδικοί φορείς αναγνωρίζουν την ανάγκη ταυτόχρονης ανάπτυξης ψηφιακής τεχνολογίας οδικών υποδομών και τη βελτίωση των συστημάτων, υπηρεσιών και υποκείμενων υποσρωμάτων. Αυτό γίνεται για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα των δραστηριοτήτων τους αλλά και να υπάρξουν «εγγυήσεις» για τα συμφέροντά τους και να αποφεύγουν την ανάγκη να προσαρμοστούν ή να συμμορφωθούν με αυτό που θα επιτευχθεί από τη βιομηχανία (με κίνδυνο να θέσει πράγματα στο δρόμο που επηρεάζουν αρνητικά την οδική ασφάλεια, τη ροή κυκλοφορίας και το περιβάλλον). Ωστόσο, αυτές οι σημαντικές επενδύσεις δεν μπορούν να είναι πλέον «απομονωμένες και υπό τον απόλυτο έλεγχο του οδικού χειριστή», και μόνο να ανταποκρίνονται στα υποσχόμενα οφέλη εάν ταιριάζουν επίσης με τις προσδοκίες των άλλων ενδιαφερόμενων φορέων του οικοσυστήματος.

Τέλος, οι CSP είναι οι απαραίτητοι ενεργοποιητές του ψηφιακού δρόμου, ως ενδιάμεσοι μεταξύ των OEMs και των οδικών φορέων. Πρέπει να παραδίδουν βάσει των απαιτήσεων υπηρεσιών και επικοινωνιών τόσο των OEMs όσο και των χειριστών δρόμων ενώ υπόκεινται σε συγκεκριμένες κανονιστικές απαιτήσεις ως φορείς παροχής υπηρεσιών. Ως ιδιωτικοί φορείς, έχουν επίσης τις δικές τους χρηματοοικονομικές και λειτουργικές απαιτήσεις για τη διατήρηση της κερδοφορίας των επιχειρήσεων σε επενδύσεις κεφαλαίου π.χ., όσον αφορά τη διάδοση των υποδομών, τα μοντέλα εξυπηρέτησης και συνεργασίας. Η συνεργασία μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων, ιδιωτικών και δημόσιων, είναι ζωτικής σημασίας για τους φορείς εκμετάλλευσης οδών και τις δημόσιες αρχές σε ολόκληρη την Ευρώπη για την επίτευξη των πολιτικών τους στόχων [26].

Αξιοποιώντας συνέργειες με τις υπάρχουσες υποδομές CSP, παράλληλα με τους δημόσιους φορείς εκμετάλλευσης δρόμων, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις επενδύσεις τους μέσω κοινών οικονομικών πρωτοβουλιών και κοινών στόχων στις περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη για νέες δημόσιες επενδύσεις. Θετικός λοιπόν χαρακτηρίζεται ο ρόλος των CSPs και μπορούν να αποτελέσουν γέφυρα μεταξύ πελατών και οδικών φορέων - όταν απαιτείται συνεργασία.

5.2 Τρέχουσα έρευνα

Κατά τη σύνταξη αυτού του υποκεφαλαίου, ένας από τους προβληματισμούς ήταν αν συγκεκριμένα μοντέλα συνεργασίας ή ορισμένα στοιχεία πρέπει να περιλαμβάνονται στα προγράμματα εργασίας (work programmes) CEF. Συνοπτικά, δεν θα είναι εφικτό ή κατάλληλο να «καθοριστεί το σωστό μοντέλο» στο πλαίσιο αυτό του γύρου χρηματοδότησης CEF2.

Αυτή η άποψη μπορεί να υποστηριχθεί από δύο πρόσφατες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί πρόσφατα σε αυτήν την περιοχή [26].

- Έκθεση CERRE σχετικά με την υλοποίηση συνεπενδύσεων και κοινής χρήσης δικτύου.

Σε σχέση με τις μελέτες περιπτώσεων που εξετάστηκαν ανά χώρα, η παρούσα έκθεση κατέληξε στα εξής:

- Τα μειονεκτήματα της κοινής χρήσης υποδομής που συζητήθηκαν είναι πιθανά ανησυχίες και έχουν αντιμετωπιστεί σε διαφορες περιπτώσεις.
 - Έχουν λάβει χώρα πολύ διαφορετικές μορφές και εντάσεις κοινής χρήσης υποδομής, και θεωρούνται ως επί το πλείστον επιτυχημένες, και
 - Δεν υπάρχει μια καλύτερη μορφή, αλλά είναι σημαντικό να αντιμετωπίσουμε τις ανησυχίες που συζητούνται εδώ όταν σχεδιάζονται οι συμφωνίες.
- Έκθεση GSMA σχετικά με την κοινή χρήση υποδομής κινητής τηλεφωνίας

Αυτή η έκθεση εξετάζει λεπτομερώς διαφορετικές εκτιμήσεις που σχετίζονται με την υποδομή κοινής χρήσης, με επίκεντρο:

- Τα είδη των μοντέλων κοινής χρήσης υποδομής δικτύου που είναι διαθέσιμα σε χειριστές (κοινή χρήση τοποθεσίας, κοινή χρήση ιστού, κοινή χρήση RAN, συνεννόηση MEC, κεντρικό δίκτυο κοινής χρήσης και περιαγωγή δικτύου)
- Η στρατηγική λογική πίσω από την κοινή χρήση δικτύου (παράγοντες κοινής χρήσης υποδομής και η επιχειρηματική υπόθεση για κοινή χρήση υποδομής)
- Ρυθμιστικές εκτιμήσεις (βελτιώσεις απόδοσης: κάλυψη, ποιότητα και τιμολόγηση, επιπτώσεις στον ανταγωνισμό, κανονιστική έγκριση για κοινή χρήση υποδομής, έλεγχοι επί των τελών και κανονιστικές εγγυήσεις), και
- Τεχνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα (τεχνικοί περιορισμοί στην υποδομή κοινής χρήσης και περιβαλλοντικές επιπτώσεις).

Οι εργασίες της GSMA σε αυτόν τον τομέα έδειξαν επίσης ότι οι συμφωνίες κοινής υποδομής μπορούν να λάβουν πολλές διαφορετικές μορφές. Αυτό σημαίνει ότι τα οφέλη και τα μειονεκτήματα της υποδομής κοινής χρήσης μπορούν να ποικίλουν και οι γενικές επιπτώσεις και/ή προβλέψεις μπορεί να μην είναι ακριβείς.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στο έγγραφο (White Paper) της 5GAA για την επέκταση δικτύου CSP απαιτούνται να αναπτυχθούν μηχανισμοί (έξοδα) για την εκπλήρωση των απαιτήσεων των συνδεδεμένων οχημάτων με στόχο τη ρύθμιση υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Αυτά τα έξοδα βασίζονται κυρίως σε [26]:

1. Βελτιστοποίηση της θέσης των κεραιών: ενδέχεται οι φορείς δικτύου να επιστρέφουν στην υποβέλτιστη τοποθέτηση κεραιών. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί την εγκατάσταση νέων κεραιών.
2. Εύρεση νέων τοποθεσιών και ανέγερση ιστών: ο χρόνος επεξεργασίας και το κόστος λήψης οικοδομικής άδειας είναι το μεγαλύτερο κόστος. Μειωμένο κόστος για τον ιστό μπορεί να είναι αποτέλεσμα της κοινής χρήσης (δημόσιας) υποδομής, π.χ. πόλοι λαμπτήρων, φανάρια, φράγματα θορύβου, διαφημιστικές οθόνες, μέσα μαζικής μεταφοράς οθόνες πληροφοριών κλπ
3. Πρόσβαση στην τροφοδοσία: Η σύνδεση με ήδη υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα, η κοινόχρηστη χρήση αγωγών κλπ. θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το κόστος.
4. Πρόσβαση σε σύνδεση ινών ή παρόμοια: Η σύνδεση με ήδη υπάρχοντα (δημόσια) δίκτυα ινών, η κοινή χρήση αγωγών κλπ. θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά τα κόστη.

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) για το τμήμα πρόσβασης Radio σε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G σχετίζονται έντονα με τη ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται. Σε περιοχές της πόλης, όπου θα χρησιμοποιούνται 3,5 GHz και 26 GHz, οι πυκνότητες των σταθμών βάσης είναι σημαντικά υψηλότερες από ό, τι στις αγροτικές περιοχές, όπου τα 700 MHz είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιηθούν. Επομένως, η διαθεσιμότητα επαρκούς φάσματος μετατοπίζεται στα δεξιά.

Οι ζώνες είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας κόστους. Παραδείγματα λειτουργικών δαπανών (OPEX) είναι οι δαπάνες συντήρησης, άδειας και το λειτουργικό κόστος της τοποθεσίας. Βρέθηκαν σαφείς συνέργειες με την ανάπτυξη οδικών φορέων που επιτρέπουν επιχειρηματικές βελτιώσεις για επέκταση δικτύου για φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

- ο Απλοποιημένες άδειες τοποθεσίας: οι αρχές σχεδιασμού μπορούν να διασφαλίσουν ότι οι διαχειριστές του κινητού δικτύου λαμβάνουν

γρήγορες και εύκολες εγκρίσεις για άδεια σχεδιασμού και οικοδομικές άδειες καθώς και εύκολη πρόσβαση σε ταράτσες και καλωδίωση εντός κτιρίων.

- ο Παροχή πρόσβασης σε παθητική υποδομή: οι οδικοί χειριστές μπορούν να παρέχουν εύκολη πρόσβαση και προβλέψιμη πρόσβαση σε παθητική υποδομή, όπως είναι οι αγωγοί και πόλοι, σκοτεινές ίνες (dark fibers), και η ηλεκτρική ισχύς που επιτρέπει την αποδοτική κατασκευή δικτύων κινητής τηλεφωνίας.
- ο Η κοινή χρήση οδικών χειριστών οδικής υποδομής μπορεί να προσφέρει εύκολη, ασφαλή και προβλέψιμη πρόσβαση σε δημόσια περιουσιακά στοιχεία, όπως είναι πόλοι λαμπτήρων, τα σήματα κυκλοφορίας, κλπ. για να καταστεί δυνατή η αποδοτική κατασκευή δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

5.3 Γενικές κατευθύνσεις

Συνοψίζοντας, οι διαφορετικές επιλογές που έχουν προσδιοριστεί δεν είναι αμοιβαία αποκλεισμένες και καμία δεν πρέπει να αποκλειστεί ως βιώσιμη επιλογή προς διερεύνηση ως μέρος του CEF Digital 2. Στην πράξη, τουλάχιστον μερικές από αυτές τις επιλογές μπορούν να συνδυαστούν (π.χ. επένδυση από τον ΜΝΟ σε ενεργό δίκτυο 5G σε συνδυασμό με οδικό φορέα ή επενδύσεις από ουδέτερο πάροχο κεντρικού υπολογιστή (NHP) σε παθητικές υποδομές).

Οι φορείς εκμετάλλευσης οδών, δημόσιοι και ιδιωτικοί, πρέπει να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη δυνατότητα και διευκόλυνση της πρόσβασης στις απαιτούμενες εγκαταστάσεις για τη δημιουργία δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Για παράδειγμα, έρευνα τρίτων μερών της Επιτροπής εντόπισε τη διαθεσιμότητα και την πρόσβαση στο δρόμο οπτικών ινών ως βασικό στοιχείο για την εκπλήρωση των στόχων του CEF2.

Υπολογίζεται ότι σε ποσοστό «20 έως 50% οι αυτοκινητόδρομοι επωφελοούνται από μια υπάρχουσα υποδομή επισκευής ινών κατάλληλη για υποστήριξη ανάπτυξης 5G». Επιπλέον, ένας σημαντικός αριθμός οδικών φορέων θα χρειαστεί για την εγκατάσταση νέων ή την αναβάθμιση των ινών και της ισχύος τους. Κατάλληλη για χρήση, η πρόσβαση σε αγωγούς είναι επίσης ζητούμενο.

Υπάρχουν επίσης αρκετές σημαντικές ρυθμιστικές εξαρτήσεις, που σχετίζονται κυρίως με οδηγίες για τη μείωση του κόστους ευρυζωνικών συνδέσεων με βάση τον Ευρωπαϊκό κώδικα ηλεκτρονικών επικοινωνιών. Οι ιδιωτικές εταιρείες που διαθέτουν δικά τους κεφάλαια σε έργα CEF2 πρέπει να διαθέτουν τα κατάλληλα κίνητρα για επενδύσεις (π.χ., ανάγκη διασφάλισης

αυτών που διακινδυνεύουν βάζοντας τα δικά τους χρήματα σε αυτούς έχουν τα κατάλληλα κίνητρα για να το κάνουν). Οποιοσδήποτε κανόνας πρέπει να είναι τέτοιος ώστε κάθε ιδιωτική επένδυση που πραγματοποιήθηκε να κερδίσει τουλάχιστον το προσαρμοσμένο κίνδυνο Μέσο σταθμικό κόστος κεφαλαίου (WACC) [26].

5.4 Προτεινόμενα μοντέλα συνεργασίας (cooperation models)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα προτεινόμενα μοντέλα συνεργασίας όπως καθορίστηκαν από τον οργανισμό 5G AA [26] στο έτος 2021.

5.4.1 Επένδυση από τους MNOs για πλήρες λειτουργικό δίκτυο 5G

Το πιο εύλογο μοντέλο ανάπτυξης είναι η επένδυση των MNOs σε ένα πλήρως ενεργό δίκτυο 5G. Σε αυτό το σενάριο, οι MNOs μπορούν να χρησιμοποιήσουν το δικό τους δίκτυο για να παραδώσουν ένα ευρύ φάσμα για υπηρεσίες CAM, συμπεριλαμβανομένων των σχετικών με την ασφάλεια υπηρεσιών, ως η γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων και της συνδεδεμένης οδικής υποδομής.

Σήμερα, οι κρίσιμες για την ασφάλεια υπηρεσίες για Ημέρα 1 ή Ημέρα 1.5 C-ITS μπορούν να παρασχεθούν μέσω ενός μηχανισμού ανταλλαγής δεδομένων που δεν απαιτεί πραγματικά συμβατική σχέση μεταξύ RO και MNO, δεδομένου ότι τα δεδομένα θα μεταβιβάζονται μέσω ολοκληρωτών (integrators) νέφους/δεδομένων, όπως είναι το TomTom, κ.λπ

Ενώ οι OEMs έχουν συμβατική σχέση με τους MNOs για την παροχή συνδεσιμότητας στα οχήματα και τον ολοκληρωτή νέφους/δεδομένων, οι RO θα είχαν παρόμοια σχέση με τον ολοκληρωτή νέφους/δεδομένων, π.χ., για την ενημέρωση οδικής σήμανσης κλπ. Αυτό είναι πιθανό να απαιτήσει συμφωνίες περιαγωγής για να επιτρέπεται η απρόσκοπτη μετάβαση από ένα δίκτυο MNO σε άλλο.

Για απρόσκοπτη και βέλτιστη παροχή τέτοιων υπηρεσιών, απαιτείται συνεχής κάλυψη δικτύου κινητής τηλεφωνίας κατά μήκος των δρόμων. Οι οδικοί φορείς μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη μιας τέτοιας κάλυψης διευκολύνοντας την πρόσβαση σε παθητική υποδομή. Σε ορισμένες χώρες, οι ρυθμιστικές αρχές ζήτησαν υποχρεώσεις οδικής κάλυψης έναντι των MNOs π.χ., στο πλαίσιο δημοπρασιών 5G. Ωστόσο, η ένωση 5GAA υπογραμμίζει ότι αυτό πρέπει να θεωρείται πάντα ως μέρος μιας σειράς συνδεδεμένων μέτρων πολιτικής.

Διαπιστώθηκαν επίσης αρκετές αποτυχίες της αγοράς, ιδίως σε διασυνοριακές περιοχές στην ατζέντα στρατηγικής ανάπτυξης 5G. Πρέπει να διατεθούν συγκεκριμένες επενδύσεις για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων,

λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν συνδέονται απαραίτητα με κενά στις υποδομές αλλά με τη διαρροή (spill-over) σε Radio, τα σχετικά όρια κάλυψης και το διασυννοριακό συντονισμό συχνοτήτων.

Η αντιμετώπιση των λευκών κηλίδων (white spots) ενδέχεται να απαιτεί τον ορισμό ενός στοχευμένου μοντέλου συνεργασίας ανάλογα με τις ειδικές τοπικές συνθήκες (π.χ. γεωγραφική κατάσταση, η εμπλοκή και διαθεσιμότητα οδικών χειριστών και άλλων τύπων φυσικής υποδομής, το διαθέσιμο φάσμα, τη διαθεσιμότητα εταιρειών πύργων κλπ). Σε αυτή τη συγκυρία, υπάρχουν περιορισμένοι αριθμοί παραδειγμάτων πραγματικών περιπτώσεων χρήσης που θα απαιτούσε άμεση συνεργασία μεταξύ CSP και RO. Ένα πιθανό σενάριο είναι μια απλή σχέση μεταξύ MNO-RO (π.χ., για τη σύνδεση επιτήρησης από κάμερες των RO με το 5G).

5.4.2 Επένδυση από τους RO με παθητική υποδομή

Απαιτούνται αναβαθμίσεις οδικής υποδομής για την ανάπτυξη των περισσότερων οχημάτων σε υποδομές (V2I) ή Vehicle-to-Network-to-Infrastructure (V2N2I), ανεξάρτητα από το αν τα κυψελοειδή δίκτυα ή RSUs χρησιμοποιούνται τελικά. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχουν διαθέσιμες ίνες και ηλεκτρική ισχύς, αλλά πρέπει να εγκατασταθούν racks. Επιπλέον, οι οδικές υποδομές και/ή οι οδικές μονάδες (RSU) πρέπει να συνδεθούν με το σύστημα backend, και αυτό το σύστημα backend πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθεί τα γεγονότα σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Ακόμα κι αν σε ορισμένες περιπτώσεις η υπηρεσία παράδοσης μπορεί να λειτουργήσει με ελάχιστη ενσωμάτωση με την υποδομή, σε κάποιο επίπεδο η ενσωμάτωση απαιτεί κεντρικά συστήματα για τη διανομή πιστοποιητικών ασφαλείας.

Ορισμένες περιοχές και πόλεις έχουν ήδη αναβαθμίσει τις υποδομές, έτσι να επιτυγχάνεται σημαντικά μείωση του κόστους για την παροχή υπηρεσιών V2I (ή V2N2I). Ωστόσο, δε συμβαίνει αυτό σε πολλές πόλεις όπου υπάρχει διαφορετικός (και μερικές φορές πολλαπλός) έλεγχος κυκλοφορίας. Έχοντας υπόψη τους υφιστάμενους περιορισμούς που σχετίζονται με τις δημόσιες επενδύσεις, η 5GAA πιστεύει ότι η προσπάθεια πρέπει να εστιάσει στη δημιουργία ενός υποστηρικτικού και φιλικού προς τις επενδύσεις περιβάλλοντος.

Μεσολάβηση ινών και υπηρεσιών κοινής ωφέλειας (π.χ. ηλεκτρική ενέργεια): Η εισαγωγή νέου εξοπλισμού Radio 5G στο RAN αναμένεται να απαιτήσει περισσότερες πυκνές τοποθεσίες για Radio. Για την ανάπτυξη στο δρόμο, αυτό θα απαιτήσει την εγκατάσταση πρόσθετων σταθμών βάσης και κέντρων δεδομένων αιχμής που σημαίνει σημαντικές νέες επενδύσεις CAPEX. Όπως εξηγείται στο έγγραφο (white paper) 5GAA Entex12, θα γίνει η ανάπτυξη αυτής της πρόσθετης υποδομής επωφελής ανεξάρτητα από τις ζώνες

φάσματος που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη 5G.13 CSP και διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό εάν οι οδικοί φορείς εκχωρήσουν στους CSP πρόσβαση σε βασική παθητική υποδομή (ίνες, ηλεκτρισμός). Οι λειτουργίες συντήρησης και συντήρησης από τους MNOs είναι εξαιρετικά ασφαλείς, η πρόσβαση πρέπει να οργανωθεί σε κοινή υποδομή σε συνεργασία με τους οδικούς φορείς για τη διασφάλιση της συνέχειας των υπηρεσιών, αλλά δεν αναμένεται να προκαλέσει διακοπή ή διατάραξη στην κίνηση.

Η παροχή συνδεσιμότητας οπτικών ινών σε νέες τοποθεσίες αναμένεται να είναι ένα από τα βασικά στοιχεία κόστους. Ως εκ τούτου, η ιδέα να επιτραπεί στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας να κάνουν χρήση των δυνατοτήτων των οπτικών ινών που δεν χρησιμοποιούνται επαρκώς από τους φορείς εκμετάλλευσης οδών για να μειώσουν το κόστος CAPEX έχει γίνει δημοφιλής στην κοινότητα 5G για την κάλυψη στην άκρη του δρόμου.

Κοινή χρήση τοποθεσιών για σταθμούς: Μπορούν να διακριθούν δύο τύποι κοινής χρήσης τοποθεσίας: χρήση ιδιωτικής δημόσιας υποδομής από φορείς δικτύου κινητής τηλεφωνίας ή NHP και κοινή χρήση ιστών (ιδιόκτητων) μεταξύ MNOs. Η κοινή χρήση υποδομής που ανήκει σε ιδιωτικές εταιρείες είναι επίσης μια επιλογή, ωστόσο αυτό γίνεται με εμπορικές συμφωνίες μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών.

- ο Δημόσια

Η πρώτη πτυχή αφορά την κοινή χρήση δημόσιας υποδομής. Για αυτά, έχει καθορισθεί ο Ευρωπαϊκός Κώδικας Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών 14. Σύμφωνα με το άρθρο 57- 4 του κώδικα αυτού, οι MNOs πρέπει να έχουν το δικαίωμα να χρησιμοποιούν δημόσια κτίρια και άλλες υποδομές για την ανάπτυξη μικρών κυψελών.

- ο Ιδιωτικά

Η δεύτερη πτυχή της κοινής χρήσης τοποθεσίας είναι η κοινή χρήση στοιχείων δικτύου (ιδιόκτητου) και συναφών εγκαταστάσεων μεταξύ των MNOs. Αυτό απαιτήθηκε με βάση την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/21/EK και έχει ήδη εφαρμοστεί από πολλές χώρες στην Ευρώπη. Για παράδειγμα, η ολλανδική εθνική νομοθεσία απαιτεί εδώ και αρκετό καιρό από τους παρόχους των υπηρεσιών ηλεκτρονικής επικοινωνίας και των ιστών να συμμορφώνονται με τα αιτήματα για κοινή χρήση των τοποθεσιών τους και των συστημάτων κεραιών τους.

Εν κατακλείδι, η στενή συνεργασία μεταξύ οδικών φορέων, MNOs και NHP θα είναι αμοιβαία επωφελής, επιτρέποντας σημαντικές οικονομίες κλίμακας για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη. Αυτό θα αποτρέψει επίσης ατυχείς καταστάσεις όπου το δημόσιο χρήμα τελικά σπαταλήθηκε λόγω κακής ευθυγράμμισης με τις πραγματικές ανάγκες ή τρόπους εργασίας του ιδιωτικού τομέα. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός της αρχικής πρότασης ενός οδικού χειριστή που συνδυάζει επενδύσεις σε παθητικές υποδομές και ένα ουδέτερο μοντέλο

υποδοχής απέτυχαν να προσελκύσουν τους MNOs, παρά το αρχικό ενδιαφέρον, λόγω της βαθμονόμησης του ρόλου του μεσίτη.

5.4.3 Συνεπένδυση από τους RO και τους MNOs σε λειτουργικό κινητό δίκτυο μαζί με υποδομή RSU

Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη του Ricardo που πραγματοποιήθηκε για τη 5GAA, μία πρόταση που προκάλεσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τους MNO και τους οδικούς φορείς είναι η από κοινού ανάπτυξη των μικρών κυψελών ενδεχομένως συνδυασμένες με RSU στη ζώνη 5,9 GHz σε στοχευμένες περιοχές. Οι ROs μπορούν επίσης να συνεργαστούν με NHP ως μέρος του οικοσυστήματος για την ανάπτυξη RSU.

Αυτή η ευκαιρία απαιτεί περαιτέρω ανάλυση και εμπειρικές μελέτες για τον εντοπισμό πιθανών συνεργιών και επιχειρησιακών επιπτώσεων (π.χ. ασφάλεια) της άρθρωσης RSU και της ανάπτυξης μικρών κυψελών. Μια πρώτη προκαταρκτική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε από την Deutsche Telekom σε περιβάλλον πόλης διαπίστωσε ότι λιγότερο από το 20% των τοποθεσιών θα μπορούσαν να είναι κατάλληλες για τέτοια κοινή ανάπτυξη.

Αυτό αφορά κυρίως τον αστικό τομέα όπου η ανάπτυξη μικρών κυψελών μπορεί να υποστηρίξει την πυκνότητα του κυψελοειδούς δικτύου, η οποία θα είναι σημαντική για τους MNOs για την υποστήριξη της αυξημένης ικανότητας που απαιτείται για την επίτευξη των πλήρων οφελών του 5G (ειδικά mmWave) και φιλοξενεί έναν αυξανόμενο αριθμό χρηστών και υπηρεσιών που μεταδίδουν δεδομένα συνδεσιμότητας μέσω του κυψελοειδούς δικτύου. Σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους, η συνεργασία πρέπει να στοχεύει σε πλήρη κάλυψη της κυψελοειδούς υπηρεσίας V2N και ανάπτυξης RSU σε 5,9 GHz (μόνο hotspots). Η ανάπτυξη συνδεδεμένου υλικού μπορεί να είναι μια σημαντική επιχείρηση όσον αφορά τον προγραμματισμό, την πρόσβαση σε υπηρεσίες κοινής ωφέλειας (ηλεκτρική ενέργεια, επισκευή) και τη συντήρηση. Σε αγροτικές περιοχές, μπορεί να υπάρχουν συγκεκριμένες προκλήσεις γύρω από τη διαθεσιμότητα ισχύος και δικτύων backhaul, ενώ η ανάπτυξη σε αστικές και προαστιακές περιοχές είναι επίσης υπό συζήτηση λόγω περιορισμών χωροταξίας και αδειοδότησης.

Η προγραμματισμένη αύξηση των περιοχών μικρών κυψελών, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, σημαίνει ότι υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον από τους MNOs για τον εντοπισμό ευκαιριών συνεργασίας που μπορούν να εξοικονομήσουν μέρος του κόστους και την υποστήριξη της επιχειρηματικής υπόθεσης για την εγκατάσταση νέων ιστότοπων κινητής τηλεφωνίας, όπως είναι οι μικρές κυψέλες.

