



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην
Επιστήμη & Τεχνολογία της Πληροφορικής και των
Υπολογιστών**
Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων Συστημάτων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

***Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυψελών για την Ανάπτυξη
Εφαρμογών του 5G***

Αγγελική Γλάστρα

A.M.: mcse20022

Εισηγητής: Δρ. Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, 2022

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυψελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

Αγγελική Γλάστρα

A.M.: mcse20022

Εισηγητής: Δρ. Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή: Δρ. Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής

Δρ. Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής

Δρ. Νικόλαος Μυριδάκης, Καθηγητής

Ημερομηνία εξέτασης: 21.10.2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERS
DEPARTMENT OF COMPUTER ENGINEERING

**Master of Science in
Science and Technology of Informatics and Computers
Option: Communication Networks & Distributed Systems**

Master Thesis

***Small Cell-based Use Cases for the Development
of 5G Applications***

**Angeliki Glastra
Registry Number: mcse20022**

Supervisor: Dr. Ioannis Chochliouros

ATHENS, 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΓΛΑΣΤΡΑ του ΣΩΤΗΡΙΟΥ, με αριθμό μητρώου MCSE20022 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι την απόκτηση του πτυχίου μου και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση των επιβλεπόντων καθηγητών.

The undersigned ANGELIKI SOTIRIOS GLASTRA with registry number MCSE20022 student of post graduate program SCIENCE & TECHNOLOGY OF COMPUTING AND COMPUTERS of COMPUTER ENGINEERING Dept. of ENGINEERING Faculty of University West Attica, I declare that:

“I am the author of this master thesis and that all the help I had for its preparation is fully recognized and refers to the work. Also, any sources from which I used data, ideas or words, whether exact or paraphrased, are listed in their entirety, with full reference to the authors, the publisher or the magazine, including the sources that may have been used by the internet. I also certify that this work has been written exclusively by me and is a product of intellectual property of both me and the foundation.

Violation of my academic responsibility is an essential reason for the revocation of my degree”. I wish the denial of access to the full text of my work until my degree is obtained and upon my request to the library and approval of the supervising professors.

**Όνοματεπώνυμο & Υπογραφή Υποψηφίου
(Surname and first name of the candidate):**

**ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΓΛΑΣΤΡΑ
(ANGELIKI GLASTRA)**

Πνευματική ιδιοκτησία © 2022 Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Όλα τα δικαιώματα διατηρούνται
Copyright © 2022 University of West Attica
All rights reserved

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Χοχλιούρο Ιωάννη, τόσο για την ανάληψη της επίβλεψης της εργασίας, όσο και για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του στο έργο μου.

Ευχαριστώ το σύνολο των καθηγητών για τη νέα και ωφέλιμη γνώση που μου παρείχαν, καθώς και την αμέριστη συνεργασία τους σε όλη τη διάρκεια του προγράμματος εκπαίδευσης.

Ευχαριστώ θερμά και την οικογένειά μου, για την υποστήριξη και για την υπομονή της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το 5G είναι η επόμενη γενιά κινητής ευρυζωνικότητας που θα αντικαταστήσει τις συνδέσεις 4G/LTE και η οποία θα παρέχει ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες στο Διαδίκτυο. Μεταξύ άλλων καινοτομιών, το 5G ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση επικοινωνίας των συσκευών αυξάνοντας δραματικά την ταχύτητα απόκρισης και εκτοξεύοντας την εμπειρία χρήσης του δικτύου.

Το 5G θα επιφέρει πολλές αλλαγές στη καθημερινή μας ζωή, στην εμπειρία των χρηστών και στις συνδέσεις δεδομένων εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας. Μερικοί από τους τομείς δραστηριότητας που θα υποστούν καταλυτικές μεταβολές είναι τα αυτόνομα οχήματα, οι έξυπνες πόλεις, η δημόσια ασφάλεια, η πολιτική προστασία, τα έξυπνα σπίτια, η τηλεϊατρική, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και ο χειρισμός μηχανημάτων εξ αποστάσεως.

Η επίτευξη όλων των ανωτέρω θέτει την απαίτηση για συστήματα μεγαλύτερης χωρητικότητας, που εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες. Ο πρώτος αφορά στην αύξηση της φασματικής απόδοσης, ο δεύτερος σχετίζεται με την αύξηση του διαθέσιμου φάσματος και ο τρίτος είναι η αύξηση του πλήθους των σταθμών βάσης όλων των ιεραρχικών επιπέδων (macro, micro, pico, femto), γεγονός που προσφέρει μία πολύ πυκνή χωρική επανάχρηση των καναλιών συχνοτήτων. Αυτός ο τελευταίος παράγοντας μεταβάλλει τη βασική σχεδιαστική προσέγγιση των ραδιοδικτύων και οδηγεί σε μία νέα διάσταση, εκείνη των «ετερογενών δικτύων». Παραδοσιακά τα ραδιοδίκτυα σχεδιάζονταν και εξαπλώνονταν με βάση ένα στρώμα, μία τοπολογία κόμβων ραδιοπρόσβασης, γνωστές ως μακρο-κυψέλες. Τα δίκτυα φωνής και δεδομένων 2G, 3G και 4G έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί με βάση την τοπολογία μακρο-κυψελών.