Όταν εξετάζεται η ανάπτυξη RSU και μικρών κυψελών, πέντε τύποι συνεργίας θα μπορούσαν να διερευνηθούν:

- Πρόσβαση και άδεια για ανάπτυξη σε κατάλληλα επίπεδα δρόμου
- Πρόσβαση στην τροφοδοσία για τη λειτουργία της μονάδας
- Πρόσβαση σε backhaul για συνδεσιμότητα με κεντρικά συστήματα (RSU) ή κεντρικό δίκτυο (SC)
- Κοινή χρήση μονάδας ή συνδεσιμότητας και στοιχείων λογισμικού για ανάπτυξη εφαρμογών
- Κοινή χρήση προσπαθειών για εγκατάσταση και συντήρηση

5.5 Εμπορικές συνεργασίες

Ένα άλλο βιώσιμο μοντέλο συνεργασίας είναι οι εμπορικές συμφωνίες μεταξύ της βιομηχανίας και των δημόσιων αρχών ώστε να παρέχουν επαρκή κάλυψη δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ένα επιτυχημένο παράδειγμα εμπορικής συμφωνίας είναι η ανάπτυξη του προτύπου GSM-R για σιδηροδρομικές επικοινωνίες. Ωστόσο λόγω των ιδιομορφιών των κανονισμών για τις τηλεπικοινωνίες και του εφαρμοστέου δικαίου ανταγωνισμού, περαιτέρω αξιολόγηση του θα ήταν απαραίτητη για τη σκοπιμότητα τέτοιων εμπορικών συμφωνιών. Μια πιθανή επιλογή θα ήταν για έναν οδικό φορέα να συνάψει συμφωνία με τους MNOs για την παροχή κάλυψης κινητού δικτύου σε συγκεκριμένες περιοχές, π.χ. σήραγγες.

Τεμαχισμός δικτύου: Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι πολλαπλών υπηρεσιών από τη φύση τους, πράγμα που σημαίνει ότι οι δυνατότητες μοιράζονται μεταξύ τους διαφορετικές υπηρεσίες που πρέπει να παρέχονται στους τελικούς πελάτες. Εάν το επιθυμεί ένας οδικός χειριστής προσφέρουν συγκεκριμένες υπηρεσίες με ειδικές απαιτήσεις σε επίπεδο υπηρεσίας, οι MNO θα είναι ευπρόσδεκτοι την ευκαιρία να συνάψετε μια εμπορική συμφωνία και να προσφέρετε ένα ειδικό κομμάτι παρέχουν τέτοιες υπηρεσίες σύμφωνα με τις προβλεπόμενες απαιτήσεις.

Ενεργή κοινή χρήση δικτύου: Η κοινή χρήση δικτύου είναι μια άλλη επιλογή στην εργαλειοθήκη που μπορεί να αποδειχθεί επωφελής σε συγκεκριμένες αγορές ή γεωγραφικές περιοχές. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι πραγματικές συνθήκες της αγοράς πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εξέταση κάθε μοντέλου συνεργασίας για να καταλήξουμε στο καταλληλότερο μοντέλο για κάθε αγορά.

Μια προσέγγιση κοινής χρήσης υπέρ δικτύου μπορεί να προσφέρει οφέλη όταν διατηρείται ο εθνικός ανταγωνισμός βάσει δικτύου (μεταξύ των μερών κοινής χρήσης και άλλων φορέων εκμετάλλευσης του δικτύου). Ο ανταγωνισμός στο δίκτυο καθοδηγείται κυρίως από την ικανότητα σε περιοχές με μεγάλη κίνηση (αστικές και προαστιακές περιοχές) και την κάλυψη σε περιοχές με χαμηλή κίνηση (αγροτικές περιοχές).

Μεταξύ των πρόσφατων παραδειγμάτων συμφωνιών κοινής χρήσης δικτύου αναφέρονται τα εξής:

- Συμφωνία O2 και Vodafone29 στο Ηνωμένο Βασίλειο για κοινή χρήση ενεργού εξοπλισμού 5G, όπως οι κεραιές Radio, σε κοινές τοποθεσίες δικτύου σε ολόκληρο το Ηνωμένο Βασίλειο, σε μη εμπορικά ελκυστικές περιοχές (23 από τις μεγαλύτερες πόλεις έχουν αποκλειστεί από τη συμφωνία)
- Συμφωνία Deutsche Telekom, Vodafone και Telefonica για τη βελτίωση της κάλυψης LTE στην αγροτική Γερμανία σε περίπου 6.000 λευκές κηλίδες και 4.000 γκριζες κηλίδες (το τελευταία που αφορά μόνο την DT και τη Vodafone)
- Κοινή επιχειρηματική συνεργασία μεταξύ Proximus και Orange για κοινόχρηστο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για την αγορά του Βελγίου.

Γενικά, πρέπει να υποστηρίζεται η κοινή χρήση του δικτύου. Αυτό υπενθυμίζεται στην τελευταία σύσταση της ΕΚ σχετικά με τις βέλτιστες πρακτικές για την ανάπτυξη του δικτύου. Μια τέτοια συμφωνία επιτρέπει την πιο πράσινη, ταχύτερη και λιγότερο δαπανηρή κυκλοφορία. Το νομικό καθεστώς που εφαρμόστηκε σε αυτούς πρέπει να αποσαφηνιστεί για να παρέχει ενισχυμένη ασφάλεια δικαίου σε ιδιωτικούς φορείς που εισέρχονται σε τέτοια σχέδια. Από αυτή την άποψη, αξίζει να ληφθεί υπόψη ότι οι συμφωνίες κοινής χρήσης δικτύου (NSAs), μεταξύ φορέων εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας (MNOs), με σκοπό την επιτάχυνση της εξάπλωσης του 5G σε όλη την ΕΕ, συχνά θεωρούνται ανταγωνιστικές. Αυτή η έλλειψη συνέπειας στους στόχους συνδεσιμότητας που παρουσιάζει η ΕΕ επηρεάζει δυσμενώς τη διάδοση της τεχνολογίας και τη συνδεσιμότητα υψηλής ποιότητας σε όλη την ΕΕ, δημιουργεί νομική αβεβαιότητα και αυξάνει το κόστος για την ανάπτυξη 5G.

Οι MNOs πρέπει να έχουν μεγαλύτερη ελευθερία να συμμετέχουν στην ενεργή κοινή χρήση δικτύου, υπό τον όρο ότι πληρούνται ορισμένα κριτήρια όσον αφορά τον ανταγωνισμό. Τέτοια κριτήρια πρέπει να καθορίζονται με σαφήνεια για τη βελτίωση της ασφάλειας δικαίου, π.χ.

- Εγγυήσεις όσον αφορά την ικανότητα εμπορικής διαφοροποίησης.
- Η κοινή χρήση φάσματος δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής και κάθε χειριστής έχει το δικό του backhaul δίκτυο (ενώ αυτό μπορεί να βασίζεται σε backhaul/fiber sharing).
- Διασφαλίσεις για την ανταλλαγή ευαίσθητων πληροφοριών στον ανταγωνισμό.
- Εύλογη γεωγραφική περίμετρος σε πυκνές περιοχές, όλοι οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου να έχουν ήδη εκτεταμένη κάλυψη δικτύου (με δικό τους δίκτυο ή με βάση εμπορικές συμφωνίες).
- Οι φορείς που δεν συμμετέχουν στη συνεργασία έχουν επαρκή κάλυψη στην περιοχή που αφορά η συμφωνία κοινής χρήσης.

Η 5GAA πιστεύει ότι, αντί να επιδιώκει μεμονωμένες υποθέσεις (οι οποίες σχετίζονται κυρίως με την κληρονομιά και τις τρέχουσες τεχνολογίες) η Επιτροπή πρέπει να επικεντρωθεί στην έκδοση κατευθυντήριων γραμμών ή άλλων μορφών καθοδήγησης σε MNOs που εξηγούν πότε μπορεί να είναι η κοινή χρήση δικτύου (5G) προβληματική και επίσης καθορισμό των προϋποθέσεων υπό τις οποίες οι NSAσ θα ήταν συμβατές με το άρθρο 101 ΣΛΕΕ.

Η παθητική πρόσβαση και η συνεπένδυση είναι συμπληρωματικές-απαιτούνται πολλές επιλογές ανταγωνιστών στην αγορά - π.χ. αγορές όπως η Ισπανία και η Πορτογαλία οι οποίες έχουν υιοθετήσει έγκαιρα παθητική πρόσβαση έχουν τη σωστή ωριμότητα και ανταγωνιστικότητα σε επίπεδο δικτύου τώρα για συνεργατικό μοίρασμα δικτύων και συνεπένδυση.

5.6 Συμπεράσματα

Οι διάφορες επιλογές για μοντέλα συνεργασίας που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο πρέπει να είναι όλες επιλέξιμες βάσει του CEF Digital 2 καθώς δεν αλληλοαποκλείονται και ενδέχεται να φέρουν περισσότερα οφέλη του οικοσυστήματος όταν συνδυάζονται. Παρ'όλα αυτά, ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο που θα περιλαμβάνει ROs, MNOs, NHsP και OEMs αναμένεται από το 2024 και μετά, με ευρεία εισαγωγή της ασφάλειας και αυτόματης χρήσης οδήγησης όπως υποστηρίζονται από το C-V2X.

Ωστόσο, αυτές οι προηγμένες υπηρεσίες, που επιτρέπονται από την εξέλιξη των τεχνολογιών επικοινωνίας, θα αποδίδουν τα αναμενόμενα κοινωνικά οφέλη εάν συνδυάζονται με σημαντικές επενδύσεις σε ψηφιακά δίδυμα (digital twins) για οδική υποδομή και διαχείριση της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων λειτουργίας και διεπαφών MEC και IoT.

Ο οδικός χάρτης της 5GAA με τίτλο «Απόδοση κυκλοφορίας» παραθέτει τις περιπτώσεις χρήσης εισόδου με τις οποίες γίνεται συζήτηση σχετικά με το ποιοι φορείς εκμετάλλευσης οδών μπορούν να προχωρήσουν προς ένα πραγματικό όραμα για τους Ψηφιακούς Δρόμους. Ως αρχικό βήμα, η ψηφιακή υποδομή θα φέρει δυναμικές πληροφορίες κυκλοφορίας, προειδοποιήσεις κινδύνου και χάρτες HD στον οδηγό (έως το 2024). Σε ένα δεύτερο βήμα, οι συνεργατικοί ελιγμοί και οι αισθητήρες HD σε κοινή χρήση -που παρέχονται από τους φορείς εκμετάλλευσης οδών- θα υποστηρίξουν την αυτοματοποιημένη οδήγηση πάνω από το επίπεδο 2 μέσω της «συνεργατικής αντίληψης» (2026). Τέλος, θα ενεργοποιηθεί η δυναμική συνεταιριστική οδήγηση με την υποστήριξη των οδικών χειριστών σε επιλεγμένα σημεία πρόσβασης (π.χ. διασταυρώσεις) κατά το έτος 2029.

Τα μελλοντικά μοντέλα συνεργασίας πρέπει να αντανakλούν τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των OEMs, καθώς η ανάπτυξη της υποδομής δεν μπορεί να αποσπαστεί από τις επιχειρησιακές εκτιμήσεις για την ενεργοποίηση μελλοντικών περιπτώσεων προηγμένης χρήσης. Πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη και άλλες ομάδες χρηστών του δρόμου π.χ. ευάλωτοι χρήστες δρόμων (VRU), συμπεριλαμβανομένων ποδηλατών, μοτοσικλετιστών, πεζών, για την ανάπτυξη ενός ολιστικού μοντέλου που παρέχει βελτιωμένη ασφάλεια για όλους τους οδικούς χρήστες. Αυτοί οι χρήστες του δρόμου είναι πολύ συχνά εξοπλισμένοι με smartphones-και πρέπει να αναπτυχθούν λύσεις για την αντιμετώπιση των ειδικών αναγκών τους, καθώς θα οδηγήσει στην ενσωμάτωσή τους σε έναν ενάρετο κύκλο καθώς και επιτάχυνσης στην αγορά των smartphone C-V2X.

Οι προηγούμενες γενεές μετάβασης στις τεχνολογίες συνδεσιμότητας το απέδειξαν μόλις αναπτύχθηκε μια νέα υποδομή σε κλίμακα, το οικοσύστημα ξεκλείδωσε ένα τεράστιο κύμα καινοτομίας σε νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, η πλειοψηφία των οποίων δεν αναμενόταν στην αρχή του κύκλου. Εκτιμάται ότι η ανάπτυξη των δικτύων 5G, μαζί με την ψηφιοποίηση των οχημάτων, των δρόμων και άλλων υποδομών μεταφορών θα επιτρέψουν την εμφάνιση μιας νέας οικονομικής στον τομέα «Συνδεδεμένη και αυτοματοποιημένη κινητικότητα», με πολύ μεγαλύτερο μακροπρόθεσμο αντίκτυπο από αυτό που μπορούμε να προβλέψουμε σήμερα με βάση το αρχικό εύρος των περιπτώσεων χρήσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Μηχανισμοί ανάπτυξης δικτύων από τους MNOs για διασυνδεδεμένα οχήματα

Η ένωση 5GAA συνδύασε μαζί τη βιομηχανία κινητών τηλεπικοινωνιών με τη βιομηχανία αυτοκινήτων με σκοπό την ανάπτυξη και την παράδοση τεχνολογιών που βελτιώνουν την ανάπτυξη συνδεδεμένων οχημάτων. Το όραμα ενός εξαιρετικά ολοκληρωμένου προτύπου οχημάτων-κινητού δικτύου ενσωματώνεται στις τεχνολογίες Cellular Vehicle to-Everything (C-V2X) που υποστηρίζουν τις προηγμένες υπηρεσίες [28].

Ως έννοια, το C-V2X εμφανίστηκε σχετικά πρόσφατα με την παράδοση των προτύπων 3GPP για το C-V2X, που περιλαμβάνει επικοινωνίες μικρής εμβέλειας (PC5) και ευρείας περιοχής (Uu) σχεδιασμένες ειδικά για οχήματα και τη σχετική οδική υποδομή. Έκτοτε, έχει σημειωθεί ταχεία πρόοδος στην παραγωγή κυψελοειδών μόντεμ και εφαρμογών για την υποστήριξη συνδεδεμένων υπηρεσιών οχημάτων από μέλη της 5GAA. Με την υποστήριξη της 5GAA, η 3GPP βρίσκεται επί του παρόντος σε καλή περίοδο για τον καθορισμό των επόμενων εξελικτικών βημάτων για το C-V2X. Αυτό θα υποστηρίξει βελτιωμένες υπηρεσίες συνδεδεμένων οχημάτων που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο πρότυπο, για να υποστηρίξουν υψηλότερο επίπεδο αυτονομίας και να παρέχουν πρόσθετα περιβαλλοντικά οφέλη μέσω της βελτιστοποίησης της κυκλοφορίας. Το όραμα ενός εξαιρετικά ολοκληρωμένου οχήματος με προσέγγιση δικτύου κινητής τηλεφωνίας στο V2X απαιτεί σαφώς ευρεία, συντονισμένη ανάπτυξη υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας που παρέχει ισχυρή ραδιοκάλυψη δρόμων για υποστήριξη της λειτουργίας επικοινωνίας ευρείας περιοχής V2X παράλληλα με την άμεση λειτουργία μικρής εμβέλειας για τις υπηρεσίες κρίσιμης οδικής ασφάλειας μεταξύ οχημάτων και της οδικής υποδομής. Μεταξύ των πολλών λόγων για τους οποίους τέτοιες αναπτύξεις είναι απαραίτητες και επιθυμητές είναι η συνέχεια των τηλεματικών υπηρεσιών για συστήματα υποστήριξης οχημάτων, η δυνατότητα στους οδικούς χειριστές να παρέχουν ασφάλεια στην κυκλοφορία, η οδική παρακολούθηση και ο έλεγχος της κυκλοφορίας, καθώς και η δυνατότητα στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας να παρέχουν αξιόπιστη ποιότητα υπηρεσιών (QoS), και ταιριάζει με τις ειδικές απαιτήσεις των εφαρμογών συνδεδεμένων οχημάτων.

Ωστόσο, υπάρχει ένα οικοσύστημα ενδιαφερόμενων μερών στο C-V2X που πρέπει να συνεργαστεί (όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) για να καταστεί δυνατή η ταχεία, αποτελεσματική και ολοκληρωμένη οδική

κάλυψη από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που να υπηρετούν τους διάφορους κοινωνικούς και επιχειρηματικούς στόχους καθώς και την αντιμετώπιση των λευκών και γκριζών περιοχών όσον αφορά τη συνδεσιμότητα.

6.1 Απαιτήσεις σε δρόμους και υποδομές – προς τους “ψηφιακούς δρόμους”

Οι δημόσιοι προϋπολογισμοί για την κατασκευή και τη συντήρηση δρόμων βρίσκονται υπό πίεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ακατάλληλες συνθήκες δρόμου για συνδεδεμένη και ιδιαίτερα αυτοματοποιημένη κινητικότητα (και μερικές φορές ακόμη και για συμβατική οδική χρήση). Πρέπει να τονιστεί ότι οι δαπάνες του προϋπολογισμού για καθαρή οδική λειτουργία καταναλώνουν ήδη ένα μεγάλο μέρος των διαθέσιμων προϋπολογισμών. Στη Γερμανία, για παράδειγμα, περίπου τα δύο τρίτα του προϋπολογισμού καταναλώνονται για τη διατήρηση δρόμων, γεφυρών, σηράγγων, σημάτων λωρίδων κ.λπ. σε καλή φυσική κατάσταση.

Τα εναπομείναντα χρηματικά κεφάλαια χρειάζονται για πράγματα όπως είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός δρόμων, για την κατασκευή δρόμων που είναι αποδεκτοί τόσο από τους χρήστες και τα μηχανήματα όσο και για τη λειτουργία του δρόμου και για να γίνει βέβαιο οι δρόμοι λειτουργούν αποτελεσματικά π.χ. ταχεία εκκαθάριση των κινδύνων (ζώα, ακινητοποιημένα οχήματα, συντρίμμια κ.λπ.), φροντίζοντας την ορατότητα των πινακίδων κυκλοφορίας κ.λπ. Αυτοί οι προϋπολογισμοί δεν πρέπει να αμφισβητούνται ως να είναι μόνο νούμερο αλλά να αποτελούν ένα προτεραιότητα.

Ωστόσο, αναγνωρίζεται ότι είναι δύσκολο για τους οδικούς φορείς να πραγματοποιήσουν πρόσθετες επενδύσεις στην ψηφιακή τεχνολογία στην οδική υποδομή, συγκρίσιμη με τις επενδύσεις των ΜΝΟs στην επέκταση της κάλυψης και της ικανότητας κατά μήκος των οδικών δικτύων. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, μια τέτοια ψηφιακή οδική υποδομή θα μπορούσε είναι πολύ σημαντική τόσο για την κάλυψη κυβερνητικών αναγκών όσο και για τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις.

Ως εκ τούτου, η 5GAA υποστηρίζει μια προσέγγιση όπου οι μέγιστες πληροφορίες μπορούν να παρέχονται στους χρήστες του δρόμου με εύλογες ανάγκες για δημόσιες επενδύσεις σε κόστη ανάπτυξης και λειτουργίας, χρησιμοποιώντας -όταν είναι δυνατόν- ήδη υπάρχοντα και συνεχώς διαδεδομένα δημόσια δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, και όπου χρειάζεται η επέκτασή τους. Τα δεδομένα που πρέπει να παρέχονται ακολουθούν τεχνολογίες που έχουν ήδη οριστεί από διάφορους φορείς εκμετάλλευσης οδών, και έχουν καθοριστεί σε επίπεδα υποστήριξης οδικής υποδομής για αυτοματοποιημένη οδήγηση (επίπεδα ISA4). Οι πληροφορίες υποδομής δεν είναι σχετικές μόνο για αυτόματες λειτουργίες οδήγησης, αλλά για συνδεδεμένη οδήγηση γενικά, καθώς αυξάνουν την ασφάλεια και την

αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας και πραγματοποιούν τα επόμενα βήματα προς το «Vision Zero» και την κλιματική ουδετερότητα.

Θεωρείται ότι ένας ψηφιακός δρόμος αποτελείται από:

1. Αξιόπιστη ψηφιακή αναπαράσταση (ή ψηφιακή δίδυμη) των στατικών παραμέτρων του δρόμου, όπως η γεωμετρία, τα όρια ταχύτητας, οι κανόνες κυκλοφορίας κ.λπ., και σύμφωνα με το επίπεδο ISA D, να κάνει χρήση συνδεδεμένων οχημάτων για την παρακολούθηση και την αναφορά ζητημάτων σε δρόμους, γέφυρες, σήραγγες κ.λπ
2. Πρόσβαση σε πληροφορίες/δεδομένα από/σε οδική υποδομή (π.χ. φανάρια, προειδοποιήσεις για εργασίες στο δρόμο, πινακίδες μεταβλητού ορίου ταχύτητας κ.λπ.) και δυναμικές οδικές παράμετροι (όπως η κίνηση, οδικοί κίνδυνοι κ.λπ.). Τα τελευταία μπορούν να συλλεχθούν μέσω αισθητήρων στο αυτοκίνητο, παρέχοντας τα απαραίτητα δεδομένα, που έχουν πιστοποιηθεί και ενοποιηθεί από τους παρόχους υπηρεσιών και καταναλώνονται ως υπηρεσίες από την συμμετέχοντες στην κυκλοφορία (επίπεδο ISA C). Αυτές οι πληροφορίες πρέπει να παρέχονται μέσω πολύ διαθέσιμων και "χαμηλής" καθυστέρησης διεπαφών IT.
3. Παροχή επαρκούς κάλυψης δικτύου κινητής τηλεφωνίας παράλληλα με το οδικό δίκτυο, συμπεριλαμβανομένης της επαρκούς χωρητικότητας του δικτύου σύμφωνα με τις ανάγκες QoS που περιγράφονται στις περιπτώσεις χρήσης καθώς και για τη διανομή υπηρεσιών που σχετίζονται με την κυκλοφορία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

6.2 Θεωρήσεις κόστους – οφέλους για την κυψελωτή κάλυψη των δρόμων

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι ο συνδυασμός συνδεσιμότητας 5G, υπηρεσιών Διαδικτύου πραγμάτων (IoT) και λειτουργιών που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη θα διαμορφώσουν εκ νέου τις οικονομίες τα επόμενα χρόνια. Ένα σημαντικό μερίδιο αφορά τα κοινωνικοοικονομικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από περιπτώσεις χρήσης που οδηγούνται ή/και υποστηρίζονται από επικοινωνίες οχήματος σε δίκτυο (V2N) μαζί με τη συνδεσιμότητα οχήματος σε όχημα και σε υποδομή. Εκτός από την ασφάλεια (μείωση τροχαίων ατυχημάτων), θα εξασφαλισθούν πιο αποτελεσματικές μετακινήσεις, ελαχιστοποιώντας τους χρόνους ταξιδιών, το μπουτιλιάρισμα και τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Στη 5GAA θεωρούν ότι κάθε φορά που πρόκειται μια χρήση να έχει αντίκτυπο στην ασφάλεια, έχει επίσης θετικό αντίκτυπο και στη συμφόρηση, τις εκπομπές ρύπων και, κατά συνέπεια, τις δημόσιες δαπάνες,

αλλά και ικανοποίηση και αποδοχή του κοινού, καθώς υπάρχουν λιγότερα ατυχήματα ενώ και η ροή της κυκλοφορίας γίνεται πιο ρευστή [20].

6.2.1 Βασικές κατηγορίες περιπτώσεων χρήσης

Η παγκόσμια αγορά συνδεδεμένων αυτοκινήτων αυξάνεται με έναν σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 14,8% από 2018 έως 2025. Προβλέπεται ότι περισσότερα από 125 εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα που πωλούνται μεταξύ 2018-2022 θα είναι εξοπλισμένα με ενσωματωμένη συνδεσιμότητα. Αυτές οι συνδέσεις χρησιμοποιούνται για μεγάλη ποικιλία πολύτιμων υπηρεσιών που περιλαμβάνουν τηλεματική, συνδεδεμένη ψυχαγωγία, πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο και βελτιστοποίηση κίνησης, όπως καθώς και για υπηρεσίες ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένης της αυτόματης ειδοποίησης σφαλμάτων, όπως το eCall.

Επιπλέον, τα λεγόμενα περιστατικά χρήσης ασφάλειας για «Ημέρα 1» και «Ημέρα 1.5» δοκιμάζονται ολοένα και περισσότερο αξιοποιώντας υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η πλειοψηφία των τροχαίων ατυχημάτων οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος, το οποίο κάνει χρήση περιπτώσεων που αποσκοπούν στην ενημέρωση, ειδοποίηση ή γενικότερα στη βοήθεια προς τους οδηγούς.

Διάφορες ομαδοποιήσεις χρήσης συνδεδεμένων οχημάτων έχουν οριστεί στο πλαίσιο της 5GAA. Αυτές με το υψηλότερο βαθμό σε κοινωνικοοικονομική συνάφεια περιλαμβάνουν [28]:

- ο Σχετικά με την οδική ασφάλεια

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις χρήσης που παρέχουν αυξημένη ασφάλεια για το όχημα και τον οδηγό. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων χρήσης αποτελούν το φρενάρισμα έκτακτης ανάγκης, η βοήθεια διαχείρισης διασταυρώσεων, η προειδοποίηση σύγκρουσης ή η αλλαγή λωρίδας.

- ο Απόδοση κυκλοφορίας και φιλικότητα προς το περιβάλλον

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις χρήσης που παρέχουν αυξημένη αξία σε υποδομές, δρόμους ή αστικούς παρόχους, όπου θα λειτουργούν τα οχήματα. Ως παραδείγματα αναφέρονται η συμβουλευτική για τη βέλτιστη ταχύτητα του πράσινου φωτός (GLOSA), πληροφορίες κυκλοφοριακής συμφόρησης, συμβουλές μέγιστης ταχύτητας, προειδοποίηση ταχύτητας καμπύλης και προσωρινές πληροφορίες περιορισμένης περιοχής (γνωστές και ως γεωφράξεις).

- ο Κοινωνία και κοινότητα

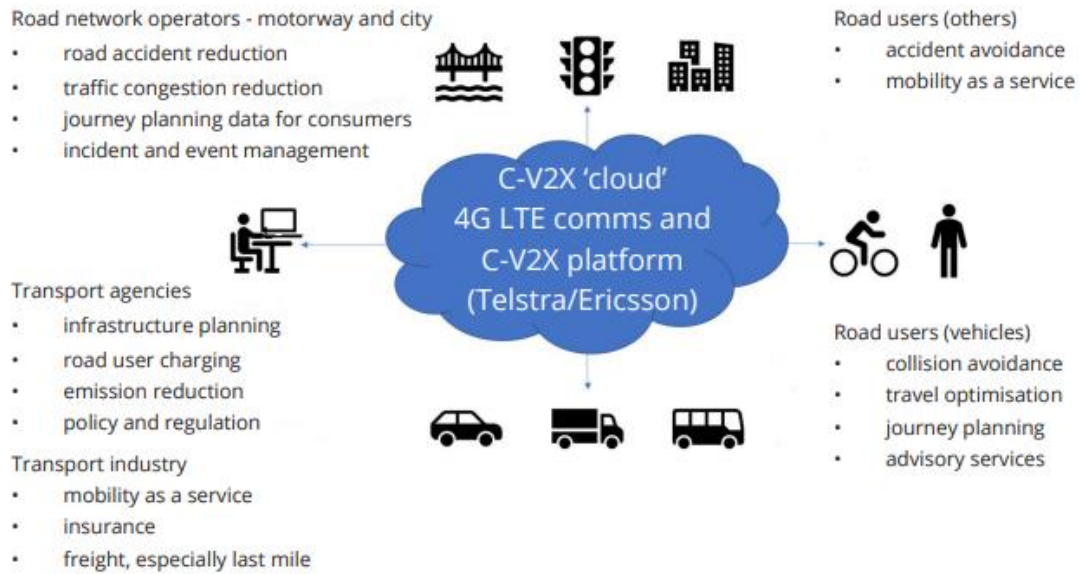
Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις χρήσης που έχουν αξία και ενδιαφέρον για την κοινωνία και το κοινό, π.χ. προστασία ευάλωτου χρήστη

του δρόμου (VRU), όταν πλησιάζει έκτακτο όχημα, προτεραιότητα στο φανάρι, παρακολούθηση ασθενούς, αναφορά σύγκρουσης.

6.2.2 Αξία περιπτώσεων χρήσης V2N

Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας παρέχει μοναδικά πλεονεκτήματα για περιπτώσεις χρήσης συνδεδεμένων οχημάτων:

- Βελτιωμένη αναμονή κυκλοφορίας: Η οδήγηση είναι ασφαλέστερη και πιο αποτελεσματική όταν προβλέπονται επερχόμενες εκδηλώσεις και αποφεύγεται η ανάγκη για επείγουσες ενέργειες. Επομένως, το V2N είναι μια εξαιρετική προσθήκη στα V2V και V2I για τις περισσότερες περιπτώσεις χρήσης οδικής ασφάλειας.
- Βελτιωμένη αξιοπιστία/επίπεδο παροχής πληροφοριών: Εδώ, το V2N συμπληρώνει το V2V με δυνατότητες ανίχνευσης εκτός γραμμής (καμπύλες, πέρα της διασταύρωσης, see-through κλπ.).
- Βελτιωμένη (διεθνής) συμβατότητα οικοσυστημάτων: Σε αυτή την περίπτωση, το V2N προσφέρει υψηλή συμβατότητα με διασυνοριακές οδικές αρχές και κατασκευαστές αυτοκινήτων.
- Μείωση της ανάγκης για εκτεταμένες μονάδες παράπλευρων δρόμων: Πολλές περιπτώσεις χρήσης V2I μπορούν να υποστηριχθούν από Vehicle to Network to Infrastructure (V2N2I) π.χ. χρησιμοποιώντας εικονικό RSU όπως αποδεικνύεται από το VicRoads στην Αυστραλία ή με συνδυασμό συνδεδεμένων ευφυών φαναριών και υπηρεσιών cloud σε μεγάλη κλίμακα από την Talking Traffic όπως συμβαίνει στην Ολλανδία. Επιπλέον, η 5GAA κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι αναποτελεσματική η ευρεία ανάπτυξη της RSU. Το V2N2I μπορεί να μειώσει την ανάγκη για αισθητήρες και ενεργοποιητές στην άκρη του δρόμου και, συνεπώς, κυβερνητικές (δημόσιες) δαπάνες. Τέλος, τα περιφερειακά περιουσιακά στοιχεία μπορούν να λειτουργούν/να συντηρούνται πιο αποτελεσματικά με (κυψελοειδή) απομακρυσμένη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων.



Σχήμα 6.1 Πλατφόρμα C-V2X της εταιρίας Ericsson [28]

6.3 Απαιτήσεις συνδεδεμένων οχημάτων

Η διαστασιολόγηση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας διενεργείται και δημοπρατείται παραδοσιακά και σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας περισσότερο δημογραφικά στοιχεία πληθυσμού παρά δεδομένα οδικής κυκλοφορίας. Επομένως, η κάλυψη κατά μήκος αγροτικών/δευτερογενών δρόμων μπορεί να μειωθεί σημαντικά σε μεγαλύτερες χώρες λόγω κακών επιχειρηματικών περιπτώσεων για φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Είναι σημαντικό να συσχετιστεί σωστά η κάλυψη κυψελοειδούς δικτύου με τις δυνατότητες της τεχνολογίας επικοινωνίας. Από τη σκοπιά του φορέα εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τα συνδεδεμένα οχήματα κάνουν χρήση του Διαδικτύου of Things (IoT) που παρέχεται μέσω μερικών διακριτών τεχνολογιών πρόσβασης στο δίκτυο (βλ. Πίνακα 6.1).

Τα συνδεδεμένα οχήματα σε δημόσιους δρόμους είναι συνήθως εξοπλισμένα με ευρυζωνική σύνδεση IoT.

Πίνακας 6.1 Κατηγορίες IoT και δυνατότητες δικτυακής κάλυψης

	TYPICAL COVERAGE	CAPABILITIES	ACCESS TECHNOLOGY
MASSIVE IOT	Extreme coverage (incl. deep-indoor & rural)	Low-cost devices Small data volumes	NB-IoT CAT-M1
BROADBAND IOT	High coverage (typically population oriented)	High data rates Low latency (best effort) Large data volumes	LTE NR
CRITICAL IOT	Coverage initially in confined areas, but also expanding to public roads	Bounded latencies High reliability Ultra-low latency	NR

- **Αστικές Περιοχές**

Οι αστικές περιοχές αναμένεται να έχουν καλή κάλυψη λόγω της υψηλότερης πυκνότητας πληθυσμού. Αυτό ήδη επιτρέπει τη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων χρήσης που υπάρχουν ήδη στα τρέχοντα δίκτυα 4G. Η πυκνότητα και η χωρητικότητα θα χρειαστούν επεκτάσεις στις αστικές περιοχές όταν αυξηθεί η διείσδυση και η χρήση, κάτι που απαιτεί συνεχιζόμενες επενδύσεις από τους MNOs. Τα μοντέλα συνεργασίας και συνεργασίας, εάν υποστηρίζονται από ένα θετικά κανονιστικό πλαίσιο, βοηθάνε στην επιτάχυνση της πυκνότητας του δικτύου μειώνοντας παράλληλα το κόστος.

- **Περιφερειακές Περιοχές**

Οι δρόμοι εκτός αστικών περιοχών απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή για να αποκτήσουν επαρκή κάλυψη και ποιότητα, ιδιαίτερα για μεγάλες χώρες. Τα στατιστικά στοιχεία της έντασης της κυκλοφορίας και των ατυχημάτων μπορούν να υποδείξουν ποιες περιοχές είναι οι κρίσιμης σημασίας για τη συμπλήρωση της κάλυψης, δηλαδή το έτος 2018, το 9% των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων στην ΕΕ συνέβη στους αυτοκινητοδρόμους έναντι 38% σε αστικές περιοχές και 53% σε αγροτικούς δρόμους. Επιπλέον, ακόμη και δρόμοι με χαμηλή ένταση κυκλοφορίας απαιτούν κάλυψη για τη λήψη και την ανταλλαγή πληροφοριών, αλλά όχι με απαραίτητα υψηλή χωρητικότητα.

Οι αυτοκινητόδρομοι και οι κύριοι δρόμοι μεταφοράς είναι οι δρόμοι στους οποίους πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στη χωρητικότητα ενώ η κάλυψη είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για τους αγροτικούς δρόμους.

Σαφείς συνέργειες με τους οδικούς χρήστες εντοπίζονται για πτυχές του ζητήματος της ανάπτυξης όπως είναι η πρόσβαση στους αγωγούς και την τροφοδοσία, οι απλοποιημένες άδειες τοποθεσίας και η κοινή χρήση της οδικής υποδομής (πόλοι λαμπτήρων, πινακίδες κυκλοφορίας κλπ.):

- Παροχή πρόσβασης σε παθητική υποδομή

Οι οδικοί φορείς μπορούν να παρέχουν εύκολη και προβλέψιμη πρόσβαση σε παθητική υποδομή, όπως είναι π.χ. οι αγωγοί, οι οπτικές ίνες και η ηλεκτρική ισχύ για να επιτρέπουν την οικονομικά αποδοτική κατασκευή δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

- Απλοποιημένες άδειες τοποθεσίας

Οι αρχές σχεδιασμού μπορούν να διασφαλίσουν ότι οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας λαμβάνουν γρήγορες και εύκολες εγκρίσεις για άδεια σχεδιασμού και οικοδομικές άδειες καθώς και εύκολη πρόσβαση σε ταρατσες και κτίρια για καλωδίωση.

- Κοινή χρήση της υποδομής του δρόμου

Οι φορείς εκμετάλλευσης οδών μπορούν να παρέχουν εύκολη και προβλέψιμη πρόσβαση σε δημόσια περιουσιακά στοιχεία, όπως λαμπτήρες πινακίδων κυκλοφορίας κλπ. ώστε να επιτρέπεται η αποδοτική κατασκευή δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Πίνακας 6.2 Υποδομές, πρόσβαση και κόστη

Passive infrastructure	Active infrastructure	Access & permissions	Spectrum licences	Build costs	Operating costs
Fixed ducts & poles	Commercial wholesale access	Planning/ construction permits	Mobile spectrum supply	Mobile roll out obligations	Site rental
Utility ducts & poles	Regulated nNGN access	Rooftop access	Upfront fees	Cost sharing	Local authority rates
Dark fibre	NGN sharing agreements	Access to in-building cabling	Ease of renewal	State subsidies	Power
Publicly funded infrastructure	<i>Use of existing fibre/ducts</i>			Tower height limits	Annual spectrum fees
Power		<i>Simplify permissions</i>	<i>Shared use of infrastructure: lamp poles, traffic lights, noise barriers, advertising screens, public transport information screens</i>	EMF limits	Government taxes
<i>Use of existing power</i>				Labour costs	Import tariffs

6.4 Επαναχρησιμοποίηση της υφιστάμενης δημόσιας υποδομής

Η εισαγωγή νέου εξοπλισμού Radio 5G στο RAN αναμένεται να απαιτήσει πιο πυκνές τοποθεσίες Radio όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν οι ζώνες συχνοτήτων 3,5 GHz και 26 GHz. Για την ανάπτυξη στο δρόμο αυτό, η πυκνότητα θα απαιτήσει σημαντικές επενδύσεις CAPEX.

Η παροχή συνδεσιμότητας οπτικών ινών σε νέες τοποθεσίες αναμένεται να είναι ένας από τους βασικούς συντελεστές κόστους. Ως εκ τούτου, προκρίνεται η ιδέα να επιτρέπεται στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας να κάνουν χρήση των οπτικών ινών δικών που δεν χρησιμοποιούνται από τους οδικούς χρήστες με στόχο τη μείωση του κόστους CAPEX για κάλυψη 5G στο δρόμο.

Ωστόσο, αν και απλό στην ιδέα του, είναι άγνωστο σήμερα ποιες είναι οι πολυπλοκότητες που θα ξεπεραστούν κατά την ανάπτυξη νέου εξοπλισμού Radio 5G χρησιμοποιώντας αυτό το υπόδειγμα. Απαιτείται περισσότερη έρευνα για να καθορισθεί εάν πρόκειται για εφικτή προσέγγιση, πώς πρέπει να οργανωθεί και ποιες είναι οι κύριες προκλήσεις όταν γίνεται αυτό στην πράξη. Για παράδειγμα, η ίνα μπορεί να μην ανήκει στους οδικούς χειριστές αλλά στο κράτος και μερικές φορές προορίζεται για κρατικές υπηρεσίες όπως είναι η άμυνα, οι εθνικές πληροφορίες ή η αστυνομία.

Μια προσέγγιση που βρίσκεται υπό έρευνα αυτή τη στιγμή από την ολλανδική κυβέρνηση είναι να αναλάβει έναν ρόλο μεσίτη μεταξύ των οδικών αρχών και των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Με αυτόν τον τρόπο, η πρόσβαση στην υποδομή του οδικού φορέα μπορεί να δοθεί υπό τους ίδιους όρους σε όλους τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την επιβάρυνση στον οδικό χειριστή. Αυτό διευκολύνει επίσης την εξερεύνηση της αντίστροφης προσέγγισης: μπορεί ο χειριστής του δρόμου να χρησιμοποιήσει την υποδομή οπτικών ινών του MNO σε τοποθεσίες όπου ο οδικός φορέας δεν έχει επαρκή χωρητικότητα σήμερα?

Αυτή η έρευνα οργανώνεται σε μια σταδιακή προσέγγιση: πρώτα, προσδιορίζεται εάν υπάρχει πλεονάζουσα χωρητικότητα που θα μπορούσε να μοιραστεί με τον οδικό φορέα και εξερευνάται εάν είναι πραγματικά κατάλληλη για χρήση από το χειριστή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, στη συνέχεια διερευνάται πώς θα μπορούσε να οργανωθεί αυτό τεχνικά και καθορίζεται, τέλος, πώς ο ρόλος του μεσίτη θα μπορούσε να διευκολύνει την εκτέλεση αυτής της τεχνικής διαδικασίας ολοκλήρωσης και μόνο τότε μπορεί να την εκτελέσει στην πραγματική ζωή σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία δοκιμής.

Κατά τη διάρκεια αυτών των βημάτων, οι απαιτήσεις ανάπτυξης όλων των εμπλεκόμενων μερών (οδικός φορέας, μεσίτης, MNO) θα ληφθούν υπόψη και το αντίστοιχο σύνολο συμφωνημένων διαδικασιών και μεθοδολογίας παρακολούθησης πρέπει να περιγραφεί.

Παράλληλα, άλλα στοιχεία όπως οι νομικές επιπτώσεις, τα οικονομικά μοντέλα, η μελλοντική επεκτασιμότητα του μοντέλου κ.λπ. πρέπει να διερευνηθούν και να δοθούν οι αντίστοιχες συστάσεις. Είναι σωστό να σημειωθεί ότι οι πληροφορίες θα συγκεντρωθούν και θα παραδοθούν σε αυτές τις δραστηριότητες, αλλά καμία απόφαση σχετικά με το «μοντέλο υιοθεσίας» δεν αναμένεται κατά τη διάρκεια αυτής της έρευνας. Αυτή η ενέργεια καθορίζει επομένως πώς η υιοθέτηση αυτού του παραδείγματος θα μπορούσε να οργανωθεί (εάν είναι πολύτιμο και εφικτό), αλλά όχι εάν και πότε θα υιοθετηθεί.

6.5 Επιχειρηματικά μοντέλα για τους MNOs

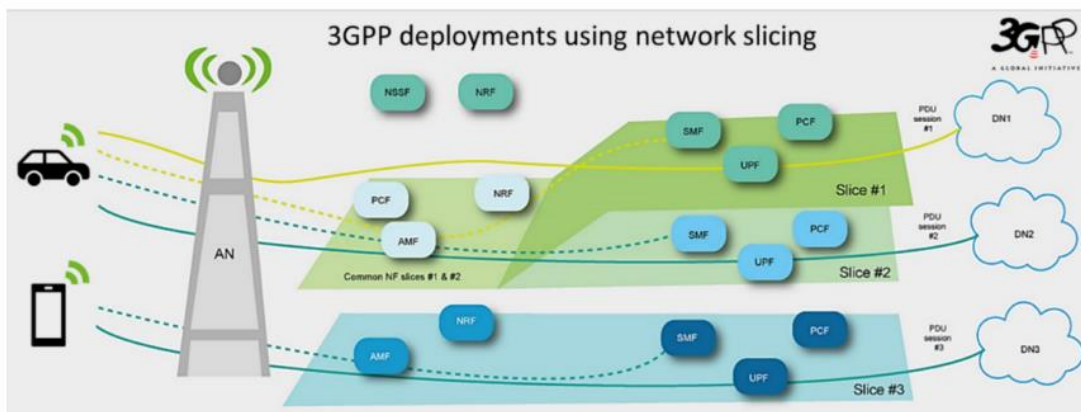
Οι MNOs μπορούν να χρησιμοποιήσουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα για την αλληλεπίδραση με την αυτοκινητοβιομηχανία ώστε να διασφαλιστεί ότι οι υπηρεσίες C-V2X θα αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους. Ο τεμαχισμός δικτύου θα είναι πιθανώς βασικό συστατικό, επιτρέποντας στους MNOs με συνέπεια να πληρούν τις ποικίλες απαιτήσεις των κατασκευαστών αυτοκινήτων που καλύπτουν την ασφάλεια, ευκολία και αποτελεσματική χρήση. Ο στόχος του τεμαχισμού δικτύου είναι για να επιτρέψει στους MNOs να λειτουργούν πολλαπλά χρησιμοποιώντας λογικά δίκτυα ή “φέτες” στην κοινή τους υποδομή για να εξυπηρετούν πολλούς πελάτες ενώ η ταυτόχρονη απομόνωση του δικτύου απαιτείται για τη διασφάλιση συγκεκριμένων SLA.

Το Σχήμα 6.2 (από το 3GPP) εμφανίζει προβολή υψηλού επιπέδου του τεμαχισμού δικτύου [10]: δύο φέτες δικτύου αυτοκινήτων και ένα κομμάτι δικτύου για κινητά τηλέφωνα. Ο τεμαχισμός δικτύου παρέχει ξεχωριστά πλεονεκτήματα πάνω από αποκλειστικές λύσεις του δικτύου σχετικά με αυξημένη ευελιξία και χαμηλότερο κόστος. Προσφέροντας διαφορετικές “φέτες” του δικτύου κινητής τηλεφωνίας με βάση ειδικές απαιτήσεις υπηρεσιών του τελικού πελάτη δίνει επίσης στους MNOs τη δυναμική διαφοροποίησης των τιμών και να δημιουργήσουν πιο αποτελεσματικά έσοδα από την πλήρη έκτασή των δυνατοτήτων του δικτύου. Για παράδειγμα, η στόχευση δικτύου που σχετίζεται με την ασφάλεια σε περιπτώσεις χρήσης με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία θα μπορούσε να προσφέρει μεγαλύτερη αξία για τον τελικό χρήστη από μια μεγάλη καθυστέρηση και χαμηλότερη αξιοπιστία για ευκολία χρήσης.

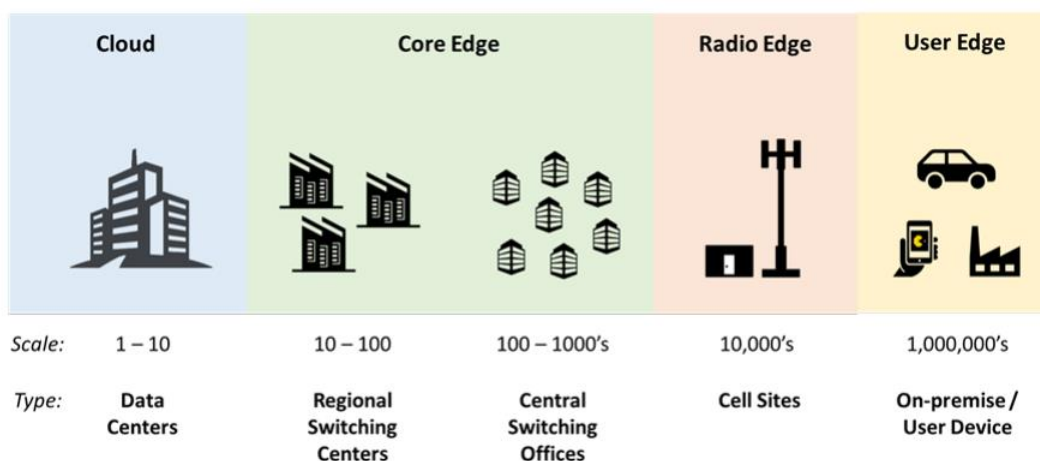
Εκτός από τον τεμαχισμό δικτύου, οι MNOs μπορούν να προσφέρουν ένα μοναδικό σύνολο εργαλείων προς ενίσχυση της αυτοκινητοβιομηχανίας ως βοηθητικό πρόγραμμα εξυπηρέτησης των C-V2X. Προκειμένου να παρέχονται ολοκληρωμένες υπηρεσίες ή προϊόντα, αυτά τα εργαλεία πιθανότατα θα αποδειχθούν ως θεμέλια των προηγμένων υπηρεσιών V2X που απαιτούνται από την αυτοκινητοβιομηχανία και προσφέρουν επιπλέον διαδρομές δημιουργίας εσόδων για τους MNOs.

Ο υπολογισμός στα άκρα (edge computing) είναι ένα σημαντικό εργαλείο που μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση για τις C-V2X περιπτώσεις χρήσης που απαιτούν υπολογισμό από μετεγκατάσταση αυτών των υπολογισμών πιο κοντά στον τελικό χρήστη παρά στο υπάρχον (μακρινό συνήθως) δημόσιο κέντρο δεδομένων cloud. Επιπλέον, ο υπολογισμός άκρων επιτρέπει τη συγκέντρωση και το συντονισμό των δεδομένων σε τοπικό ή ακόμη και περιφερειακό επίπεδο για ανάλυση και λειτουργική νοημοσύνη για υπηρεσίες C-V2X. Διατηρώντας τους υπολογιστικούς πόρους εντός των ορίων των δικών τους δικτύων, οι MNOs είναι επίσης σε θέση να επιτύχουν μεγαλύτερο έλεγχο και να βελτιώσουν την αξιοπιστία του επιπέδου υπηρεσιών.

Η υφιστάμενη υποδομή των ΜΝΟs σε εθνικό επίπεδο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμό στα άκρα (edge computing), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3 [10]. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να προσφέρει άριστο υπολογισμό για υπηρεσίες στην αυτοκινητοβιομηχανία. Υποδομές σε επίπεδο «Core Edge» προσφέρουν μια ευεργετική ανταλλαγή και επαρκή διανομή των διαθέσιμων τοποθεσιών για να διασφαλιστεί ότι υπάρχουν υπολογιστικοί πόροι οι οποίοι βρίσκονται κοντά στους τελικούς χρήστες ενώ διατηρώντας επίσης μια κλίμακα θα ισορροπεί το οικονομικό κόστος με τα προβλεπόμενα οφέλη. Αντίθετα, το οικονομικό κόστος παροχής υπολογιστικών μηχανών για υπηρεσίες σε δεκάδες χιλιάδες τοποθεσίες δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN), ή το "Radio Edge", πιθανότατα θα ήταν απαγορευτικό για τις σημερινές C-V2X χρήσεις. Για αυστηρά καθυστερημένες υπηρεσίες -όπου κάθε χιλιοστό του δευτερολέπτου είναι σημαντικό-, ο υπολογισμός θα γίνεται στο User Edge, εντός των υποσυστημάτων των οχημάτων και των chipsets.



Σχήμα 6.2 Ανάπτυξη δικτύου με χρήση του τεμαχισμού δικτύου



Σχήμα 6.3 Διαφορετικά επίπεδα του υπολογισμού στο άκρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ανάπτυξη δικτύου 5G για C-V2X εφαρμογές με χρήση συσταδών MEC – Πλήρης τεχνοικονομική ανάλυση

Επί του παρόντος – Οκτώβριος 2021 – στοιχεία από μια σειρά εργαστηρίων και συνεδρίων έχουν δείξει ότι κανένας φορέας σε διαθέτει ένα έγκυρο επιχειρηματικό μοντέλο για την ταχεία ανάπτυξη υπηρεσιών 5G CCAM σε ευρωπαϊκά διασυνοριακά πλαίσια. Αυτή η αποτυχία της αγοράς παρέχει χώρο για επείγουσες συνοδευτικές δραστηριότητες από την ΕΚ. Οι προκλήσεις βρίσκονται σε πολλά επίπεδα και απαιτούν καινοτόμο συνεργασία – μορφές συνεργασίας που υπερβαίνουν κατά πολύ τις υπάρχουσες πρακτικές στην Ευρώπη. Οι μηχανισμοί συνεργασίας και τα μάλλον περίπλοκα επιχειρηματικά μοντέλα (όπως παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 5 και 6) δεν έχουν καταφέρει να προτείνουν αξιόπιστες λύσεις. Ωστόσο, από διευθυντική σκοπιά και από τη σκοπιά της Ανώτατης Διοίκησης η πολυπλοκότητα και η ποικιλία των μοντέλων συνεργασίας χρειάζονται σημαντική συμπύεση σε μερικές επιλογές. Η μελέτη σε αυτό το κεφάλαιο συμβάλει προς αυτή την κατεύθυνση και αναπτύσσει τις πολλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βασικών ενδιαφερόμενων φορέων.

Για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των προτεινόμενων υπηρεσιών CCAM στο διασυνοριακό περιβάλλον, πρέπει να γίνουν υποθέσεις για τα μοντέλα εσόδων και κόστους. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τέσσερα μοντέλα εσόδων που αντικατοπτρίζουν τέσσερις διαφορετικές υποθέσεις, δίνοντας χρήσιμες πληροφορίες για τη βιωσιμότητα των περιπτώσεων χρήσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα εσόδων για CCAM παρόχους συνδεσιμότητας στη διασυνοριακή περιοχή. Έχουν χρησιμοποιηθεί μάλλον καινοτόμες προσεγγίσεις για την περιγραφή των επιπτώσεων της τοποθέτησης MEC στο κόστος και τα αποτελέσματα των μοντέλων ομαδοποίησης MEC. Η χρήση διαφορετικών υποθέσεων (σεναρίων) για τη διεύθυνση της αυτόνομης οδήγησης δίδει σημαντικά αποτελέσματα και κατευθύνσεις για την ανάπτυξη (deployment) ή όχι 5G δικτύων σε αυτοκινητοδρόμους για επικοινωνίες C-V2X.

7.1 Τεχνοοικονομική μεθοδολογία – μαθηματικό πλαίσιο

Το πρόβλημα για το οποίο αναζητείται λύση διατυπώνεται ως εξής: Για έναν (διασυνοριακό) αυτοκινητόδρομο με υπάρχουσα τεχνολογία 4G, να γίνει η σχετική ανάλυση για την ανάπτυξη δικτύου 5G υποβοηθούμενο από συστήματα MEC. Εν προκειμένω επιλέχθηκε ο αυτοκινητόδρομος Μπολώνια – Μόναχο (600 km). Η ανάλυση και μελέτη βασίζεται στα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια όσον αφορά τις τεχνολογίες καθώς και τα μοντέλα συνεργασίας και τους μηχανισμούς ανάπτυξης.

Η προσέγγιση (βήματα) η οποία ακολουθήθηκε είναι η εξής:

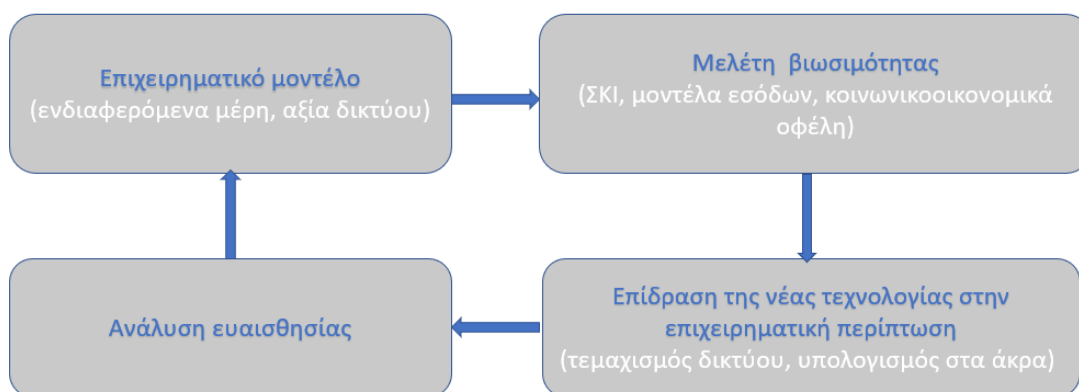
1. Με βάση τις τεχνικές απαιτήσεις (KPIs) επιλέγονται **ποιες υπηρεσίες/τεχνολογίες C-V2X** ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου
2. Με βάση το τεχνολογικό επίπεδο που προσφέρεται (C-V2X, 5G και MEC) επιλέγεται **ποια δικτυακή τεχνολογία** συνδυάζεται καλύτερα με τις V2X
3. Εντοπίζεται **ο ρόλος των MEC** και σε σχέση με τις υπηρεσίες που μπορεί να καλύψει σε δίκτυο 5G
4. Καθορίζονται τα **προτεινόμενα μοντέλα συνεργασίας και οι μηχανισμοί ανάπτυξης** κινητών δικτύων (από τους MNOs)
5. Υπολογίζονται τα **Συνολικά Κόστη Ιδιοκτησίας** για τις συνδέσεις με RSU (**V2I**) και τρία διαφορετικά σενάρια (# RSU/km) ← είσοδος στοιχείων από δεδομένα στη βιβλιογραφία
6. Υπολογίζονται τα **Συνολικά Κόστη Ιδιοκτησίας** για τις συνδέσεις με το δίκτυο (**V2N**) και δύο διαφορετικά σενάρια (# eNB/km) ← είσοδος στοιχείων από δεδομένα μετρήσεων (cell size)
7. **Τοποθέτηση των MEC** κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου και για διαφορετικές τοπολογίες → επίδραση στο κόστος (CAPEX, OPEX) (σύνδεση με βήμα 3 / βελτιστοποίηση)
8. **Κοινά σενάρια ανάπτυξης V2I και V2N** για την εύρεση του μοντέλου συνεργασίας (σύνδεση με βήμα 4 / βελτιστοποίηση)
9. Συνολική αποτίμηση υποθέτοντας και τέσσερα μοντέλα εσόδων → εύρεση **νεκρού σημείου** (έτος)
10. **Ανάλυση ευαισθησίας** λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό πληθωρισμού

Με σαφή εστίαση στα επιχειρηματικά μοντέλα και τη βιωσιμότητά τους για παροχή CCAM σε διασυνοριακό περιβάλλον, αναπτύχθηκε μια γενική μεθοδολογία που αποτελείται από τέσσερα κύρια διαδοχικά και επαναληπτικά βήματα (απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1):

1. Προσδιορισμός αξίας δικτύου και επιχειρηματικών μοντέλων: αυτό μπορεί να επιτευχθεί καθορίζοντας πρώτα τους διαφορετικούς επιχειρηματικούς ρόλους και τους εμπλεκόμενους φορείς, και δεύτερον

τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Διαφορετικοί τρόποι αλληλεπιδράσεων έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές διαμορφώσεις δικτύου αξίας, και κατά συνέπεια διαφορετικά επιχειρηματικά μοντέλα για τα ενδιαφερόμενα μέρη.

2. Μελέτη βιωσιμότητας επιχειρησιακής περίπτωσης: Αποτελεί ένα μοντέλο **συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (ΣΚΙ)** ενώ γίνονται υποθέσεις εσόδων ώστε να κριθεί η βιωσιμότητα των επιχειρηματικών υποθέσεων. Επιπλέον, δεδομένου του διαφορετικού κόστους, μπορούν να προσδιοριστούν επιχειρηματικά μοντέλα, αντισταθμίσεις κόστους απόδοσης και κόστους και να υπολογιστεί ο αντίκτυπος αυτών. Τέλος, έμμεσα οφέλη (δηλαδή μη χρηματικά οφέλη για άμεσους χρήστες ή θετικές επιπτώσεις στην οικονομία ή την κοινωνία) πρέπει να συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση επιχειρηματικών περιπτώσεων, ειδικά για τους δημόσιους φορείς (ενδιαφερόμενους).
3. Επιπτώσεις των νέων τεχνολογιών στην επιχειρηματική περίπτωση: αυτό το βήμα συνίσταται στη διερεύνηση του αντίκτυπου της καινοτόμου τεχνολογίας στην επιχειρηματική περίπτωση. Εδώ, συγκεκριμένα ο αντίκτυπος του τεμαχισμού δικτύου καθώς και η τοποθέτηση των MEC θα μελετηθεί.
4. Η ανάλυση ευαισθησίας αναπτύσσεται για να εκτιμηθεί ο βαθμός αβεβαιότητας που συνδέει τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις εισόδους δηλαδή το δίκτυο αξίας και το επιχειρηματικό μοντέλο, καθώς και για την ανάπτυξη ενός γενικού μοντέλου ΣΚΙ στο οποίο εφαρμόζονται τρία διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης V2I (μέρος του βήματος μελέτης βιωσιμότητας 2). Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση αυτών των δύο τα βήματα αναφέρονται λεπτομερώς ακολούθως.



Σχήμα 7.1 Μοντέλο τεχνοοικονομικής ανάλυσης

Σε αυτό το κεφάλαιο, αξιολογούνται τα διαφορετικά βασικά σενάρια ανάπτυξης V2I και V2N. Ωστόσο, έχουν επίσης αναπτυχθεί και επιπρόσθετα μοντέλα για να ολοκληρωθούν και τα υπόλοιπα βήματα της τεχνοοικονομικής μεθοδολογίας και τα οποία είναι 1) ένα μοντέλο κατανομής κόστους για να μπορέσει να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση της επιχειρηματικής περίπτωσης των βασικών ενδιαφερομένων · 2) μελέτη της επίδρασης της τοποθέτησης MEC στο κόστος για διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης και 3) μοντέλο ανάλυσης ευαισθησίας. Επομένως, τα κατωτέρω περιγράφουν τα διαφορετικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν [18].

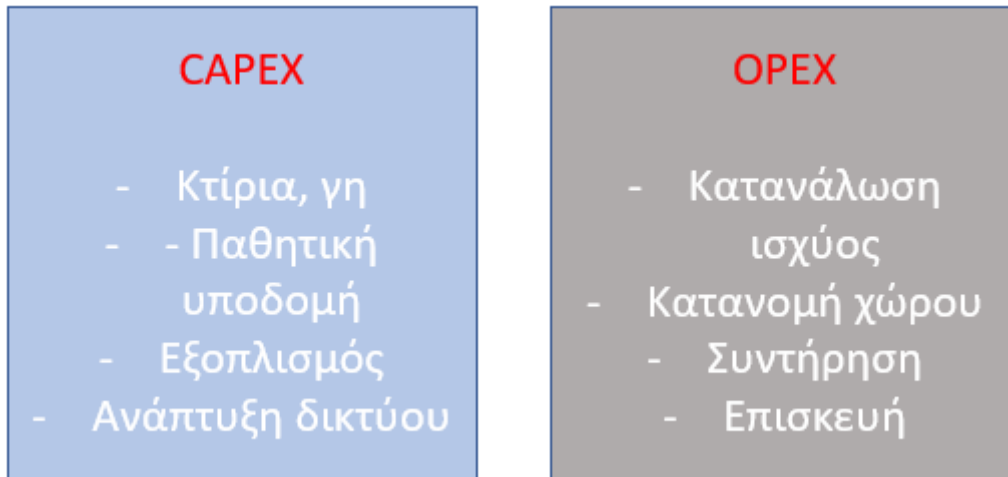
7.1.1 Ταξινόμηση του κόστους

Οι συνολικές δαπάνες μπορούν συνήθως να χωριστούν σε δύο μέρη: τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και τις λειτουργικές δαπάνες.

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) συμβάλλουν στην πάγια υποδομή της εταιρείας και αποσβένονται με την πάροδο του χρόνου. Για έναν φορέα εκμετάλλευσης δικτύου, αυτές περιλαμβάνουν την αγορά γης και κτιρίων (π.χ. στεγάσει το προσωπικό), την υποδομή δικτύου (π.χ. οπτικές ίνες, δρομολογητές IP) και το λογισμικό (π.χ. σύστημα διαχείρισης δικτύου). Αξίζει να σημειωθεί ότι η αγορά εξοπλισμού συμβάλλει πάντα στο CAPEX, ανεξάρτητα από το γεγονός εάν η πληρωμή πραγματοποιείται μία φορά ή κατανέμεται με την πάροδο του χρόνου

Οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) δεν συνεισφέρουν στην ίδια την υποδομή, αντιπροσωπεύουν το κόστος να παραμείνει η εταιρεία λειτουργική και συμπεριλαμβάνει δαπάνες για τεχνικές και εμπορικές λειτουργίες, διαχείριση κ.λπ. Για ένα διαχειριστή δικτύου, το OPEX αποτελείται κυρίως από μισθωμένες υποδομές (γη, κτίρια, εξοπλισμός δικτύου, οπτικές ίνες) καθώς και μισθοί προσωπικού.

Αυτή η ταξινόμηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2 Ταξινόμηση συνιστωσών κόστους (CAPEX, OPEX)

Μοντέλο κόστους της υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας:

Το CAPEX της υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας υπολογίζεται ως το άθροισμα όλων των κεφαλαιουχικών δαπανών, οι νέοι τοποθεσίες ή τοποθεσίες μακροεντολών RAN (Δίκτυο πρόσβασης Radio) καθώς και οι τοποθεσίες RAN που χρειάζονται αναβαθμίσεις και οι χώροι MEC. Ο ακόλουθος τύπος απεικονίζει το CAPEX της υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας:

$$CAPEX_{MN_inf} = N_{RAN_sites} \times CAPEX_{RAN} + N_{MEC_sites} \times CAPEX_{MEC} + N_{RAN_sites_upgrade} \times CAPEX_{RANupgrade} \quad (7.1)$$

Από την άλλη πλευρά, η λειτουργική δαπάνη (OPEX) της υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας που αναπτύσσεται στο διασυννοριακό τμήμα του αυτοκινητοδρόμου απεικονίζεται στην εξίσωση 7.2. Κάθε στοιχείο OPEX περιλαμβάνει την ισχύ κατανάλωσης του υλικού και τη συντήρησή του.

$$OPEX_{MN_inf} = N_{RAN_sites} \times OPEX_{RAN} + N_{MEC_sites} \times OPEX_{MEC} + N_{RAN_sites_upgrade} \times OPEX_{RANupgrade} \quad (7.2)$$

Μοντέλο κόστους της υποδομής επικοινωνίας V2I:

Το CAPEX της υποδομής V2I περιλαμβάνει το CAPEX των RSU, των καλωδίων οπτικών ινών και της ηλεκτροκίνησης και την καλωδίωση (εξίσωση 7.3)

$$CAPEX_{V2I_inf} = N_{RSU} \times CAPEX_{RSU} + Length_{fiber} \times Cost_{fiber} + Cost_{cabling} \quad (7.3)$$

Επιπλέον, το OPEX της υποδομής V2I (Εξίσωση 7.4) περιλαμβάνει το OPEX των RSU, υπολογίζονται τόσο στην κατανάλωση ενέργειας όσο και στη συντήρηση, το OPEX των καλωδίων οπτικών ινών και η ηλεκτροδότηση/καλωδίωση (εδώ λαμβάνεται υπόψη μόνο η συντήρηση).

$$OPEX_{V2L_inf} = N_{RSU} \times OPEX_{RSU} + OPEX_{fiber} + OPEX_{cabling} \quad (7.4)$$

Πρόσθετες δαπάνες:

Έχοντας δημιουργήσει το μοντέλο κόστους, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παραδοχές για το πρόσθετο κόστος:

- Το κόστος εγκατάστασης του υλικού είναι 15% του κόστους υλικού [33]. Το κόστος της εγκατάστασης του υλικού αποτελεί μέρος του κόστους CAPEX και εκφράζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$C_{Inst} = 15\% \times C_{Hw} \quad (7.5)$$

- Το κόστος συντήρησης είναι 10 % του κόστους CAPEX [46].

$$M = 10\% \times CAPEX \quad (7.6)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το γενικό κόστος ορίζεται ως το κόστος του μάρκετινγκ, της υπηρεσίας βοήθειας, του ανθρώπινου δυναμικού, τη χρηματοδότησης κ.λπ. Σύμφωνα με το [48], είναι περίπου 22% πάνω στο άθροισμα των δαπανών CAPEX και OPEX.

$$Ovhd_c(t) = 22\% \times (CAPEX(t) + OPEX(t)) \quad (7.7)$$

Συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (ΣΚΙ):

Το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (της προτεινόμενης λύσης υπολογίζεται ως το άθροισμα του CAPEX, του OPEX των ετών T και των γενικών εξόδων των ετών T (T είναι ο ορίζοντας του έργου).

$$\Sigma KI = CAPEX + \Sigma (OPEX(t) + Ovhd_c(t)) \quad (7.8)$$

Προκειμένου να εξαχθεί το πρόσθετο κόστος ανά σενάριο ανάπτυξης, λαμβάνοντας ως αναφορά το βασικό σενάριο, ορίζονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί κόστους.

Αύξηση CAPEX (CAPEX_incr)

Το αυξητικό CAPEX είναι απλώς το CAPEX της νέας ανάπτυξης σε σύγκριση με την υπάρχουσα ανάπτυξη.

Αύξηση OPEX (OPEX_incr)

Το αυξητικό OPEX (OPEX_incr) του υπό μελέτη σεναρίου ανάπτυξης υπολογίζεται ως η διαφορά του OPEX της συνολικής ανάπτυξης (υφιστάμενη ανάπτυξη και η νέα αναπτυσσόμενη υποδομή) και το OPEX του βασικού σεναρίου.

$$OPEX_{incr} = OPEX_{Total} - OPEX_{baseline} \quad (7.9)$$

Πρόσθετο γενικό κόστος (Overhead_incr):

Το πρόσθετο γενικό κόστος του υπό μελέτη σεναρίου ανάπτυξης υπολογίζεται ως ποσοστό επί του CAPEX_incr και του OPEX_incr

$$Ovhd_{incr}(t) = 22\% \times (CAPEX_{incr} + OPEX_{incr}) \quad (7.10)$$

Συνολικό πρόσθετο κόστος ιδιοκτησίας:

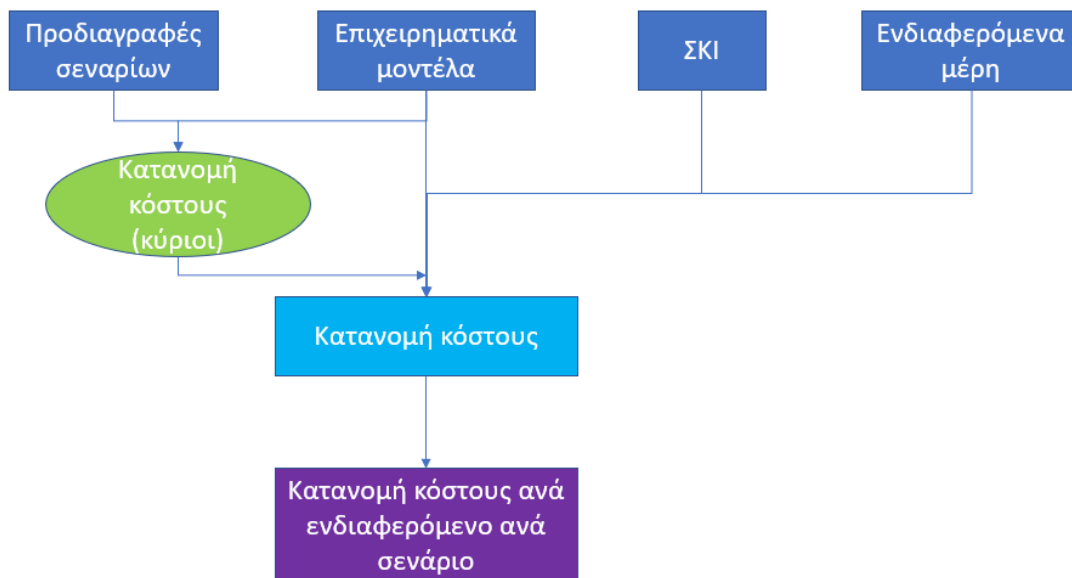
Το πρόσθετο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (ΣΚΙ) του εξεταζόμενου σεναρίου υπολογίζεται ως το άθροισμα του αυξητικού CAPEX, το αυξητικό OPEX των T ετών και το πρόσθετο γενικό κόστος των ετών T (T είναι ο ορίζοντας έργου).

$$\Sigma KI_{incr} = CAPEX_{incr} + \Sigma (OPEX_{incr}(t) + Ovhd_{incr}(t)) \quad (7.11)$$

7.1.2 Μοντέλο κατανομής του κόστους

Για την αξιολόγηση των προτεινόμενων επιχειρηματικών μοντέλων για τα βασικά ενδιαφερόμενα μέρη, δηλαδή τους MNOs και τους ROs, αναπτύχθηκε μια κατανομή κόστους. Το μοντέλο απαιτείται για τη σύνδεση του κόστους των διαφορετικών σεναρίων ανάπτυξης V2I και V2N με αυτών των ενδιαφερομένων μερών.

Το μοντέλο κατανομής που προτείνεται εδώ αποτελείται από δύο βήματα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3 με το γαλάζιο (υπο-μοντέλα). Πρώτον, ο προσδιορισμός των οδηγών κατανομής κόστους που απαιτεί ως εισροές τις προδιαγραφές του σεναρίου (π.χ. τύπος της συνδεσιμότητας που χρησιμοποιείται) και τα επιχειρηματικά μοντέλα (π.χ. σε συνεργατικά επιχειρηματικά μοντέλα, ο βαθμός συνεργασίας βοηθά στον καθορισμό του προγράμματος οδήγησης κατανομής κόστους). Στο δεύτερο βήμα, εκτελείται η πραγματική διαδικασία κατανομής όπου το ΣΚΙ των διαφορετικών σεναρίων κατανέμεται μεταξύ των βασικών ενδιαφερομένων με βάση τους οδηγούς (drivers) κατανομής του κόστους όπως προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα.



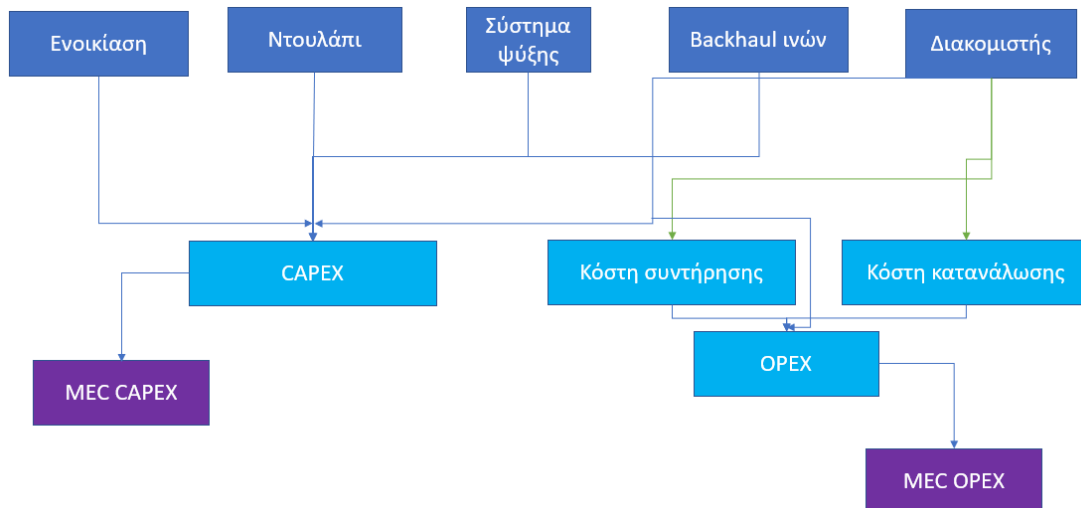
Σχήμα 7.3 Μοντέλο κατανομής του κόστους

7.1.3 Επίδραση της τοποθέτησης των MEC

Σύμφωνα με τον ορισμό του ETSI: “Η MEC προσφέρει σε προγραμματιστές εφαρμογών και παρόχους δυνατότητες για cloud computing και ένα περιβάλλον υπηρεσιών πληροφορικής στην άκρη του δικτύου. Αυτό το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης, καθώς και πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο σε πληροφορίες ραδιοδικτύου που μπορούν να αξιοποιηθούν πολλαπλές εφαρμογές.

Σύμφωνα με τη 5GAA, η τεχνολογία MEC είναι σημαντική για την υλοποίηση των περιπτώσεων χρήσης V2X που απαιτούν χαμηλά επίπεδα καθυστέρησης αφενός και αφετέρου αναμένεται να δημιουργεί όλο και περισσότερα δεδομένα που θα μπορούν να συλλέγονται και να επεξεργάζονται πιο κοντά στην πλευρά του χρήστη. Μέσα στο υπό εξέταση πεδίο αυτής της εργασίας, αρκετές περιπτώσεις χρήσης CCAM απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Επομένως, η αναπτυγμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιούμε βασίζεται στη χρήση τεχνολογίας MEC για την κάλυψη αυτών των KPI. Για να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος της υιοθέτησης αυτής της τεχνολογίας MEC, ένα μοντέλο κόστους για την εκτίμηση του κόστους ανάπτυξης του δικτύου των κόμβων MEC σε διαφορετικές τοποθετήσεις στην τοπολογία του δικτύου έχει αναπτυχθεί. Η γενική δομή του μοντέλου κόστους για την ανάπτυξη κόμβων MEC παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η εφαρμογή αυτού του μοντέλου είναι συγκεκριμένη για κάθε περίπτωση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν χρειάζεται να αναπτυχθεί νέα ίνα για σύνδεση του κόμβου MEC με το υπόλοιπο δίκτυο, δεδομένου ότι υπάρχει ήδη ένα backhaul ινών. Σε άλλες περιπτώσεις, υπάρχει αρκετός χώρος δίπλα στον πύργο (eNB/gNBs) για να φιλοξενήσει το ντουλάπι (Rack), οπότε δεν χρειάζεται να νοικιαστούν νέες τοποθεσίες για την ανάπτυξη των κόμβων MEC. Επιπλέον, με βάση την τοποθέτηση των κόμβων MEC στο δίκτυο, η ανάγκη για ντουλάπι και ένα νέο σύστημα ψύξης αξίζει περαιτέρω διερεύνησης.



Σχήμα 7.4 Κόστη για τοποθέτηση μονάδων MEC

7.2 Μοντελοποίηση κόστους και σενάρια για την ανάπτυξη V2I

Για τις συνδέσεις V2I σε σχέση με τους RSU με δυνατότητα PC5 Mode4, έχουν οριστεί τρία σενάρια ανάπτυξης. Αυτά τα τρία σενάρια ανάπτυξης είναι τα εξής:

- Το βασικό σενάριο V2I αντιστοιχεί στη φυσική ανάπτυξη που διατίθεται επί του παρόντος στον υπό μελέτη αυτοκινητόδρομο: 2 RSU συνολικά στο δοκιμαστικό τμήμα του αυτοκινητόδρομου μήκους ~ 4,5 km (δηλαδή ~ 0,5 RSU/km)
- Το πυκνό σενάριο ανάπτυξης V2I: αυτό το σενάριο αντιστοιχεί σε διπλασιασμένη βασική πυκνότητα: 4 RSU συνολικά στο ίδιο περιβάλλον (δηλαδή RS 1 RSU/km)
- Το εξαιρετικά πυκνό σενάριο ανάπτυξης V2I: αυτό το σενάριο αντιστοιχεί σε τετραπλασιασμένη πυκνότητα βάσης: 8 RSU συνολικά στο ίδιο περιβάλλον (δηλαδή ~ 2 RSU/km)

Τα ονόματα που αποδίδονται σε αυτά τα διαφορετικά σενάρια ορίζονται με βάση την πυκνότητα των RSU που συγκρίνονται στο βασικό σενάριο V2I. Στη συνέχεια αναφέρονται οι παραδοχές που έγιναν για να βελτιστοποιηθεί το μοντέλο και να παραχθούν νέα αποτελέσματα.

Γίνεται η υπόθεση επίσης ότι ο πληθωρισμός κόστους CAPEX και OPEX είναι αντίστοιχα -3% και +3% ετησίως.

Στη βιβλιογραφία, δημιουργήθηκαν τα πρώτα αποτελέσματα των τριών σεναρίων ανάπτυξης με βάση την υπόθεση ότι όλα τα αυτοκίνητα στο

εξεταζόμενο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου συνδέονται ταυτόχρονα. Ωστόσο, φαίνεται εξωπραγματικό να υιοθετηθεί ποσοστό διείσδυσης 100% των συνδεδεμένων αυτοκινήτων από το έτος έναρξης της ανάπτυξης. Αφ'ετέρου, δεν υπάρχει κοινή συμφωνία στο πλαίσιο της έρευνας και των ενδιαφερόμενων κοινοτήτων σχετικά με συγκλίνουσες προβλέψεις όσον αφορά το συνδεδεμένο ποσοστό διείσδυσης αυτοκινήτων τα επόμενα χρόνια. Υπάρχουν παλιές σχετικά μελέτες με ευρήματα που κυμαίνονται από απαισιόδοξα [44] έως αισιόδοξα [45] και ρυθμοί διείσδυσης που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν δεδομένου ότι η αυτοκινητοβιομηχανία επλήγη ελάχιστα από την κρίση του Covid. Μια λύση είναι να ακολουθηθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος.

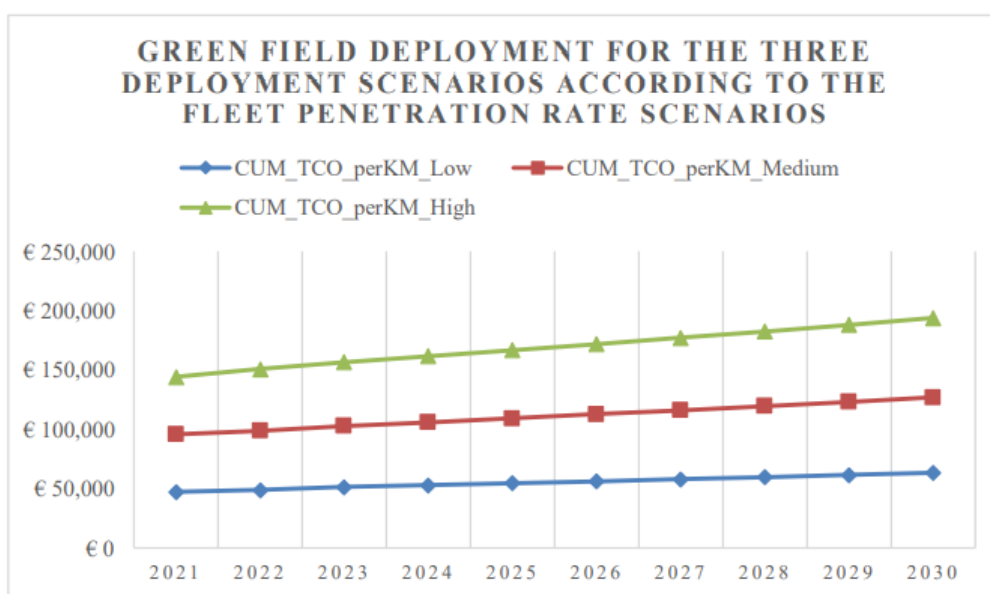
Σε αυτή την προσέγγιση ορίζονται τρία διαφορετικά σενάρια: χαμηλό, μεσαίο και υψηλό. Οι δύο πρώτες προβλέψεις, δηλαδή το χαμηλό και το μεσαίο σενάριο προέρχονται από το έργο MANTRA του CEDR [44]. Για αυτά τα δύο σενάρια ορίστηκε το "Χαμηλό σενάριο" ως το σενάριο "business as usual", όπου οι περιπτώσεις αυτοματοποιημένης χρήσης οδήγησης χρησιμοποιούνται όπως στη συνήθη οικονομία της αγοράς, χρησιμοποιώντας λύσεις που βασίζονται στη χρησιμότητα ή την οικονομική αξία για τον πελάτη ή το χρήστη. Το μεσαίο σενάριο στην περίπτωση μας είναι το "Υψηλό σενάριο" όπως στη μελέτη του έργου MANTRA όπου υποτίθεται η επιτάχυνση περιπτώσεων χρήσης αυτοματοποιημένης οδήγησης μέσω οικονομικών κινήτρων όπως η μειωμένη φορολογία μέσω ρυθμιστικών μέτρων, για παράδειγμα με την επιβολή της αυτοματοποιημένης οδήγησης υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Στη μελέτη MANTRA ξεκίνησαν τις προβλέψεις από το έτος 2030 ενώ σε αυτήν εδώ τη μελέτη θεωρείται το 2021 ως αρχικό έτος ανάπτυξης, επομένως θεωρούμε μια ετήσια αύξηση 1% στις πωλήσεις για οχήματα εξοπλισμένα με V2X τεχνολογίες για την πρόβλεψη των δεδομένων που λείπουν. Το σενάριο υψηλής διείσδυσης είναι το πιο αισιόδοξο σενάριο και λαμβάνεται από τη μελέτη IHS Mark-It [46].

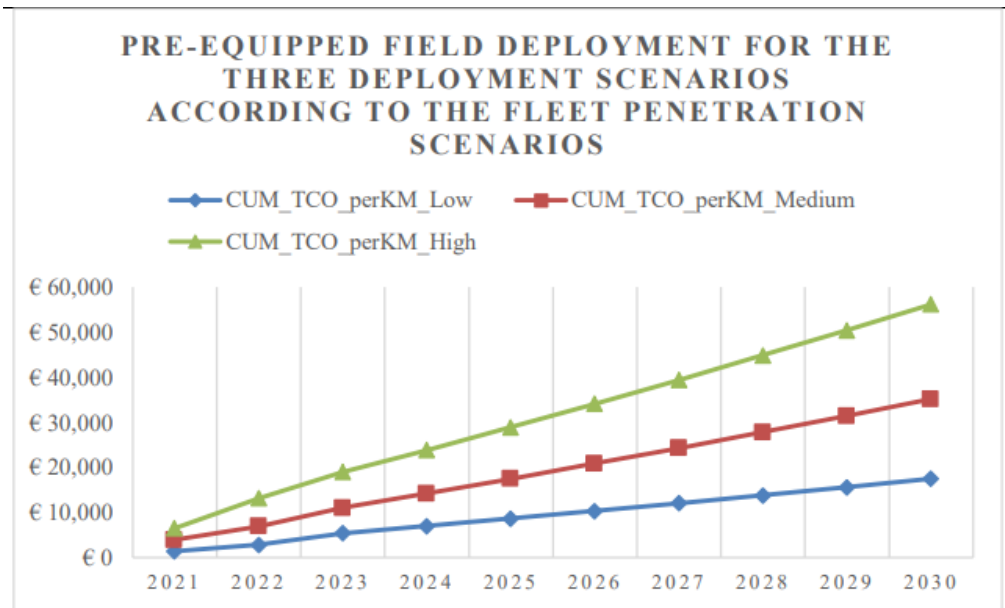
Παρόμοια με την προηγούμενη προσομοίωση και με βάση τον αριθμό των ταυτόχρονων απαιτούμενων συνδεδεμένων χρηστών/αυτοκινήτων, παρουσιάζεται η ανάπτυξη για κάθε σενάριο ρυθμού διείσδυσης του στόλου με στόχο την εκπλήρωση των KPI όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών. Για το χαμηλό σενάριο ορίζεται ένα σενάριο χαμηλής ανάπτυξης όπου έχουν εγκατασταθεί 2 RSU τα πρώτα δύο χρόνια (για την ανάπτυξη του πράσινου πεδίου και να διατηρήσει τις υπάρχουσες 2 RSU για τον αυτοκινητόδρομο του Brenner, δηλαδή η περίπτωση του προεξοπλισμένου πεδίου) και μέχρι το τρίτο έτος εγκαθίστανται επιπλέον 2 RSU για να διασφαλιστεί ένα χαμηλό ποσοστό απόρριψης αιτημάτων CLC. Ωστόσο, για το μεσαίο σενάριο θεωρείται ένα σενάριο μεσαίας ανάπτυξης όπου από το πρώτο έτος αναπτύσσουμε 4 RSU (4 νέα RSU στα σενάρια πράσινου πεδίου, αλλά στα προεξοπλισμένα όπου έχουμε ήδη 2 υπάρχοντα RSU προσθέτουμε

2 επιπλέον). Για να μετριαστεί η υψηλή κίνηση που δημιουργείται από τον μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων αυτοκινήτων στο στόλο με σενάριο υψηλού ποσοστού διείσδυσης 4 RSU χρειάζονται το πρώτο έτος, αλλά μέχρι το δεύτερο έτος απαιτούνται 4 νέες RSU ώστε να έχουμε 8 RSU συνολικά (λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα υποδομή, 2 RSU στο σενάριο του προεξοπλισμένου πεδίου).

Το αθροιστικό ΣΚΙ ανά Κm για τα τρία σενάρια ανάπτυξης (χαμηλό, μεσαίο και υψηλό) για δύο διαφορετικούς τύπους, δηλαδή για το πράσινο πεδίο και το προ-εξοπλισμένο πεδίο απεικονίζεται στα Σχήματα 7.5 και 7.6 αντίστοιχα [14].



Σχήμα 7.5 Συσσωρευτικό ΣΚΙ για τα τρία σενάρια ανάπτυξης για το πράσινο πεδίο



Σχήμα 7.6 Συσσωρευτικό ΣΚΙ για τα τρία σενάρια ανάπτυξης για το προ-εγκαταστημένο πεδίο

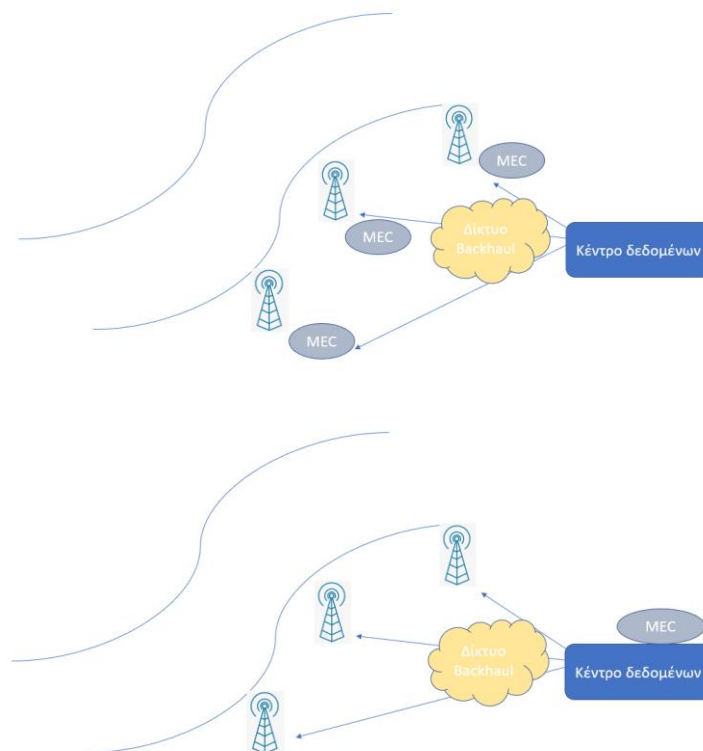
Όπως αναμενόταν, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ταυτόχρονων συνδεδεμένων αυτοκινήτων, τόσο υψηλότερο είναι το ΣΚΙ της απαιτούμενης ανάπτυξης είναι να πληρούνται οι καθορισμένοι KPI. Τα αποτελέσματα δείχνουν πόσο ακριβό είναι να αναπτυχθεί ένα πράσινο πεδίο του αυτοκινητόδρομου όπου δεν υπάρχει καλώδιο οπτικών ινών ή εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη πράσινου πεδίου είναι τρεις φορές πιο δαπανηρή από την προ-εξοπλισμένη ανάπτυξη πεδίου [14].

7.3 Μοντελοποίηση κόστους και σενάρια για την ανάπτυξη V2N

Τα σενάρια ανάπτυξης V2N θα υποστηρίξουν επίσης την παροχή της κεντρικής επιλογής CLC (δηλαδή, χρήση κινητού δικτύου που βασίζεται στη συνδεσιμότητα 4G/5G) στον υπό μελέτη αυτοκινητόδρομο, το πέρασμα Brenner (σύνορα μεταξύ Αυστρίας και Ιταλίας). Δύο αρχικά σενάρια έχουν καθορισθεί. Καθώς η τεχνολογία MEC είναι ζωτικής σημασίας για την εκπλήρωση των απαιτητικών KPI όπως συζητήθηκαν προηγουμένως, έχουν ληφθεί υπόψη δύο παραλλαγές ανά σενάριο, όπου το MEC είναι εγκατεστημένο είτε σε ένα μακρινό Κέντρο Δεδομένων (DC), δίπλα στο κεντρικό δίκτυο ή εναλλακτικά, τοπικά δίπλα στον πύργο (e/gNB). Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο παραλλαγών απεικονίζεται στο Σχήμα 7.7 [14].

- **Βασικό σενάριο V2N:** αντιστοιχεί στη φυσική ανάπτυξη που διατίθεται επί του παρόντος στον υπό μελέτη αυτοκινητόδρομο, που σημαίνει 2 εγκατεστημένα eNB, που λειτουργούν σε 800 και 1800 MHz

- Βασικό σενάριο V2N-a: MEC εγκαθίστανται δίπλα στους πύργους. Έτσι, συνολικά έχουμε 2 κόμβους MEC
 - Βασικό σενάριο V2N-b: Οι κόμβοι MEC φιλοξενοούνται στο Data Center. Ως εκ τούτου, ένα στην Αυστρία και ένα στην Ιταλία. συνολικά έχουμε 2 MEC
- **Πυκνό σενάριο V2N:** εκτός από την τρέχουσα ανάπτυξη, θα εγκατασταθεί ένα επιπλέον eNB (λειτουργεί στα 800/1800 MHz)
 - Πυκνό σενάριο V2N-a: MEC βρίσκονται στον πύργο. Έτσι, συνολικά υπάρχουν 3 κόμβοι MEC
 - Πυκνό σενάριο V2N-b: Οι κόμβοι MEC βρίσκονται στο DC, ένα στην Αυστρία και ένα στην Ιταλία



Σχήμα 7.7 Τοποθέτηση MEC. Κοντά στον πύργο (πάνω), κοντά στο DC (κάτω)

7.3.1 Μοντέλα εισόδων και παραδοχών

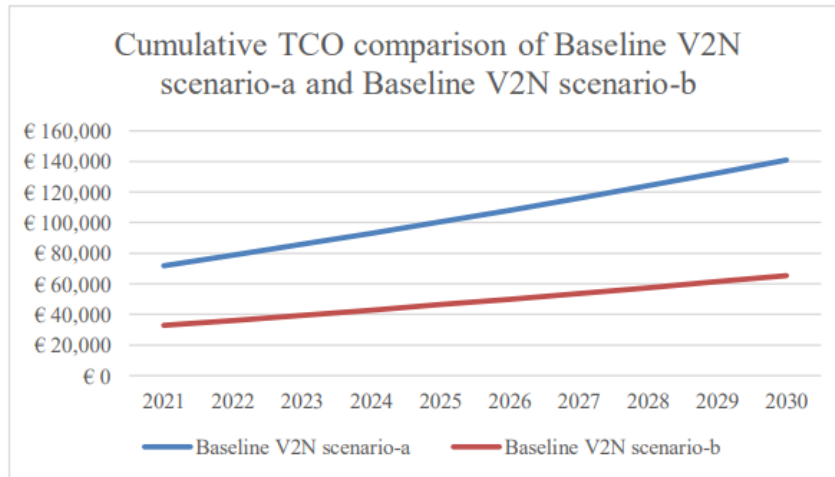
Εκτός από τις εισροές κόστους και τις παραδοχές, πρόσθετα δεδομένα απαιτούνται (και χρησιμοποιούνται) για την εκτέλεση του μοντέλου κόστους για αυτά τα σενάρια V2N. Ορισμένα από αυτά τα δεδομένα είναι εμπιστευτικά στοιχεία κόστους αλλά μπορούν να εκτιμηθούν ως ακολούθως:

Το κόστος κατασκευής ενός νέου μακροστοιχείου (μόνο η υποδομή του πύργου) είναι 30 έως 50 k €. Το κόστος ενός 2G/3G/4G BS είναι 25 έως 45 k € (δεν περιλαμβάνονται οι κεραίες). Κόστος για αναβάθμιση του σταθμού βάσης σε 5G από 2G/3G/4G είναι 40 έως 55 k € συμπεριλαμβανομένων των ενεργών κεραιών. Η συντήρηση του εξοπλισμού δικτύων κινητής τηλεφωνίας θεωρείται ότι είναι το 10% του αρχικού κόστους υλικού και εργασίας (CAPEX). Το κόστος ενός διακομιστή άκρων MEC τύπου "gigabyte h242-z10" είναι 10 k € [47] και το σύστημα ψύξης και το κόστος του rack για την ανάπτυξη MEC είναι περίπου 2,2 k € και 2,5 k € αντίστοιχα [45].

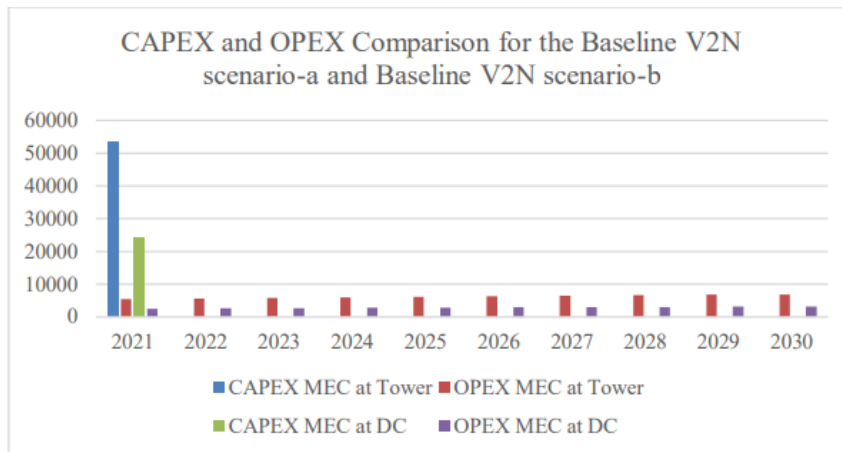
7.3.2 Προσομοίωση μοντέλου

Προσομοιώθηκε το μοντέλο κόστους για τα δύο σενάρια, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, τα σενάρια V2N βάσης-α και β και τα πυκνά σενάρια V2N-α και β, εκτός από τη χρήση του μοντέλου κόστους του MEC που συζητείται στην ενότητα 7.4.1 Τα CAPEX, OPEX, Overhead και ΣΚΙ έχουν μελετηθεί έτσι για καθένα από αυτά τα σενάρια που εξετάστηκαν. Το ΣΚΙ στο έτος N είναι το συσσωρευτικό κόστος των N ετών συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου και των ετήσιων λειτουργικών δαπανών καθώς και γενικών εξόδων

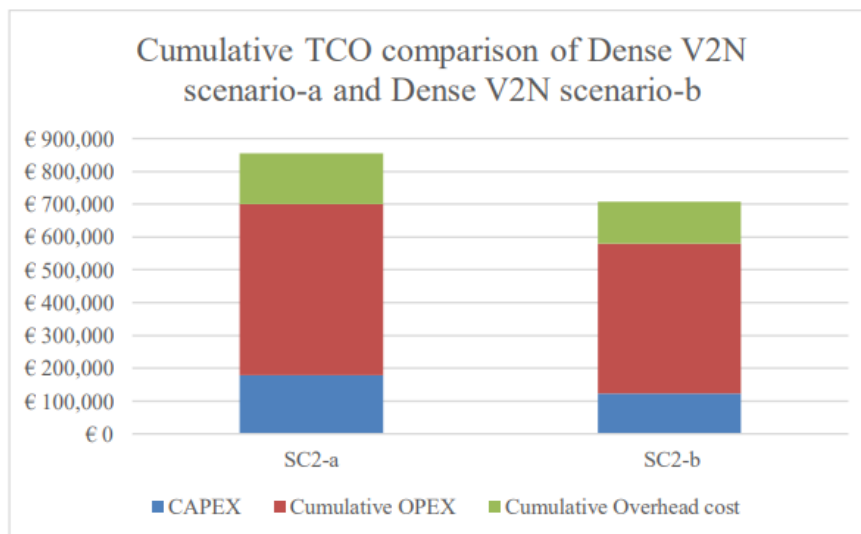
Η σύγκριση μεταξύ του αθροιστικού ΣΚΙ του βασικού σεναρίου-α και του σεναρίου-β απεικονίζεται στο Σχήμα 7.8. Τα αποτελέσματα των πρώτων σεναρίων -που είναι τα σενάρια βασικής γραμμής V2N- δείχνουν ότι το CAPEX του βασικού V2N για το σενάριο-α είναι υψηλότερο από το σενάριο V2N βασικής γραμμής-β, αφού η εγκατάσταση του MEC δίπλα στους πύργους απαιτεί εγκατάσταση σε ντουλάπια για να φιλοξενήσουν τόσο τον εξοπλισμό MEC όσο και το σύστημα ψύξης του, τα οποία δεν απαιτούνται εάν το αναπτύξουμε στα κέντρα δεδομένων. Τα διαφορετικά στοιχεία κόστους ΣΚΙ απεικονίζονται στο Σχήμα 7.9 [14].



Σχήμα 7.8 Συσσωρευτικό ΣΚΙ για τα δύο βασικά σενάρια V2N



Σχήμα 7.9 Σύγκριση CAPEX και OPEX για τα δύο βασικά σενάρια V2N



Σχήμα 7.10 Σύγκριση Συσσωρευτικού ΣΚΙ για το πυκνό σενάριο V2N

Τα αποτελέσματα του μοντέλου κόστους για το πυκνό σενάριο V2N- (a & b) όταν έχει εγκατασταθεί ένα επιπλέον eNB- παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.10. Σε σύγκριση με το βασικό σενάριο V2N, η προσθήκη ενός νέου eNB προσθέτει περίπου 713,5k € σταδιακά στο αθροιστικό ΣΚΙ για 10 χρόνια με 125,7k € ως πρόσθετο CAPEX και 459,1k € ως πρόσθετο στο συσσωρευτικό OPEX.

Το OPEX είναι το κυρίαρχο κόστος σε αυτό το σενάριο λόγω του κόστους ενοικίασης της τοποθεσίας που απαιτείται για τη φιλοξενία του νέου κελύφους μακροεντολών (eNB). Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη του MEC δίπλα στους πύργους σημαίνει εγκατάσταση 3 κόμβων MEC στο πυκνό σενάριο V2N-a σε σύγκριση με μόνο 2 κόμβους MEC στο πυκνό σενάριο V2N-b, έτσι το CAPEX είναι ελαφρώς υψηλότερο όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.9 και 7.10.

7.4 Επίδραση της τοποθέτησης MEC στο κόστος και αποτελέσματα από την συσταδοποίηση MEC

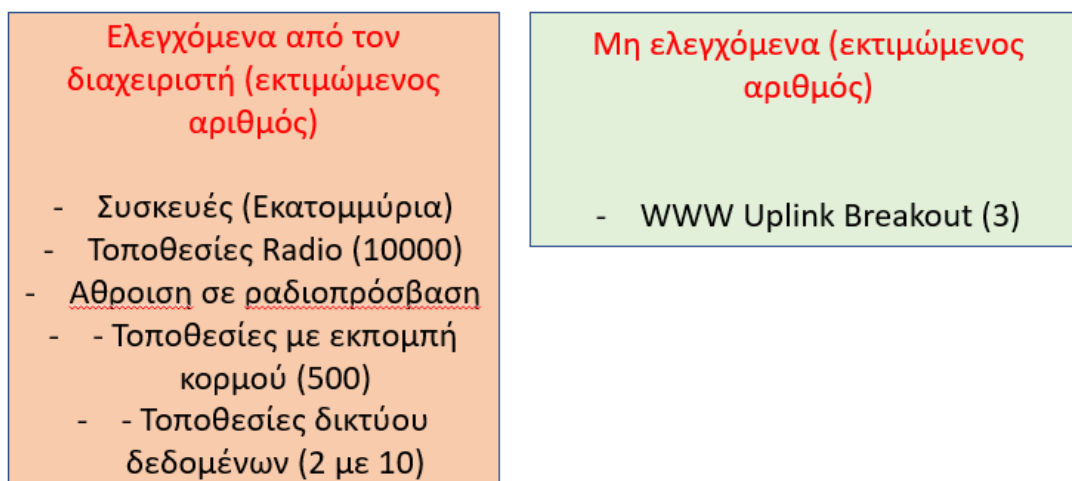
7.4.1 Επίδραση των MEC στο κόστος

Με αυτά τα δεδομένα κόστους που παρουσιάζονται στην Ενότητα 7.3, εκτελείται το μοντέλο κόστους MEC (που περιγράφεται στην Ενότητα 7.3.1) για να εξαχθεί το κόστος ανάπτυξης MEC για διαφορετικές επιλογές τοποθέτησης εντός της τοπολογίας δικτύου για ολόκληρο τον αυτοκινητόδρομο Μπολόνια-Μόναχο όχι μόνο το πέρασμα του Brenner (δηλαδή, 600 km, πάνω από τρεις χώρες) με βάση τη γενική τοπολογία του δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη μια μέση απόσταση μεταξύ eNB ίση 3 Km, έχουν εγκατασταθεί περίπου 200 eNB δίπλα στον αυτοκινητόδρομο. Δεδομένου ότι 3 χώρες συμμετέχουν στην υπό μελέτη περίπτωση, θα υπάρχουν 3 τοποθεσίες των Κέντρων Δεδομένων (DC) (3 διαφορετικών MNOs) που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αντίστοιχα, έχει υπολογιστεί ο αριθμός των τοποθεσιών συγκέντρωσης του πυρήνα μετάδοσης και της ραδιοπρόσβασης. Οι διαφορετικοί τύποι κόστους: CAPEX, OPEX και το αθροιστικό ΣΚΙ για 10 χρόνια για την ανάπτυξη κόμβων MEC σε διαφορετικές θέσεις στο δίκτυο παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα κόστους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 αποτελούν το μέρος του υπολογισμού όπου μόνο τα CAPEX των κόμβων MEC (διακομιστής, ντουλάπι, σύστημα ψύξης) και OPEX (συντήρηση του κόμβου MEC και κόστος κατανάλωσης ισχύος) λαμβάνονται υπόψη χωρίς να υπολογίζεται το κόστος των καλωδίων των ινών που απαιτούνται για τη σύνδεση αυτών των κόμβων στο υπόλοιπο δίκτυο και χωρίς επίσης να λαμβάνεται υπόψη το γενικό κόστος.

Πίνακας 7.1 MEC CAPEX, OPEX και ΣΚΙ

Σενάριο	Μονάδα	eNB	Πρόσβαση ΤΧ	Δίκτυο κορμού ΤΧ	Δίκτυο κορμού στο Κέντρο Δεδομένων
Αριθμός τοποθεσιών	#	200	100	10	3
MEC CAPEX	Ευρώ	10,700,000	61,190	240,000	73,000
MEC OPEX (10 χρόνια)	Ευρώ	12,540,000	66,070	290,600	88,300
MEC ΣΚΙ (10 χρόνια)	Ευρώ	23,220,900	62,087	538,000	161,000



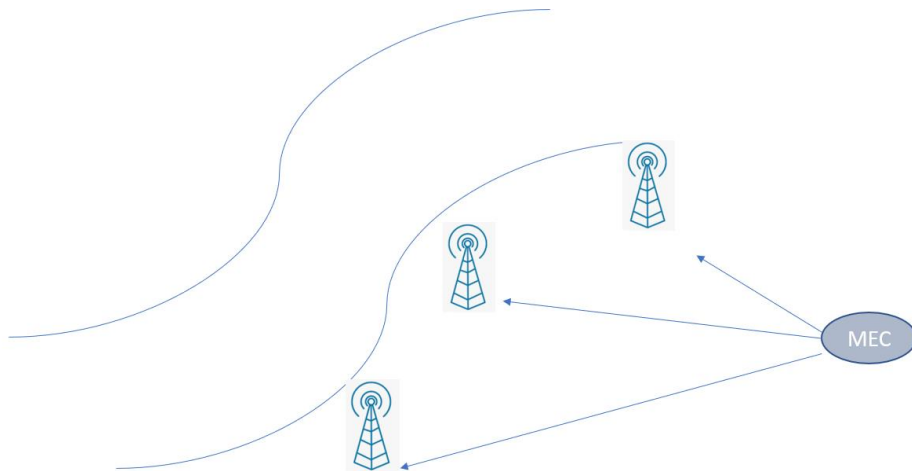
Σχήμα 7.11 Τοπολογία αναφοράς για το κινητό δίκτυο

Με βάση τα αποτελέσματα κόστους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1, η ανάπτυξη του MEC στον πύργο φαίνεται πολύ δαπανηρή, ως εκ τούτου αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ των απαιτούμενων KPI που πρέπει να πληρούνται για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις χρήσης και της ανάπτυξης του κόστους δικτύου. Μια λύση θα μπορούσε να συνίσταται στην εκτέλεση ομαδοποίησης MEC, όπου ένας κόμβος MEC εξυπηρετεί πολλαπλά e/gNB ταυτόχρονα μέσα στο λεγόμενο «σύμπλεγμα». Διαφορετικά μοντέλα ομαδοποίησης έχουν εντοπιστεί και έχουν λεπτομερώς αναφερθεί.

7.4.2 Μοντέλα συσταδοποίησης MEC

Εκτός από μια δαπανηρή λύση, η εγκατάσταση MEC σε κάθε πύργο έχει άλλες προκλήσεις/μειονεκτήματα, καθώς προκαλεί 1) ανησυχίες για την ασφάλεια και το σχετικό κόστος: πώς να ασφαλίσουμε φυσικά κάθε κόμβο MEC στον αυτοκινητόδρομο (ειδικά δίπλα στα σύνορα της χώρας) και σε επίπεδο λογισμικού έναντι τυχόν εισβολής που μπορεί να συμβεί. Τα απαιτούμενα μέτρα ασφαλείας είναι ακόμη άγνωστα, δεδομένου ότι η ανάπτυξη της MEC είναι υπό μελέτη προς το παρόν και ως εκ τούτου το κόστος που προκύπτει είναι επίσης άγνωστο. 2) Θέματα που σχετίζονται με την καθυστέρηση: αν αυξήσουμε τον αριθμό των κόμβων MEC με μια μικρή απόσταση, προκύπτει ότι αυξάνεται η καθυστέρηση αφού η μετάβαση από το ένα MEC στο άλλο απαιτεί δεδομένα/περιόδους σύνδεσης που σχετίζονται με την υπηρεσία μεταφοράς η οποία προκαλεί περίπου νέα καθυστέρηση 1 έως 2 ms ανά MEC. Επομένως, θα μπορούσε να εξεταστεί η ομαδοποίηση MEC ως λύση συμβιβασμού που λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος όσο και την ασφάλεια και τις καθυστερήσεις.

Σε αυτό το μοντέλο, ο κόμβος MEC βρίσκεται στην ίδια απόσταση από όλα τα eNBs/gNB και συνδέεται απευθείας στο σημείο με αυτά τα eNB/gNB. Αυτό το μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.12 [14].



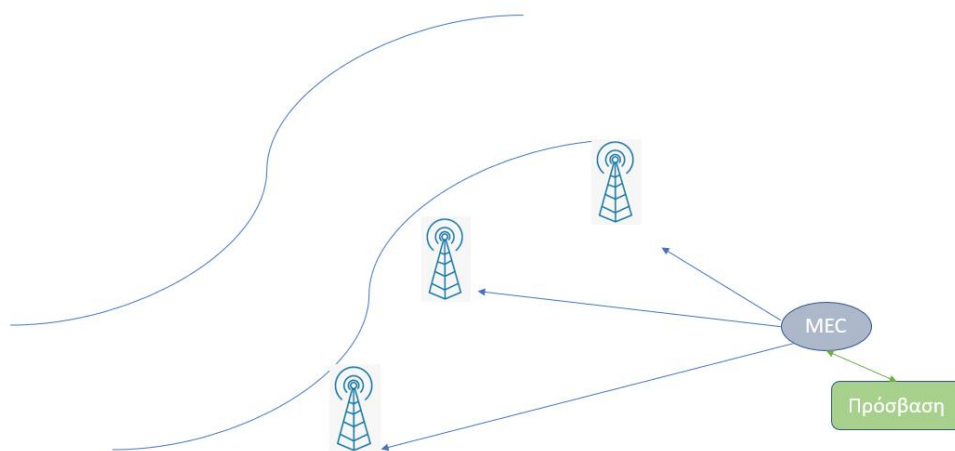
Σχήμα 7.12 Τοπολογία αστέρα

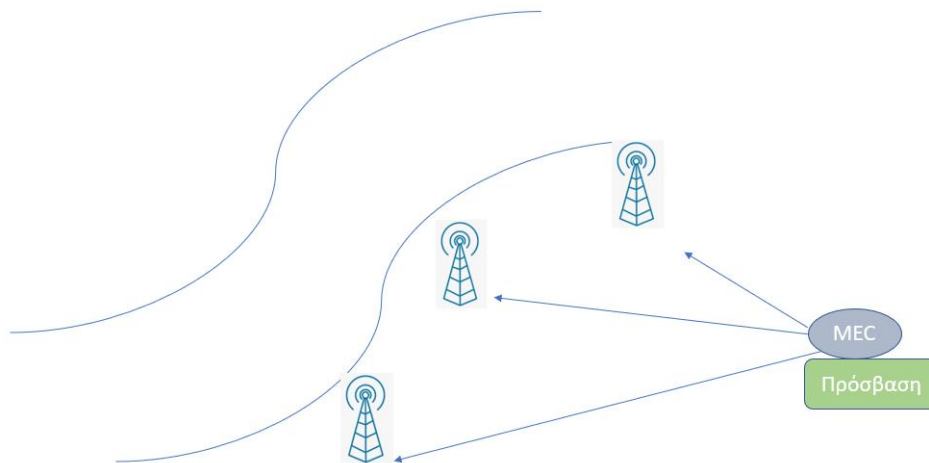
Σε αυτό το μοντέλο υπάρχουν διάφορες επιλογές.

Επιλογή 1: όπου ο αριθμός των eNBs/gNB στο ίδιο σύμπλεγμα MEC είναι διαφορετικός από τον αριθμό που εξυπηρετείται από την τοποθεσία συγκέντρωσης ραδιοπρόσβασης, επομένως η φιλοξενία MEC στην τοποθεσία

συγκέντρωσης δεν θα έχει νόημα επειδή ο κόμβος MEC πρέπει να εξυπηρετεί τους eNB/gNB που βρίσκονται κάτω από άλλη τοποθεσία συγκέντρωσης ραδιοπρόσβασης, επομένως νέα μακριά ίνα απαιτείται για τη σύνδεση του κόμβου MEC με τα eNB/gNB που δεν είναι συνδεδεμένα στη θέση συγκέντρωσης που φιλοξενεί τον κόμβο MEC ή απαιτείται σύνδεση μεταξύ των δύο θέσεων συνάθροισης που προκαλεί επιπλέον λανθάνουσα κατάσταση αφού εισάγεται ένα hop μεταξύ αυτών (eNBs/gNBs) και του κόμβου MEC. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να μισθωθεί νέα τοποθεσία μεταξύ της θέσης συνάθροισης και των θέσεων ασύρματης πρόσβασης για να φιλοξενήσει τον κόμβο MEC, όπως φαίνεται στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 7.13. Επιπλέον, απαιτείται εγκατάσταση καλωδίου οπτικών ινών για τη σύνδεση του πύργου με τον κόμβο MEC.

Μια άλλη επιλογή θα μπορούσε να είναι η εγκατάσταση μόνο των επιπλέον καλωδίων για τη σύνδεση του κόμβου MEC με τα υπόλοιπα eNB/gNB που δεν έχουν συνδεθεί ακόμη (μέσω της υπάρχουσας οπτικής ίνας που συνδέει τις τοποθεσίες Radio με τις τοποθεσίες συγκέντρωσης). Αυτές οι δύο επιλογές θα μπορούσαν να εξεταστούν εάν ο MNO επιμένει στη χρήση της πλήρους χωρητικότητας των πόρων υλικού MEC ή για οποιονδήποτε άλλο λόγο, διαφορετικά η επιλογή 2 (εξηγείται στην επόμενη υποενότητα) θα μπορούσε να είναι η βέλτιστη λύση.





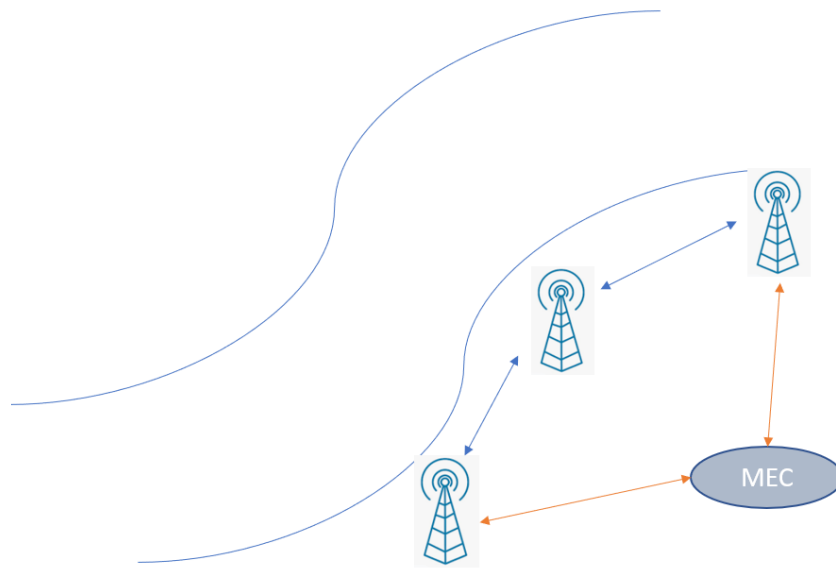
Σχήμα 7.13 Επιλογές για την τοπολογία αστέρα

Επιλογή 2: όπου ο αριθμός των eNBs/gNB στο ίδιο σύμπλεγμα MEC είναι ο ίδιος, επομένως καλύτερα να τοποθετηθεί στην τοποθεσία συγκέντρωσης ασύρματης πρόσβασης. Αυτή η επιλογή απεικονίζεται στο κάτω μέρος του Σχήματος 7.13.

Και στις δύο περιπτώσεις, πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο σύνδεσης των κόμβων MEC μεταξύ τους για να διασφαλιστεί η επικοινωνία μεταξύ των MEC. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος του καλωδίου των οπτικών ινών που συνδέει τα διάφορα συμπλέγματα.

Μοντέλο τοπολογίας συμπυκνμένου αστεριού:

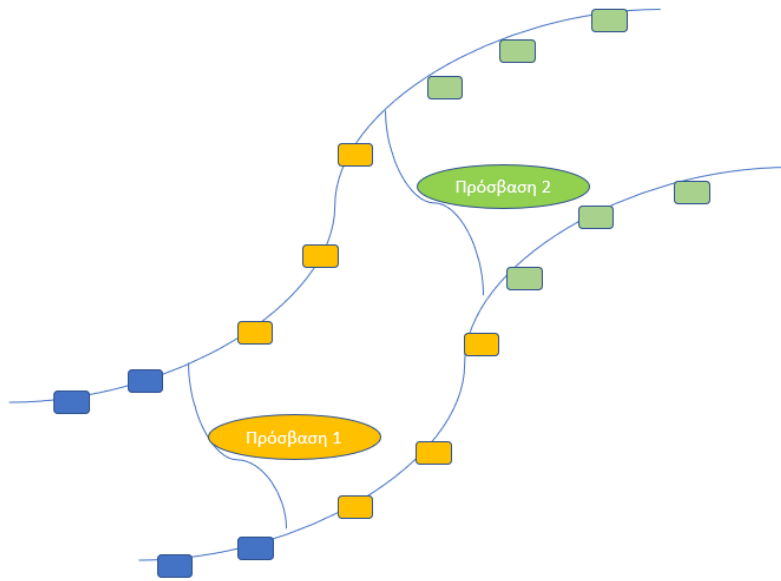
Μια άλλη επιλογή για την ανάπτυξη της ομαδοποίησης MEC είναι αντί της μίσθωσης μιας νέας τοποθεσίας για τη φιλοξενία του κόμβου MEC, η συγχρήγηση με ένα από τα eNB/gNB σε αυτό το σύμπλεγμα. Το Σχήμα 7.14 παρουσιάζει αυτό το μοντέλο. Σύνδεση του κόμβου MEC στα διαφορετικά eNB/gNB μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους: 1) σύνδεση τοπολογίας διαύλου (παρουσιάζεται με μπλε γραμμές στο Σχήμα 7.14) που θα εισαγάγει περισσότερα άλματα στη σύνδεση μεταξύ eNB και MEC, επομένως αποφασίστηκε να αποκλειστεί ως επιλογή για λόγους καθυστέρησης. 2) Η δεύτερη επιλογή σύνδεσης θα ήταν η σύνδεση από σημείο σε σημείο μεταξύ του καθενός eNBs/gNBs εντός του συμπλέγματος και του κόμβου MEC (παρουσιάζονται με τις πορτοκαλί γραμμές στο Σχήμα 7.14). Σε αυτή την περίπτωση, καλώδια ινών απαιτούνται για τους διαφορετικούς συνδέσμους. Πρέπει να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της καλύτερης θέσης ώστε να φιλοξενήσει τον κόμβο MEC προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το απαιτούμενο συνολικό καλώδιο οπτικών ινών [14].



Σχήμα 7.14 Τοπολογία διαδρόμου

Μια άλλη επιλογή θα μπορούσε να είναι η μίσθωση καλωδίων οπτικών ινών από φορείς εκμετάλλευσης οδών (εάν έχουν ήδη εγκαταστήσει ίνα στον αυτοκινητόδρομο). Αυτές οι δύο διαφορετικές επιλογές μπορεί να είναι συγκρίσιμες από άποψη κόστους για να δώσουν περισσότερες πληροφορίες στους MNOs για τις επιλογές ανάπτυξης MEC.

Και στα δύο μοντέλα, μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι η σύνδεση ινών υπάρχει ήδη για λόγους αξιοπιστίας, με τη μορφή τοπολογίας δικτύου με δακτύλιο τοπολογία (που είναι η φυσική ανάπτυξη), ωστόσο, η λογική σύνδεση είναι με τη μορφή τοπολογίας δέντρου/αστεριού, που μπορεί να διαμορφωθεί με βάση, για παράδειγμα, σύστημα που βασίζεται σε WDM (πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος). Αυτός ο φυσικός δακτύλιος ινών υπάρχει για να διασφαλίσει ότι εάν μια από τις τοποθεσίες συγκέντρωσης πέσει, μια άλλη τοποθεσία συγκέντρωσης μπορεί να αναλάβει (παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.15). Εάν χρησιμοποιηθεί μια τέτοια ανάπτυξη, τότε μπορεί να εξοικονομηθεί ένα τεράστιο επενδυτικό κόστος, καθώς δεν χρειάζεται ανάπτυξη για νέες ίνες.



Σχήμα 7.15 Δίκτυο ίνας με δακτύλιο

Επίδραση των μοντέλων ομαδοποίησης στο κόστος εγκατάστασης του MEC

Για να προσδιοριστεί το καλύτερο μοντέλο συμπλέγματος MEC υπό συγκεκριμένες συνθήκες, εκτελέσθηκε το μοντέλο κόστους MEC που περιγράφεται στην ενότητα 7.3. για καθένα από τα τρία μοντέλα που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα. Αυτά είναι τα εξής:

το M11: μοντέλο τοπολογίας αστεριού -επιλογή 1- (κόμβος MEC που φιλοξενείται μεταξύ των e/gNBs (πύργος) και των τοποθεσιών συγκέντρωσης),

το M12: τοπολογίας αστεριού -επιλογή 2- (MEC που φιλοξενείται στην τοποθεσία συγκέντρωσης) και

το M2: τοπολογία κατεστραμμένου αστεριού (το MEC φιλοξενείται δίπλα σε έναν από τους πύργους εντός του συμπλέγματος MEC). Για το Μοντέλο 2 (M2) αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για να βρεθεί η καλύτερη θέση MEC εντός του συμπλέγματος MEC (ο αριθμός των e/gNBs (πύργος)) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό μήκος καλωδίου οπτικών ινών που απαιτείται για να συνδεθούν όλα τα e/gNB μέσα στο ίδιο σύμπλεγμα στον κόμβο MEC.

Σύμφωνα με αρκετές παραμέτρους σχετικά με την υπάρχουσα υποδομή στην άκρη του δρόμου, πολλαπλά σενάρια ανά MEC -με βάση το μοντέλο ομαδοποίησης- μπορούν να προσδιοριστούν: από το χειρότερο σενάριο (δεν

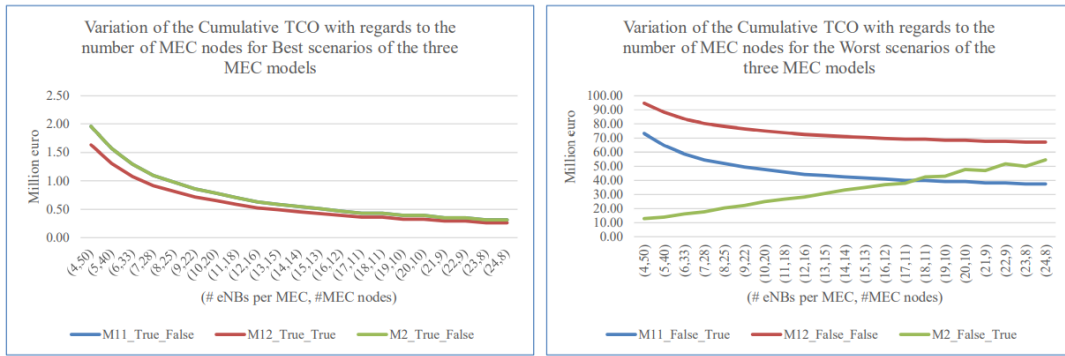
υπάρχει υποδομή) έως το καλύτερο σενάριο (κάποια από τις ζητούμενες υποδομές είναι ήδη σε ισχύ). Για τα μοντέλα M11 και M2, έχουν χρησιμοποιηθεί δύο παράμετροι να εξαχθούν 4 σενάρια ανά μοντέλο, δηλαδή η ύπαρξη καλωδίων ινών που συνδέουν το e/gNB με τον κόμβο MEC (Σωστό/Λάθος) και την ανάγκη μίσθωσης τοποθεσίας για να φιλοξενήσει τον κόμβο MEC (Σωστό/Λάθος). Ως εκ τούτου, για αυτά τα δύο μοντέλα, το χειρότερο σενάριο είναι αυτό που συνδυάζει το σύνολο παραμέτρων (False, True), που σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη ίνα στην άκρη του δρόμου και πρέπει να μισθωθεί μια τοποθεσία για να φιλοξενήσει τους κόμβους MEC. Το καλύτερο συνδυαστικό σενάριο είναι το (Σωστό, Λάθος). Ακόμα μέσα στο M12, ο κόμβος MEC θα φιλοξενηθεί στην τοποθεσία συγκέντρωσης, επομένως μόνο η ύπαρξη ίνας μεταξύ της τοποθεσίας συνάθροισης και του e/gNB (Σωστό/Λάθος) και η ύπαρξη ίνας που συνδέει τις διαφορετικές τοποθεσίες συγκέντρωσης για να διασφαλιστεί η άμεση σύνδεση inter-MEC (True/False), η οποία έχει ως αποτέλεσμα 4 σενάρια επίσης. Για το τελευταίο μοντέλο, το χειρότερο σενάριο είναι αυτή που συνδυάζει το σύνολο παραμέτρων (Λάθος, Λάθος), ωστόσο το καλύτερο είναι το σενάριο συνδυασμού (Αληθές, Αληθές).

Δεδομένου ότι ο αριθμός των e/gNBs ανά συστάδα MEC δεν είναι γνωστός, μεταβάλλεται ο αριθμός αυτός κάθε φορά προκειμένου να εξαχθεί ο απαιτούμενος αριθμός κόμβων MEC για την κάλυψη των 200 e/gNB στον υπό μελέτη αυτοκινητόδρομο (600 km από το Μόναχο έως τη Μπολόνια) ξεκινώντας από 4 e/gNB ανά σύμπλεγμα MEC έως 24 e/gNBs (με βάση την απόδοση του υποτιθέμενου χρησιμοποιούμενου διακομιστή MEC, η κίνηση που προέρχεται έως και 24 e/gNB και μπορεί να υποστηρίζεται ταυτόχρονα [47]). Τα αποτελέσματα του αθροιστικού ΣΚΙ της ανάπτυξης κόμβων MEC στο αυτοκινητόδρομο σύμφωνα με τη διαφορετική ομαδοποίηση MEC μοντέλων - ενώ μεταβάλλεται κάθε φορά ο αριθμός των e/gNBs ανά συστάδα MEC- συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2. Οι αριθμοί στο κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στο χειρότερο σενάριο ανά μοντέλο, ωστόσο το πράσινο αφορά τα καλύτερα σενάρια.

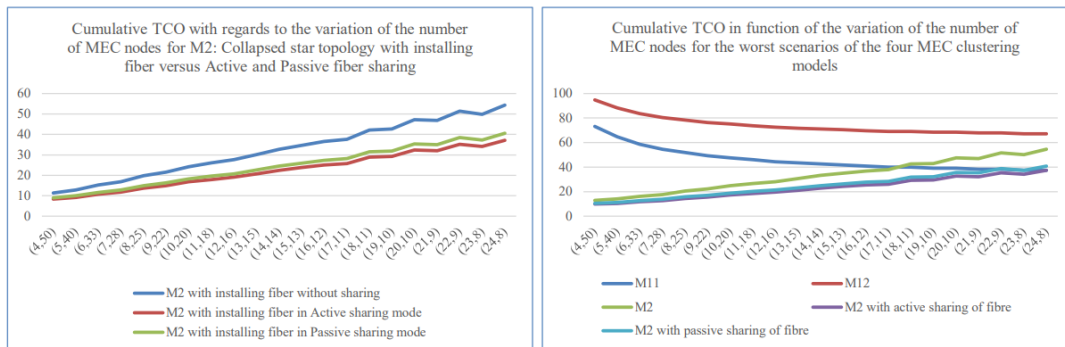
Για να συγκριθούν τα διαφορετικά μοντέλα ομαδοποίησης μεταξύ τους από άποψη κόστους-αποτελεσματικότητας, οπτικοποιούνται αυτά τα αποτελέσματα σε δύο γραφήματα, το πρώτο ομαδοποιεί τα καλύτερα σενάρια όλων των μοντέλων μαζί στο Σχήμα 7.16 (α) και τα χειρότερα στο Σχήμα 7.16 (β). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.16 (α) τα μοντέλα M11 και M2 είναι πανομοιότυπα από άποψη κόστους όταν γίνεται η υπόθεση της καλύτερης κατάστασης της υπάρχουσας υποδομής στο δρόμο (ύπαρξη ινών και υπάρχει αρκετός χώρος για να φιλοξενήσει το MEC κόμβος). Ωστόσο, το M12 (φιλοξενεί το MEC στην τοποθεσία συγκέντρωσης) στην καλύτερη παραλλαγή του σεναρίου είναι το πιο οικονομικό μοντέλο ομαδοποίησης μεταξύ των τριών μοντέλων. Ωστόσο, όταν εξετάζονται τα χειρότερα σενάρια (δεν υπάρχουν καλώδια οπτικών ινών στο πεδίο, ανάγκη μίσθωσης ενός χώρου και καμία άμεση σύνδεση μεταξύ των τόπων συγκέντρωσης) που παρουσιάζεται στο

Σχήμα 7.16 (β), το μοντέλο Το M12 είναι το πιο ακριβό μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο συνολικό μήκος της ίνας που απαιτείται για τη σύνδεση των 200 e/gNBs στη διαφορετική εξυπηρέτηση τοποθεσιών συγκέντρωσης και τοποθεσιών συγκέντρωσης μεταξύ τους σε σύγκριση για παράδειγμα με το M11 όπου συγκεντρώνουμε η ίνα να συνδέεται με τον κόμβο MEC (ο οποίος βρίσκεται μεταξύ των e/gNBs και της τοποθεσίας συγκέντρωσης) και τότε χρειαζόμαστε μόνο ένα καλώδιο ίνας για τη σύνδεση του MEC με τη θέση συγκέντρωσης. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι το M2 (τοπολογία κατεστραμμένου αστεριού) είναι το πιο οικονομικό μοντέλο, αλλά μέχρι τον αριθμό των 17 e/gNBs ανά συστάδα MEC, μετά από αυτό το σημείο το συνολικό μήκος των απαιτούμενων ινών αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που καθιστά το μοντέλο ακριβότερο από το M11. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι αν αυξηθεί ο αριθμός των e/gNBs ανά συστάδα MEC, η απόσταση μεταξύ των e/gNBs και του κόμβου MEC σε μια συμπυκνωμένη τοπολογία αστεριού γίνεται μεγαλύτερη από αυτήν που χρησιμοποιεί το μοντέλο τοπολογίας αστεριού.

Το ζιγκ-ζαγκ μοτίβο που παρατηρείται στο M2 όταν υπάρχει σημαντικός αριθμός e/gNBs ανά συστάδα MEC και μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι μερικές φορές η αύξηση του αριθμού των συστάδων MEC κατά ένα μπορεί να είναι λιγότερο δαπανηρή από την ύπαρξη περισσότερων e/gNB ανά ένα σύμπλεγμα MEC όπως φαίνεται για παράδειγμα όταν συγκρίνουμε το σημείο (18,10) και (19,11). Ωστόσο, για το μοντέλο M11 φαίνεται μη ρεαλιστικό (σε κάποιον βαθμό) να υποθεθεί ότι υπάρχουν ήδη καλώδια οπτικών ινών σε κάθε θέση, αλλά για το μοντέλο M2 όπου ο κόμβος MEC φιλοξενείται δίπλα σε ένα από τα e/gNB εντός του συμπλέγματος MEC, είναι λογική η υπόθεση ότι τα καλώδια οπτικών ινών απλώνονται δίπλα στο δρόμο (που αναπτύσσονται από φορείς εκμετάλλευσης οδών ή MNOs) ή θα αναπτυχθούν. Επομένως, προσομοιώθηκε μια άλλη παραλλαγή του μοντέλου M2 όπου έγινε η υπόθεση ότι ο MNO θα εξοικονομήσει τα καλώδια οπτικών ινών που χρειάζονται μοιράζοντας την υποδομή με παθητικό ή ενεργό τρόπο με άλλο χειριστή (MNO ή οδικός χειριστής) και συγκρίνονται τα αποτελέσματα πρώτα με το αρχικό μοντέλο M2 (όπου ο MNO αναπτύσσει το MEC και πρέπει να πληρώσει ολόκληρο το κόστος της εγκατάστασης ινών). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.17 (α) και στη συνέχεια παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα των χειρότερων σεναρίων μαζί στο Σχήμα 7.17 (β). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την κοινή χρήση της εγκατάστασης ινών εξοικονομούνται σημαντικά κόστη στο ΣΚΙ, αλλά με την ενεργή κοινή χρήση εξοικονομούνται ακόμη περισσότερα από τον παθητικό τρόπο κοινής χρήσης. Προκύπτει ότι ακόμη και με υψηλό αριθμό e/gNB ανά σύμπλεγμα MEC το μοντέλο M2 είναι το πιο ακριβό μοντέλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.17 (β) [14].



Σχήμα 7.16 Συσσωρευτικό ΣΚΙ σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων MEC για το βέλτιστο σενάριο



Σχήμα 7.17 Συσσωρευτικό ΣΚΙ σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων MEC για το χειρότερο σενάριο

7.5 Αποτελέσματα του μοντέλου κατανομής

Εφαρμόσθηκε το μοντέλο κατανομής κόστους που περιγράφεται στην Ενότητα 7.1.2 ξεκινώντας πρώτα από τον προσδιορισμό των στοιχείων κατανομής κόστους όπου οι προδιαγραφές του σεναρίου και τα αναγνωρισμένα επιχειρηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ως βασικές εισροές.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2 Στοιχεία κατανομής κόστους

Εισακτέα τιμή	Περιγραφή	Κατανομή κόστους	Εξήγηση
Σενάριο	Σενάρια ανάπτυξης V2I και V2N Γεωγραφική	Τύπος συνδεσιμότητας	Κατανομή του κόστους της ανάπτυξης στο διαχειριστή που παρέχει τον τύπο συνδεσιμότητας που μελετήθηκε στο συγκεκριμένο σενάριο ανάπτυξης

	κατανομή	Χώρα ανάπτυξης	Υπό το καθεστώς εθνικών κανονισμών, οι διαχειριστές πρέπει να ενεργούν στη χώρα τους
Επιχειρηματικό μοντέλο	Μη συνεργατικό μοντέλο Συνεργατικό μοντέλο	100% εκχώρηση σε έναν ενδιαφερόμενο Βαθμός κατανομής και μοίρασμα δικτύου (παθητικό έναντι ενεργού)	Κάθε ενδιαφερόμενος αναλαμβάνει το πλήρες κόστος του σεναρίου ανάπτυξης που μελετήθηκε Με το μοίρασμα του δικτύου πετυχαίνοντας εξοικονομήσεις στα κόστη οι οποίες μπορούν να φτάσουν μέχρι και το 35% στο CAPEX και το OPEX (τόσο για την περίπτωση του παθητικού μοιράσματος όσο και του ενεργού)

Για το δεύτερο βήμα του μοντέλου κατανομής κόστους, απαιτείται ο κατάλογος των βασικών ενδιαφερομένων και το ΣΚΙ των διαφορετικών σεναρίων ανάπτυξης. Τα βασικά ενδιαφερόμενα μέρη είναι ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MNO) και ο Οδικός Διαχειριστής (RO). Ως αυτοκινητόδρομος λαμβάνεται το υπό μελέτη τμήμα να είναι το πέρασμα Brenner μεταξύ Αυστρίας και Ιταλίας, γίνεται η υπόθεση ότι τα MNO-A-1, MNO-A-2, RO-A 1 και RO-A-2 λειτουργούν στην αυστριακή πλευρά του περάσματος Brenner ενώ, MNO-I-1, MNO-I-2, RO-I-1 και RO I-2 λειτουργούν στην ιταλική πλευρά.

Το ΣΚΙ και οι διαφορετικές συνιστώσες κόστους των μελετημένων σεναρίων ανάπτυξης συνοψίζονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3 Κόστη για βασικά και πυκνά σεναρία

Σενάριο	Συσσωρευτικό ΣΚΙ	CAPEX (Ευρώ)	Συσσωρευτικό OPEX (Ευρώ)
Βασικό σενάριο V2I	280,350	169,370	58,750
Πυκνό σενάριο V2I	79,530	4,000	61,190

Υπερ-πυκνό σενάριο V2I	90,370	8,000	66,070
Βασικό σενάριο-α V2N	140,890	53,400	62,087
Βασικό σενάριο-β V2N	65,360	24,400	29,170
Πυκνό σενάριο-α V2N	854,350	179,100	521,180
Πυκνό σενάριο-β V2N	708,360	123,400	457,220

Όπως φαίνεται καθαρά στον Πίνακα 7.4, μελετήθηκαν επτά σενάρια, τρία από αυτά είναι σενάρια που βασίζονται σε συνδεσιμότητα V2I ενώ τα τέσσερα σενάρια που απομένουν βασίζονται σε συνδεσιμότητα V2N. Ως εκ τούτου, δεδομένου του οδηγού κατανομής κόστους «τύπος συνδεσιμότητα», τα τρία σενάρια V2I κατανέμονται σε ROs και τα τέσσερα V2N είναι ανατίθεται σε MNOs.

Όσον αφορά τα σενάρια που βασίζονται στη συνδεσιμότητα V2I, τρία σενάρια έχουν μελετηθεί στην Ενότητα 7.2, δηλαδή η βασική γραμμή Σενάριο V2I (2RSU), το οποίο αντιστοιχεί στην υπάρχουσα υποδομή στην ιταλική πλευρά των συνόρων (αναπτύχθηκε από RO-I-1); το πυκνό σενάριο V2I (4 RSUs) και το εξαιρετικά πυκνό σενάριο V2I (8 RSUs). Εάν ο αυστριακός RO (για παράδειγμα RO-A-1) θα ήθελε να καλύψει την αυστριακή πλευρά με την ίδια ανάπτυξη με το RO-I-1, στο πλαίσιο του μη συνεργατικού επιχειρηματικού μοντέλου, το κόστος της ανάπτυξης V2I θα είναι το ΣΚΙ του βασικού σεναρίου V2I. Ενώ, εάν οι RO-A-1 και RO-A-2 συμφωνήσουν να μοιραστούν το επενδυτικό κόστος, θα μπορούσαν να προκύψουν διαφορετική εξοικονόμηση επενδυτικού κόστους από τα διαφορετικά μοντέλα κοινής χρήσης (παθητική έναντι ενεργής κοινής χρήσης). Για το πυκνό σενάριο V2I, δύο επιπλέον RSU πρέπει να εγκατασταθούν. Αυτό μπορεί να γίνει από οποιοδήποτε RO από τις δύο πλευρές, εάν υιοθετηθεί το μη συνεργατικό μοντέλο, η ανάπτυξη αυτών των πρόσθετων RSU θα αυξήσει το ΣΚΙ, ωστόσο εάν υιοθετηθεί ένα από τα μοντέλα κοινής χρήσης, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση σχετικά με το πρόσθετο κόστος. Για το εξαιρετικά πυκνό σενάριο V2I, όπου θα εγκατασταθούν 6 επιπλέον RSU σε σύγκριση με το βασικό σενάριο, βρίσκεται παρόμοια ανάλυση. Το κατανεμημένο κόστος καθώς και η εξοικονόμηση κόστους που επιτυγχάνεται συνοψίζονται στον Πίνακα 7.5. Οι MNOs και στις δύο πλευρές θα μπορούσαν επίσης να πραγματοποιήσουν εξοικονόμηση κόστους με τους ROs εάν αποφασίσουν να παρέχουν επίσης τη συνδεσιμότητα μικρής εμβέλειας (V2I) και υιοθετήσουν την κοινή χρήση δικτύου με τους RO που λειτουργούν στον εξεταζόμενο αυτοκινητόδρομο.

Για την ανάπτυξη V2N, οι MNOs είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη του δικτύου, ωστόσο εάν οι RO θέλουν να παρέχουν τη CLC υπηρεσία που χρησιμοποιεί συνδεσιμότητα 5G, ένα τμήμα μπορεί να μισθωθεί από MNO βάσει είτε της συνεργασίας (κοινή φέτα σχεδιασμένη από MNO στις δύο πλευρές των συνόρων) ή τα επιχειρηματικά μοντέλα SaaS που προτείνονται στην Ενότητα 5.3, αλλά η κάλυψη δικτύου πρέπει να είναι πλήρης (μόνο σε πυκνό σενάριο V2N) και η τιμή της μίσθωσης ενός τεμαχίου είναι ακόμα άγνωστη. Αυτό θεωρείται ως έσοδο για τους MNOs, το οποίο μπορεί να τους βοηθήσει να φτάσουν στην απόδοση επένδυσης (Return On) Επένδυση) ταχύτερα. Όσον αφορά τη συνδεσιμότητα V2N, σύμφωνα με το σενάριο Baseline V2N, θεωρήθηκαν δύο υπάρχοντα eNBs, το ένα από αυτά βρίσκεται στην αυστριακή πλευρά και το άλλο στην ιταλική πλευρά, με το MEC στον πύργο (α) και το MEC στο DC (b). Ως εκ τούτου, το ΣΚΙ μπορεί να διαιρεθεί, με το 50% να εκχωρείται στο MNO-A-1 και το 50% στο MNO-I-1. Στα πυκνά Σενάριο V2N, θεωρήθηκε ότι έχει εγκατασταθεί ένα επιπλέον eNB στην ιταλική πλευρά, καθώς υπάρχει κενό κάλυψης δικτύου εκεί, άρα πυκνό σενάριο V2N-a με 3 eNB και MEC στον πύργο και πυκνό σενάριο V2N-b με 3 eNB και MEC στο DC. Στο μη συνεργατικό επιχειρηματικό μοντέλο, ένα από τα MNO-I θα επιβαρύνεται με το αυξητικό κόστος συγκρινόμενο με το πρώτο σενάριο. Τα μοντέλα κοινής χρήσης μπορούν να υιοθετηθούν από τους Ιταλικούς MNO για εξοικονόμηση κόστους επένδυσης.

7.6 Συνολική αποτίμηση

Για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των προτεινόμενων υπηρεσιών CCAM στο διασυνοριακό περιβάλλον, πρέπει να γίνουν υποθέσεις αναφορικά με τα έσοδα. Παρουσιάζονται τέσσερα μοντέλα εσόδων που αντανακλούν τέσσερις διαφορετικές παραδοχές, στοχεύοντας στην παροχή όσο το δυνατόν περισσότερων χρήσιμων πληροφοριών για τη βιωσιμότητα της υπόθεσης χρήσης χρησιμοποιώντας έσοδα μοντέλα για παρόχους συνδεσιμότητας CCAM στη διασυνοριακή περιοχή [14].

- **Μοντέλο εσόδων 1:** αυτό το μοντέλο χρησιμοποιεί την υπόθεση που λαμβάνεται από τη λευκή βίβλο 5GPPP, όπου υποθέτουν έσοδα 0,5 ευρώ ανά χρήστη για κάθε χρήση του τμήματος αυτοκινητόδρομου (το οποίο έχει μήκος 100 Χλμ.) Αυτό το τέλος συνδεσιμότητας μπορεί να εισπραχθεί μέσω των τελών διοδίων στον αυτοκινητόδρομο ή μέσω μιας άλλης προσέγγισης ανάλογα με το χειριστή που παρέχει τη συνδεσιμότητα. Για την περίπτωση εδώ διαιρείται αυτό το 0,5 ευρώ με 100 για να προκύψει τα έσοδα ανά χρήστη ανά χρήση ανά χιλιόμετρο.
- **Μοντέλο εσόδων 2:** αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι οι οδηγοί αυτοκινήτων που υποστηρίζουν συνδεσιμότητα V2X θα πληρώνουν ετησίως συνδρομή 250 ευρώ. Αυτή η πληρωμή γίνεται όταν αγοράζεται

καινούριο αυτοκίνητο, εφόσον υπάρχει εφάπαξ πληρωμή (για το αυτοκίνητο) και ετήσιο τέλος για να επωφεληθεί ο κάτοχος από τις υπηρεσίες V2X. Για να υπάρχει μια ενοποιημένη μέτρηση για σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων εσόδων, αντλούνται και εδώ έσοδα ανά χιλιόμετρο χρησιμοποιώντας τη μέση απόσταση που διανύεται στην Ευρώπη ανά έτος, 12000 χλμ.

- **Μοντέλο εσόδων 3:** δεδομένου ότι μελετάται το διασυνοριακό τμήμα (το πέρασμα Brenner) όπου απαιτείται επιπλέον επένδυση για να διασφαλιστεί η συνέχεια της υπηρεσίας CCAM, είναι λογικό να γίνει η υπόθεση ότι για να αποπληρωθεί αυτή η επιπλέον επένδυση πρέπει να χρεωθούν περισσότερα για αυτό το συγκεκριμένο τμήμα στα τέλη διοδίων. Επομένως, σε αυτό μοντέλο γίνεται η υπόθεση ότι τα έσοδα 0,5 ευρώ ανά χρήστη για κάθε χρήση του τμήματος αυτοκινητοδρόμου (των εσόδων μοντέλο 1) είναι για το τμήμα 4,5 Km του διασυνοριακού τμήματος.
- **Μοντέλο εσόδων 4:** σε αυτό το μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η τιμολόγηση βάσει κόστους. Ξεκινώντας από το κόστος του απαιτείται ανάπτυξη και υπολογίζεται ένα μέσο κόστος ανά χρήστη (ACPU) ανά χιλιόμετρο, προσθέτοντας έτσι περιθώριο κέρδους στα κορυφαία αποτελέσματα σε ένα Μέσο Έσοδο Ανά Χρήστη (ARPU) ανά Χλμ. Συνήθως το περιθωριακό κέρδος των σειρών της Telco από 10% έως 30%. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο εσόδων, λαμβάνεται η εγγύηση ότι θα φτάσουμε ακόμη και στο τέλος του η περίοδος του έργου (10 χρόνια σε αυτή τη μελέτη).

Εκτελείται η προσομοίωση για αυτά τα 4 μοντέλα εσόδων λαμβάνοντας υπόψη όλες τις διαφορετικές παραμέτρους και λαμβάνοντας υπόψη τα τρία σενάρια ρυθμού διείσδυσης στόλου που παρουσιάζονται στην ενότητα 7.3.2, προκειμένου να προκύψει το συσσωρευτικό ΣΚΙ ανά σενάριο ανάπτυξης (σενάριο χαμηλής διείσδυσης στόλου οδηγεί σε σενάριο χαμηλής ανάπτυξης και ούτω καθεξής ..) και επίσης να υπολογιστεί ο αριθμός των χρηστών που χρησιμοποιούν την υπηρεσία ώστε να αντλήσουν τα συσσωρευτικά έσοδα ανά μοντέλο και ανά σενάριο (διείσδυση) στόλου.

Για τα σενάρια ανάπτυξης έχουν υιοθετηθεί δύο εναλλακτικές λύσεις: η ανάπτυξη σε τμήμα πράσινου πεδίου (στον αυτοκινητόδρομο) ή σε ένα προεγκατεστημένο.

Για όλα τα σενάρια έγιναν οι παρακάτω υποθέσεις:

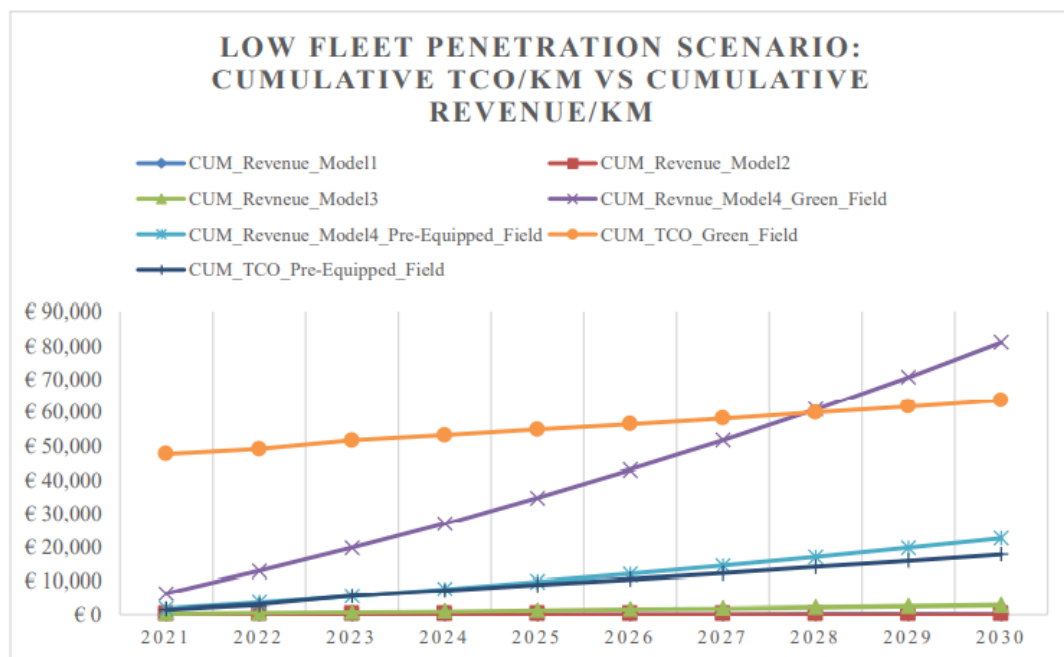
- Υπάρχει ένας τρόπος συλλογής εσόδων μόνο από τους συνδεδεμένους χρήστες (εκείνοι που χρησιμοποιούν τη συνδεσιμότητα V2X στο το τμήμα που μελετήθηκε) όχι όλοι οι χρήστες στο δρόμο.
- Για το μοντέλο εσόδων 4 υποθέτουμε περιθώριο κέρδους 10%.

- Δεδομένου ότι στο μοντέλο εσόδων 4 η ACPU χρησιμοποιείται για να αντλήσει τα συσσωρευτικά έσοδα, μπορεί να γίνει σύγκριση μόνο των αθροιστικών εσόδων (στο αθροιστικό ΣΚΙ) για την ανάπτυξη του πράσινου πεδίου και το ίδιο ισχύει για το προεγκατεστημένο πεδίο. Ωστόσο, τα άλλα μοντέλα εσόδων μπορούν να συγκριθούν με αυτά και των δύο ΣΚΙ ανάπτυξης.

Ξεκινώντας από το σενάριο χαμηλής διείσδυσης στόλου, έγινε η εξής υπόθεση:

- Το συσσωρευτικό ΣΚΙ ανά χιλιόμετρο που χρησιμοποιείται είναι ένα από τα σενάρια χαμηλής ανάπτυξης για το πράσινο και προεγκατεστημένο πεδίο όπως παρουσιάζεται στο 7.2.

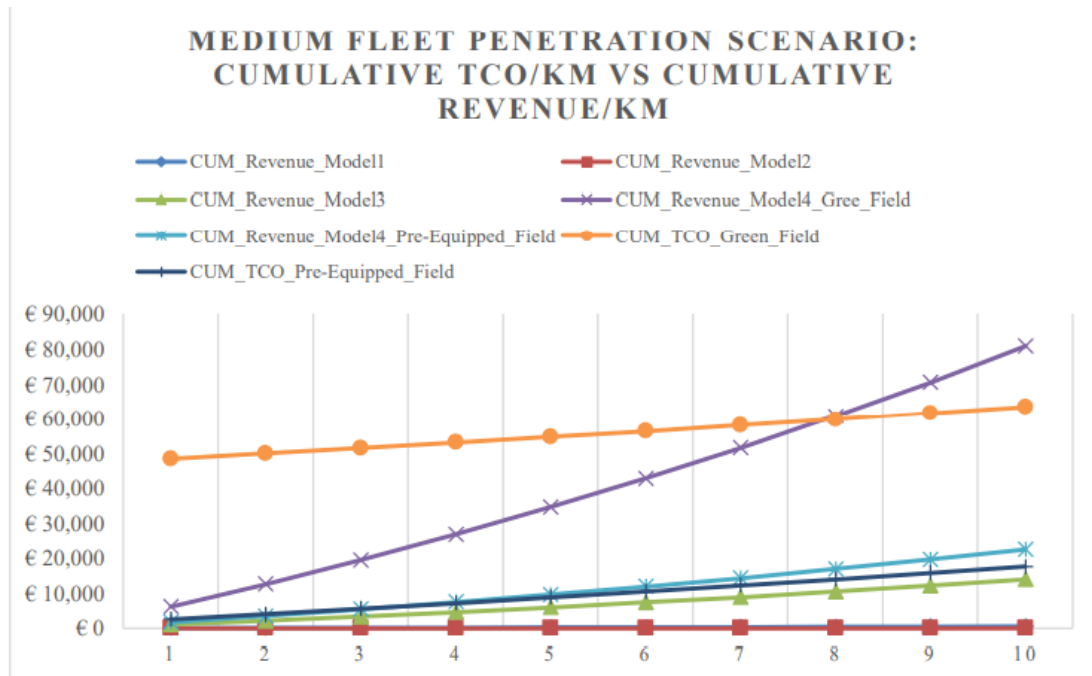
Το Σχήμα 7.18 παρουσιάζει τα αθροιστικά έσοδα ανά χιλιόμετρο όλων των μοντέλων εσόδων, καθώς και το συσσωρευτικό ΣΚΙ ανά χιλιόμετρο από τα δύο σενάρια χαμηλής ανάπτυξης (πράσινο/εξοπλισμένο με πεδίο). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι χρησιμοποιώντας τα μοντέλα εσόδων 1, 2 και 3 δεν προκύπτει κατάρρευση ακόμη και κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, ακόμη και στο εγγύς μέλλον, εάν ο ρυθμός διείσδυσης του στόλου παραμένει χαμηλός. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας το μοντέλο εισοδήματος 4 φτάνουμε στα ύψη γύρω στο τέταρτο έτος για την ανάπτυξη στο προεγκατεστημένο τμήμα και περίπου το έτος 8 για την ανάπτυξη στο πράσινο τμήμα [14].



Σχήμα 7.18 Συσσωρευτικό ΣΚΙ/km σε σχέση με το συσσωρευτικό έσοδο/km για χαμηλό βαθμό διείσδυσης

Για το σενάριο διείσδυσης μεσαίου στόλου, έγινε η υπόθεση:

- Το αθροιστικό ΣΚΙ ανά χιλιόμετρο που χρησιμοποιείται είναι αυτό από τα μεσαία σενάρια ανάπτυξης για το πράσινο και προεξοπλισμένο πεδίο όπως παρουσιάζεται στο 7.3.2.

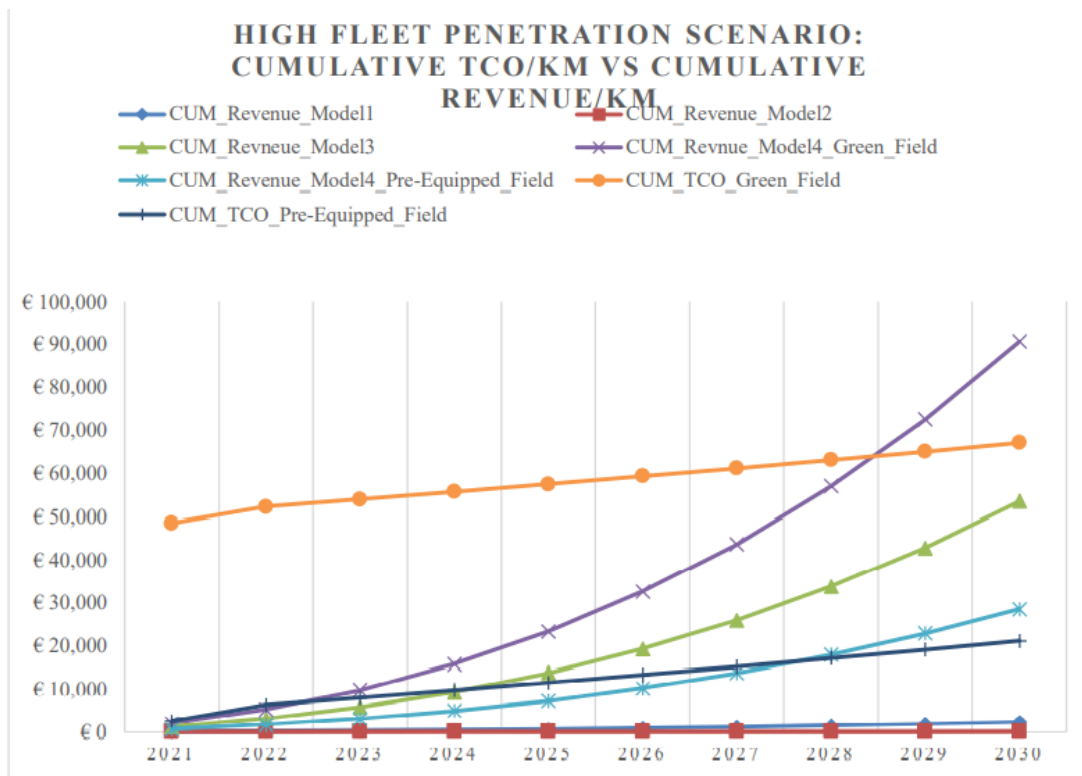


Σχήμα 7.19 Συσσωρευτικό ΣΚΙ/km σε σχέση με το συσσωρευτικό έσοδο/km για μέσο βαθμό διείσδυσης

Παρόμοια με το χαμηλό σενάριο, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.18, το οποίο παρουσιάζει τα σωρευτικά έσοδα ανά km όλων των μοντέλα εσόδων καθώς και το αθροιστικό ΣΚΙ ανά km των δύο μεσαίων σεναρίων ανάπτυξης (πράσινο/προ-εξοπλισμένο πεδίο). Φαίνεται ότι η χρήση των μοντέλων εσόδων 1, 2 και 3 δεν θα επέτρεπε την ισορροπία κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου στο εγγύς μέλλον, εάν ο ρυθμός διείσδυσης του στόλου παραμείνει μεσαίος, εκτός από το μοντέλο εσόδων 3 που θα μπορούσε να ισοφαρίσει περίπου το έτος 13 έως 14 (2033 έως 2034). Ωστόσο, χρησιμοποιώντας το μοντέλο εσόδων 4, το νεκρό σημείο προκύπτει περίπου τον πέμπτο χρόνο για το ανάπτυξη του προεγκατεστημένου τμήματος και περίπου το έτος 8 για την πράσινη ανάπτυξη του πράσινου τμήματος [14].

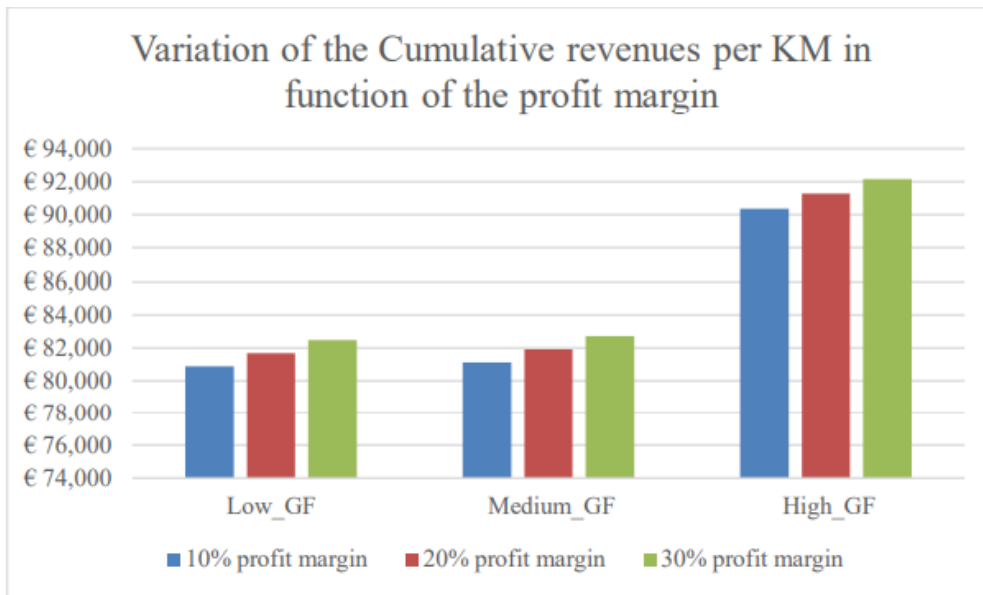
Για το σενάριο υψηλής διείσδυσης στόλου, έγινε η υπόθεση:

- Το σωρευτικό ΣΚΙ ανά χιλιόμετρο που χρησιμοποιείται είναι ένα από τα σενάρια υψηλής ανάπτυξης για το πράσινο και το προεγκατεστημένο πεδίο όπως παρουσιάζεται στο 7.3.2.



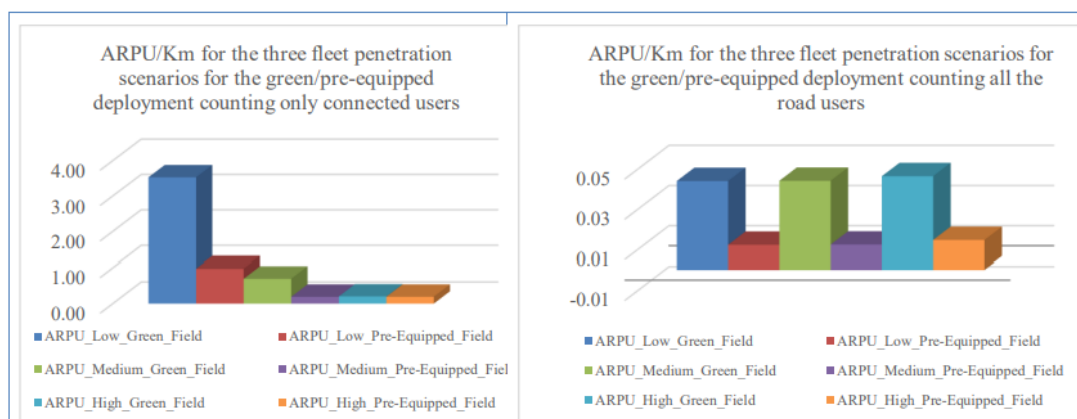
Σχήμα 7.20 Συσσωρευτικό ΣΚΙ/km σε σχέση με το συσσωρευτικό έσοδο/km για υψηλό βαθμό διείσδυσης

Το Σχήμα 7.20 δείχνει ότι ακόμη και με υψηλό ποσοστό διείσδυσης (που σημαίνει υψηλό αριθμό χρηστών) τα μοντέλα εσόδων 1 και 2 δεν μπορούν να αποπληρώσουν το κόστος επένδυσης. Όμως, για το μοντέλο εσόδων 3 και σε αντίθεση με τα χαμηλά και μεσαία σενάρια, μπορεί να επιτευχθεί το νεκρό σημείο περίπου κατά το τέταρτο έτος (2024) για την ανάπτυξη προ-εξοπλισμένου πεδίου και περίπου το έτος 2031/2032 για την ανάπτυξη πράσινου πεδίου. Ωστόσο, για το μοντέλο εσόδων 4, παρατηρεί κανείς ότι το νεκρό σημείο επιτυγχάνεται αργότερα σε σύγκριση με το χαμηλό και μεσαίο σενάριο, γύρω στο έτος 8 για την ανάπτυξη του προ-εξοπλισμένου πεδίου (σε σύγκριση με το έτος 4 στα δύο προηγούμενα σενάρια) και μεταξύ των ετών 8 και 9 για την ανάπτυξη του πράσινου πεδίου (σε σύγκριση μόνο με το έτος 8 στα προηγούμενα σενάρια). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το μοντέλο εσόδων 4 βασίζεται στο μέσο κόστος ανά χρήστη το οποίο είναι πολύ υψηλό στο σενάριο υψηλής ανάπτυξης σε σύγκριση με το χαμηλό και μεσαίες με χαμηλό περιθώριο κέρδους μόλις 10%. Με υψηλότερο περιθώριο κέρδους, μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερα έσοδα ως φαίνεται στο Σχήμα 7.21 [14].



Σχήμα 7.21 Συσσωρευτικά έσοδα/km σε συνάρτηση του περιθωρίου κέρδους

Αν υποθεθεί ότι τα έσοδα ανά χρήστη χρεώνονται ως μέρος των τελών διοδίων, είναι δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ των χρηστών δρόμων που χρησιμοποιούν τη συνδεσιμότητα V2X από αυτούς που δεν τη χρησιμοποιούν. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο για να εξαχθεί το ARPU για τα τρία σενάρια διείσδυσης, χαμηλό, μεσαίο και υψηλό (που σημαίνει χαμηλή, μεσαία και υψηλή ανάπτυξη υποδομής) μετρώντας μόνο τους συνδεδεμένους χρήστες και, στη συνέχεια, μετρώντας όλους τους χρήστες του δρόμου (χρήστες του υπό μελέτη τμήματος του αυτοκινητοδρόμου). Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.22 (α) και (β).



Σχήμα 7.22 ARPU για τους τρεις βαθμούς διείσδυσης

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα δύο Σχήματα 7.22 (α) και (β) έχουν διαφορετικό άξονα Υ στο ARPU δεδομένου ότι αποτελεί την περίπτωση που

λαμβάνονται υπόψη όλοι οι χρήστες του τμήματος του αυτοκινητοδρόμου κατά την οποία είναι πολύ περισσότεροι (της τάξης των 4 λεπτών/ευρώ για το πράσινο αρχείο καταχώρησης) σε σύγκριση με την περίπτωση όπου υπολογίζονται μόνο οι συνδεδεμένοι χρήστες (3,5 ευρώ για χαμηλό ποσοστό διείσδυσης σε ένα σενάριο ανάπτυξης πράσινου πεδίου).

Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης μια σύγκριση μεταξύ του ARPU/km για ένα πράσινο πεδίο έναντι της ανάπτυξης προ-εξοπλισμένου πεδίου, τα οποία καταδεικνύουν πόσο χαμηλό είναι το ARPU (το οποίο βασίζεται στο ACPU) που πρέπει να συλλεχθεί προκειμένου να εξοφληθεί το κόστος εγκατάστασης σε ένα προ-εξοπλισμένο (καφέ) πεδίο σε σύγκριση με ένα πράσινο πεδίο.

Προκειμένου να υπάρξει μια σαφή εικόνα πώς η καταμέτρηση όλων των χρηστών του τμήματος αυτοκινητοδρόμου μπορεί να μειώσει τα τέλη συνδεσιμότητας που θα χρεωθούν στους χρήστες του δρόμου, αναλύεται το παράδειγμα του σεναρίου χαμηλής διείσδυσης: για το πράσινο πεδίο μόνο για τους μετρημένους συνδεδεμένους χρήστες με χρέωση (που ζητείται ανά χρήστη) για τα 4,5 χλμ της κάρτας Brenner είναι $4,5 \times 3,5 = 15,75$ ευρώ έναντι μόνο $4,5 \times 0,0438 = 0,197$ ευρώ (19 λεπτά του ευρώ) αν ληφθούν υπόψη όλοι τους χρήστες του τμήματος του αυτοκινητοδρόμου. Για την υψηλή διείσδυση του στόλου για ανάπτυξη προ-εξοπλισμένου πεδίου, πρέπει να ζητηθούν $4,5 \times 0,19 = 0,855$ ευρώ (85 λεπτά ευρώ) όταν λαμβάνεται υπόψη μόνο ο συνδεδεμένος χρήστης έναντι μόνο $4,5 \times 0,0145 = 0,0652$ ευρώ (6,5 λεπτά του ευρώ) όταν υπολογίζονται όλοι οι χρήστες. Ως εκ τούτου, φαίνεται ρεαλιστικό/εφικτό να ενσωματωθεί το τέλος συνδεσιμότητας στα τέλη διοδίων ενώ διανέμεται μεταξύ όλων των χρηστών αντί να το χρεώνουν απευθείας στους συνδεδεμένους χρήστες.

Τα κυριότερα συμπεράσματα από αυτήν τη μελέτη είναι:

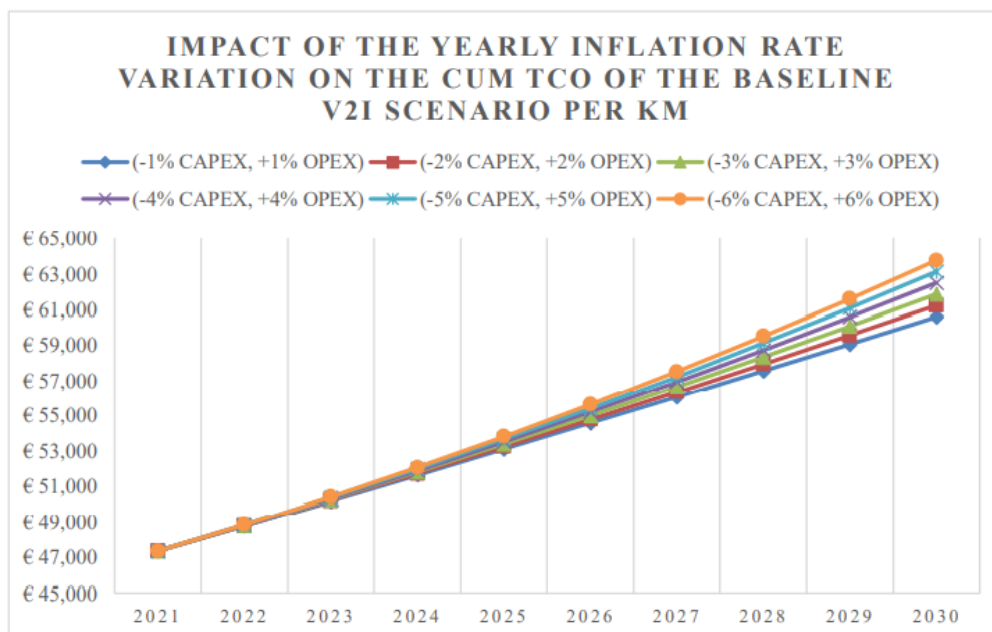
- ❖ Για το χαμηλό και το μεσαίο σενάριο διείσδυσης, μόνο το μοντέλο εσόδων 4 (αυτό που βασίζεται στο ACPU) αποτελεί εγγύηση για απόσβεση πριν από το τέλος της διάρκειας ζωής του έργου.
- ❖ Για το υψηλό σενάριο διείσδυσης και χρησιμοποιώντας το μοντέλο εσόδων 3 μπορεί να επιτευχθεί το νεκρό σημείο περίπου το τέταρτο έτος (2024) για την εξοπλισμένη ανάπτυξη του προεξοπλισμένου πεδίου και περίπου το έτος 2031/2032 για την ανάπτυξη πράσινου πεδίου (μετά τη διάρκεια ζωής του έργου), αλλά τα μοντέλα 1 και 2 είναι πάντα μη βιώσιμα ακόμη και με υψηλό ρυθμό διείσδυσης. Ωστόσο, η χρήση του μοντέλου 4 εγγυάται ότι θα φτάσει ακόμη και στο τέλος του έργου για τους δύο τύπους της ανάπτυξης.
- ❖ Η χρήση υψηλού περιθωρίου κέρδους στο μοντέλο εσόδων 4 συμβάλλει στη συλλογή περισσότερων εσόδων αλλά στα έξοδα του τελικού χρήστη, καθώς θα χρεωθεί υψηλότερο ARPU.

- ❖ Φαίνεται ρεαλιστικό/εφικτό να ενσωματωθεί το τέλος συνδεσιμότητας στα τέλη διοδίων ενώ αυτό διανέμεται σε όλους τους χρήστες αντί να το χρεώνουν απευθείας στους συνδεδεμένους χρήστες.

7.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας αναπτύσσεται για να εκτιμηθεί ο βαθμός ακεραιότητας που συνδέει τις εκροές του μοντέλου με τις εισόδους. Σε αυτή τη μελέτη προστέθηκε μια νέα υπόθεση στο μοντέλο κόστους που είναι το ποσοστό πληθωρισμού ανά έτος για CAPEX και OPEX (-3% και +3% αντίστοιχα).

Καθώς αυτή η υπόθεση λαμβάνεται από διαφορετικά έργα 5GPPP [16] και από διάφορα έγγραφα της 5GPPP, μελετήθηκε ο αντίκτυπος της μεταβολής αυτού του ετήσιου ποσοστού πληθωρισμού (από +/- 1% σε +/- 6%) στην παραγωγή του μοντέλου κόστους, δηλαδή το συσσωρευτικό ΣΚΙ ανά χιλιόμετρο [14].



Σχήμα 7.23 Επίδραση του ρυθμού πληθωρισμού στο συσσωρευτικό ΣΚΙ

Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 7.23 δείχνουν ότι όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός πληθωρισμού τόσο υψηλότερος είναι ο σωρευτικός ΣΚΙ που προκύπτει ανά km. Σε σχέση με τις υπόλοιπες υποθέσεις, η υπόθεση με ποσοστό πληθωρισμού +/- 3% οδηγεί στο μέσο συσσωρευτικό ΣΚΙ ανά χιλιόμετρο, το οποίο και πάλι αποδεικνύει ότι είναι μια ασφαλής υπόθεση για συνεργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

Η κύρια συνεισφορά της εργασίας υπήρξε η ολιστική αντιμετώπιση και η μελέτη ανάπτυξης δικτύων πέμπτης γενιάς λαμβάνοντας υπόψη τόσο το επίπεδο τεχνολογίας (κυψελικές επικοινωνίες οχημάτων, δίκτυα πέμπτης γενιάς) όσο και το επιχειρηματικό (επενδυτικό επίπεδο). Σε αυτό συνετέλεσαν η ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς καθώς και τα νέα μοντέλα συνεργασίας και οι μηχανισμοί ανάπτυξης των δικτύων που πρόσφατα (μέσα στο 2021) προτάθηκαν από οργανισμούς όπως ο 5G AA.

Τα κυριότερα άμεσα συμπεράσματα (πέραν αυτών που αναφέρονται σε κάθε κεφάλαιο ξεχωριστά) που προκύπτουν από αυτή την εργασία είναι τα ακόλουθα:

Πρώτον, όσον αφορά τις αναπτύξεις V2I, αναλύθηκε ο αντίκτυπος ενός χαμηλού, μεσαίου και υψηλού ποσοστού διείσδυσης στην απαιτούμενη υποδομή του δρόμο. Τα (αυξανόμενα) ποσοστά διείσδυσης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό μιας σταδιακής προσέγγισης ανάπτυξης, στα οποία εξετάζονται τρία σενάρια ανάπτυξης, με αντίστοιχα 0,5, 1 και 2 οδικές μονάδες (RSU) ανά χιλιόμετρο. Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ταυτόχρονων συνδεδεμένων αυτοκινήτων, τόσο υψηλότερο είναι το ΣΚΙ που απαιτείται για ανάπτυξη ώστε να πληρούνται καθορισμένες απαιτήσεις. Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανάπτυξη για πράσινο πεδίο, όπου δεν υπάρχουν ίνες ή υπάρχουν εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τρεις φορές πιο δαπανηρή από την ανάπτυξη προ-εξοπλισμένου πεδίου.

Δεύτερον, όσον αφορά τις αναπτύξεις V2N, το μοντέλο κόστους έτρεξε για σενάρια ανάπτυξης στα οποία (1) το MEC βασίζεται στον πύργο και (2) το MEC βασίζεται στο κέντρο δεδομένων, τόσο για ένα βασικό όσο και για ένα πυκνό σενάριο ανάπτυξης. Η τοποθέτηση MEC στο κέντρο δεδομένων βρέθηκε να είναι πιο αποδοτική ως προς το κόστος σε σχέση με τον σταθμό βάσης, αν και η διαφορά βρέθηκε να είναι λιγότερο έντονη στο σενάριο πυκνής ανάπτυξης: ενώ η διαφορά CAPEX είναι κυρίαρχη στο βασικό σενάριο, ο κυρίαρχος παράγοντας κόστους στο πυκνό σενάριο ήταν οι λειτουργικές δαπάνες και τα γενικά έξοδα, παρά η επένδυση σε εξοπλισμό MEC.

Τρίτον, υπό το πρίσμα της ανάπτυξης V2N και της μοντελοποίησης κόστους, έγιναν περισσότερες διαφορετικές διαμορφώσεις ομαδοποίησης MEC όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.4. Διαφορετικές τοπολογίες, όπως είναι το μοντέλο τοπολογίας αστέρας με τον κόμβο MEC να φιλοξενείται ενδιάμεσα στα e/gNB και οι τοποθεσίες συγκέντρωσης (M11), το μοντέλο τοπολογίας αστέρι με το MEC να φιλοξενείται στην τοποθεσία συγκέντρωσης (M12) και τρίτον, μια τοπολογία κατεστραμμένου αστεριού με MEC που να φιλοξενείται δίπλα σε έναν από τους πύργους μέσα στο σύμπλεγμα MEC (M2).

Διαπιστώθηκε ότι όλα τα μοντέλα ομαδοποίησης MEC είναι λιγότερο δαπανηρά από τη γενική τοπολογία χωρίς ομαδοποίηση, όπως συζητείται στην Ενότητα 7.4.1. Διάφοροι παράγοντες καθορίζουν το συνολικό κόστος εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της (1) παρουσίας της ίνας, (2) της διαθεσιμότητας των τοποθεσιών και (3) της παρουσίας άμεσης σύνδεσης μεταξύ των τοποθεσιών συγκέντρωσης.

Τέταρτον, για το χειρότερο σενάριο, η τοπολογία M2 αποτελεί το πιο οικονομικά αποδοτικό μοντέλο μέχρι 17 e/gNBs ανά συστάδα MEC. Για περισσότερους πύργους ανά σύμπλεγμα, το συνολικό μήκος των απαιτούμενων ινών κάνει το μοντέλο περισσότερο ακριβό από το μοντέλο M11. Για το καλύτερο σενάριο, το μοντέλο M12 είναι το πιο οικονομικό από τα τρία μοντέλα.

Πέραν των συμπερασμάτων που προέκυψαν άμεσα από την ανάλυση, έμμεσα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν όπως:

Πέμπτο, η πιθανή συγχρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή είναι ένα από τα βασικά ζητούμενα ανάπτυξης υπηρεσιών 5G V2X— αλλά η συγχρηματοδότηση από μόνη της δεν θα μπορούσε να είναι επαρκής για τη διασφάλιση της οικονομικής επιτυχίας ανάπτυξης V2I χωρίς την εμφάνιση καινοτόμων, βιώσιμων και καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων, ιδιαίτερα στην περίπτωση χαμηλού βαθμού διείσδυσης.

Έκτο, η ανάπτυξη V2N μπορεί να είναι κερδοφόρα ακόμη και για τα πιο συντηρητικά σενάρια 5G V2X λόγω των δυνατοτήτων τους να προσεγγισθούν συνδρομητές 5G που δεν είναι V2X.

8.1 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση αξίζει να συνεχιστεί δεδομένου του ενδιαφέροντος τόσο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (CEF2) όσο και σε Ελληνικό (πρόγραμμα “Αυτοκινητόδρομοι 5G”) και πιο συγκεκριμένα, προτείνεται:

- Οι μετρήσεις δικτύου 4G και 5G NSA σε αυτοκινητοδρόμους (διαθέσιμες για όποιον τις χρειαστεί) μπορούν να προσδιορίσουν το Cell size και κατ’ επέκταση να βελτιώσουν (ή διορθώσουν) το μοντέλο για τις υπηρεσίες V2I.
- Να εξεταστεί κατά πόσο το 5G NSA (που περιλαμβάνει και το 4G) μπορεί να βελτιώσει κάποια από τα μεγέθη και τις απαιτήσεις (κάποιες πρώτες μετρήσεις δείχνουν ότι δε βελτιώνεται ούτε η αξιοπιστία ούτε ο χρόνος διακοπής σε σχέση με το 4G). Διαφορετικά, οι υπηρεσίες με αυξημένες απαιτήσεις θα ικανοποιηθούν μόνο με την έλευση του 5G SA.
- Να προσδιοριστούν ακριβέστερα τα μοντέλα συνεργασίας και των μηχανισμών ανάπτυξης των MNOs που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 4 και 5 και να εισαχθούν στο μοντέλο του Κεφαλαίου 7 (στην παρούσα

εργασία θα λέγαμε ότι έθεσαν το πλαίσιο και εφαρμόστηκε σε πρώτο επίπεδο ένας μηχανισμός κοινής δράσης μεταξύ MNOs και ROs στο ίδιο κεφάλαιο, αλλά σίγουρα μπορούν να καθορισθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για να συμβεί αυτό, σίγουρα απαιτείται μια καλή συνεργασία με τους MNOs καθότι φαίνεται ότι η ανάπτυξη δικτύων 5G εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από τα επιχειρηματικά μοντέλα τους

- Να εξετασθεί ο ρόλος των MEC σε σχέση με τις υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρουν. Φαίνεται ότι δεν είναι ακόμα άμεσα εμφανείς ποιες υπηρεσίες θα εξυπηρετήσουν πρακτικά. Μετά από αυτό, μπορεί να δοκιμασθεί ένα άλλο μοντέλο τοποθέτησης τους όπως έγινε στα υποκεφάλαια 7.4 και 7.5.
- Η ανωτέρω μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοσθεί για τον Ελλαδικό χώρο (πχ. αυτοκινητόδρομος Αθήνα – Θεσσαλονίκη).

Βιβλιογραφία

- [1] European Commission, "Press release - Road Safety: Encouraging results in 2016 call for continued efforts to save lives on EU roads," 2017.
- [2] 5GAA white paper; An assessment of LTE-V2X (PC5) and 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU; 5-12-2017 .
- [3] Society of Automotive Engineers, [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards>
- [4] FCC, "REPORT AND ORDER, FCC-20-164: In the Matter of Use of the 5.850-5.925 GHz Band", Nov 20, 2020. [Online]. Available: <https://ecfsapi.fcc.gov/file/11202021603352/FCC-20-164A1.pdf>
- [5] 5G Americas, "Comments on C-V2X in the 5.9 GHz Band" 2 Jun. 2021. [Online]. Available: https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2021/06/5.9-GHz-Comments-of-5G-Americas_final-6.2.pdf
- [6] ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions.
- [7] University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), "Smart Intersection project" [Online]. Available: <https://news.engin.umich.edu/2021/01/9-95m-for-smart-intersections-across-ann-arbor/>
- [8] ETSI EN 302 637-2 V1.3.2 (2014-11): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.
- [9]. ETSI EN 302 637-3 V1.1.1 (2014-09): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service.
- [10] 5G Americas, "Vehicular Connectivity: C-V2X & 5G | September 2021. <https://www.5gamericas.org/vehicular-connectivity-c-v2x-and-5g/>
- [11] ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); LTE-V2X Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", Jan 2020, [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303600_303699/303613/01.01.01_60/en_303613v010101p.pdf
- [12] 5G AA, "Deployment band configuration for C-V2X at 5.9 GHz in Europe, 2021.
- [13] CONCORDA project. [Online]. Available: <https://concordaproject.eu/> <https://www.rijkswaterstaat.nl/en/mobility/projects/concorda>, <https://ertico.com/concorda/>
- [14] 5G CARMEN (5G for Connected and Automated Road Mobility in European Union -D6.4) . <https://5gcarmen.eu>
- [15] FIFTH GENERATION CROSS-BORDER CONTROL (5GCroCo) project, [Online]. Available: <https://5gcroco.eu/>
- [16] 5G-MOBIX project, [Online]. Available: <https://www.5g-mobix.com/>

- [17] 5th Generation connected and automated mobility cross-border EU trials, [Online]. Available: <https://www.5groutes.eu/>
- [18] 5G CARMEN (5G for Connected and Automated Road Mobility in European Union -D6.2) <https://5gcarmen.eu>
- [19] Smart Road project, [Online]. Available: <https://www.lestradedellinformazione.it/rubriche/le-strade-dellamobilita/smart-road-anas-porta-litalia-verso-la-mobilita-del-futuro>
- [20] 5GAA, "V2X Functional and Performance Test Report; Test Procedures and Results", 11 Apr. 2019, [Online]. Available: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/06/5GAA_P-190033_V2X-Functional-and-PerformanceTest-Report_final-1.pdf
- [21] ConVeX (Connected Vehicle (V2X) of Tomorrow), "Final Report on Field Test and Evaluation", 16 Mar. 2020, [Online]. Available: https://convex-project.de/onewebmedia/D7.1_Final_Report_Field.pdf
- [22] 5GAA, "List of C-V2X Devices", 5G Automotive Association e.V. Working Group 5 23 Oct 2020, [Online]. Available: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/11/5GAA_List-of-C-V2X-Devices.pdf
- [23] 3GPP, "Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services", 17 Dec. 2020, [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/23_series/23.287/23287-g50.zip
- [24] 3GPP, "System architecture for the 5G System (5GS)", 24 Jun. 2021, [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/23_series/23.501/23501-g90.zip
- [25] GSM Association, "NG.127 E2E Network Slicing Architecture v1.0", 3 Jun. 2021, [Online]. Available: <https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/NG.127-v1.0-2.pdf>
- [26] 5GAA, "Cooperation Models enabling deployment and use of 5G infrastructures for Connected and Automated Mobility (CAM) in Europe", 2021. [Online] Available https://5gaa.org/wp-content/uploads/2021/03/5GAA_White-Paper_5G-Coop-Models.pdf
- [27] 5GAA, "C-V2X Use Cases Volume II: Examples and Service Level Requirements", October 2020, [Online] Available: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/10/5GAA_White-Paper_C-V2X-Use-Cases-Volume-II.pdf
- [28] 5GAA, "MNO Network Expansion Mechanisms to Fulfil Connected Vehicle Requirements", October 2020. [Online] Available https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/06/5GAA_B-200044_WI-NetExp-White-Paper.pdf
- [29] US DOT, "Implementing Cellular V2X Technology to Improve Safety and ITS Management", [Online] Available: <https://ops.fhwa.dot.gov/fastact/atcmttd/2019/awards/factsheet/pdf/hawaii.pdf>
- [30] Ericsson, "Towards Zero: creating safer roads with cellular-V2X in Australia " Jan 2020, [Online] Available: https://www.ericsson.com/4900e3/assets/local/cases/customer-cases/2020/towards_zero_safer_roads-withcellular-v2x.pdf

- [31] 3GPP, “Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces”, 3GPP TR 38.801 Release 14, 03 Apr. 2017, [Online] Available: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.801/38801-e00.zip
- [32] 3GPP, “Study of separation of NR Control Plane (CP) and User Plane (UP) for split option 2”, 3GPP TR 38.806 Release 15, 18 Jan. 2018, [Online] Available: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.806/38806-f00.zip
- [33] 3GPP, “Study on Central Unit (CU) - Distributed Unit (DU) lower layer split for NR”, 3GPP TR 38.816 Release 15, 18 Jan. 2018, [Online] Available: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.816/38816-f00.zip
- [34] Small Cell Forum (SCF), [Online] Available: <https://www.smallcellforum.org/latest-documents/> [Accessed 30 Jun. 2021]
- [35] O-RAN specifications: [Online] Available: <https://www.o-ran.org/specifications>
- [36] A. Laya, K. Manolakis, G. Vélez, M. Fallgren, S. He, J. Favaro, P. Syros, M. Paolino, B. Sayadi, B. Altman, M. Gharba, M. Dillinger, L. Gomes Baltar, J. F. Monserrat, “Business Feasibility Study for 5G V2X Deployment”. 5G PPP Automotive Working Group, Version 1, February 2019.
- [37] 5GAA, “Edge computing for advanced automotive communications” Dec. 2017, [Online] Available: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/5GAA_T-170219-whitepaper-EdgeComputing_5GAA.pdf
- [38] ETSI, “Harmonizing standards for edge computing - A synergized architecture leveraging ETSI ISG MEC and 3GPP specifications”, July 2020, [Online] Available: https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/ETSI_wp36_Harmonizing-standards-for-edge-computing.pdf
- [39] ITS America, “ The Future of V2X: 30 MHz Application Map “ 27 Jan 2021,[Online] Available: <https://itsa.org/wpcontent/uploads/2021/01/ITS-America-30-MHz-Application-Map-1-27-21.pdf>
- [40] 5GAA, “Examples and Service Level Requirements “, 20 Oct. 2020, [Online] Available: https://5gaa.org/wpcontent/uploads/2020/10/5GAA_White-Paper_C-V2X-Use-Cases-Volume-II.pdf
- [41] 3GPP, “NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone”, 3GPP TR 38.101-1 Release 16, 12 Apr. 2021, [Online] Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1/38101-1-g70.zip
- [42] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception”, 3GPP TR 36.101 Release 15, 8 Apr. 2021, [Online] Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.101/36101-fe0.zip [Accessed 30 Jun. 2021]
- [43] 5GAA, “A visionary roadmap for advanced driving use cases, connectivity technologies, and radio spectrum needs” 09 Sep. 2020, [Online] Available: <https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/09/A-VisionaryRoadmap-for-Advanced-Driving-Use-Cases-Connectivity-Technologies-and-Radio-Spectrum-Needs.pdf> [Accessed 30 Jun. 2021]
- [44] D2.1 Vehicle fleet penetrations and ODD coverage of NRA relevant automation functions up to 2040 [Online],” <https://www.mantra-research.eu/wp-content/uploads/2020/03/MANTRA-Deliverable-D2:11:0.pdf>

- [45] 5G-NORMA, “Deliverable D2.3 Evaluation architecture design and socio-economic analysis - final report”, Dec. 2017.
- [46] EETAsia, “BEVs, Connected Cars & Software?”, February 2021. URL: <https://tinyurl.com/3ptknrrt>
- [47] Thinkmate, “Gigabyte h242-z10,” [Online]. Available: <https://www.thinkmate.com/system/gigabyte-h242-z10>
- [48] T. Rebbeck, J. Stewart, H.-A. Lacour, A. Killeen, “Socio-Economic Benefits of Cellular V2X”, Final report for 5GAA, Ref. 2011027-492, Dec. 2017
- [48] 3GPP, “System architecture milestone of 5G Phase 1 is achieved”, 21 Dec. 2017, [Online] Available: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1930-sys_architecture
- [49] European Commission, “Commission implementing decision (EU) 2019/1345, amending Decision 2006/771/EC updating harmonised technical conditions in the area of radio spectrum use for short-range devices”, August 2019, available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D1345&from=EN>.
- [50] European Commission, “Directive 2014/53/EU, Radio Equipment Directive,” April 2014, available at https://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-engineering/red-directive_en.
- [51] ETSI, “EN 302 571: Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU,” February 2017, available at https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf.