Η ενσωμάτωση των μικρότερης εμβέλειας μικρών κυψελών – οι οποίες συνιστούν κόμβους ραδιοεπικοινωνίας χαμηλής ισχύος – στις περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη για καλύτερη κάλυψη των χρηστών, συνιστά μία πάγια πρακτική της τοπολογικής εξέλιξης των σύγχρονων ραδιοδικτύων, προς το 5G και πέρα από αυτό. Η ταυτόχρονη και αρμονικά συνεργατική χρήση και των δύο τύπων κυψελών (μακρο-κυψέλες και μικρές κυψέλες) καθίσταται απαραίτητη, ιδίως για περιοχές όπου δεν υπάρχει επαρκής δικτυακή κάλυψη. Ο παραπάνω συνδυασμός είναι σημαντικός για την ενίσχυση του σήματος, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση μικρών κυψελών είναι ζωτικής σημασίας για την ελάφρυνση του τηλεπικοινωνιακού φόρτου σε σημεία υψηλής ζήτησης καθώς και για την υποστήριξη πολλών νέων εφαρμογών που θα προσφέρονται σε ένα τεράστιο πλήθος μικρών συσκευών και αισθητήρων, συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο.

Στην τεχνολογία 5G, οι μικρές κυψέλες παρέχουν χωρητικότητα σε (φορητές) συσκευές καθώς και συνδεσιμότητα σε αισθητήρες του Διαδικτύου των Πραγμάτων, επεκτείνουν τη δικτυακή κάλυψη, μειώνουν τη λανθάνουσα καθυστέρηση, εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες και διασφαλίζουν υψηλή απόδοση των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Υπό την θεώρηση των ανωτέρω, η παρούσα εργασία μελετά παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ανάπτυξη δικτύων μικρών κυψελών καθώς και τις απαιτούμενες υποστηρικτικές τεχνολογίες για τα δίκτυα 5G. Επίσης προτείνει και μελετά σενάρια και περιπτώσεις χρήσης των μικρών κυψελών σε διάφορους τομείς της σύγχρονης καθημερινότητας, οι οποίοι αναβαθμίζουν την παροχή υπηρεσιών και την εμπειρία του χρήστη.

Λέξεις κλειδιά: Μικρή Κυψέλη (SC), Δίκτυο Μικρών Κυψελών, μετακινούμενες Μικρές Κυψέλες (mSCs), Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), Δίκτυα Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς (5G), Σταθμοί Βάσης Μακρο-Κυψελών, Φεμτο-μικροκυψέλες, Ετερογενή Δίκτυα, Αισθητήρες, “Self-x” Λειτουργίες, H2020/5G-PPP Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Πρόγραμμα SESAME, Νέφος, Υπολογιστική στα Άκρα του δικτύου, Νεφοϋπολογιστική, Πολλαπλή Μίσθωση, Αυτόνομα Οχήματα, Έξυπνη Πόλη, Τηλεϊατρική.

ABSTRACT

5G is the next generation of the mobile broadband that will replace 4G/LTE connection and will offer very high speed connection through the Internet. Among others, 5G also minimizes delays in device's communication, dramatically increasing the response time and expanding the user's experience.

5G will bring many changes into our daily lives, the users' experience and the very high speed data connection. Some of the areas that will be affected are autonomous vehicles, smart cities, public security and civil protection, smart houses, telemedicine, Internet of things and distance machine control.

To achieve all the aforementioned goals and more there is a need of higher system capacity which depends on three factors. The first factor is an increase of the spectrum efficiency. The second factor is an increase of the available spectrum. The third factor is an increase of the amount of all hierarchical levels base stations (macro, micro, pico, femto), which offers a very dense spatial reuse of the frequency channels. This factor leads to the main design approach of radio networks that is called "heterogeneous networks". Traditionally, radio networks were designed and expanded based on a layer, a topology of radio access nodes known as macro cells or simply macro. 2G, 3G and 4G voice and data networks have been designed and developed according to macro cells topology.

The integration of lower range small cells, wherever there is a need of better user coverage, is a standard practice of topological modern radio networks development. The harmonically cooperative application of both of two types of cells is essential for small areas where coverage is insufficient. It is essential for the signal enhancement which leads to a better quality of service. It is vital to relief the overloaded macro cells at hot spots where there is a high demand of connectivity as well as to support a long range of new applications which will be offered by an enormous number of small devices and sensors.

Small cells in the context of the 5G technology which connects all types of devices, do offer capacity to (portable) devices and connectivity to the sensors of Internet of Things. Furthermore, they expand the network area, decrease latency, provide services to many more users and insure high efficiency.

The present thesis studies factors that must be taken into account for the deployment of small cells and the needed technologies for 5G applications. The work also refers to scenarios and selected case studies of small cells which upgrade the quality of service and the user's experience.

Keywords: Small Cell (SC), Small Cells Network, Moving Small Cells (mSCs), Internet of Things (IoT), Fifth Generation Communication Networks (5G), Macro Cell Base Stations, Femto Small Cells, Heterogeneous Networks, Sensors, "Self-x" Functions, H2020/5G-PPP SESAME EU-funded Research Project, Cloud, Mobile Edge Computing (MEC), Cloud Computing, Multitenancy, Autonomous Vehicles, Smart City, Telemedicine.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
1.1. Τι Είναι οι Μικρές Κυψέλες.....	21
1.2. Κατηγορίες Σεναρίων	26
1.3. Ταυτοποίηση και Ταξινόμηση Περιπτώσεων Χρήσης.....	28
1.4. Αντιστοίχιση Σεναρίων - Περιπτώσεων Χρήσης	34
1.5. Σύντομη Ανάλυση Καθετοποιημένων Αγορών	34
1.6. Τυπικά Σενάρια Ανάπτυξης Μικρών Κυψελών	36
1.7. Παράγοντες που πρέπει να Ληφθούν Υπόψη στην Ανάπτυξη των Μικρών Κυψελών.....	38
1.8. Υποστηρικτικές Τεχνολογίες για τα Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας 5G.....	40
1.8.1. Αυξάνοντας την Ασύρματη Χωρητικότητα	41
1.8.2. Αρχιτεκτονική	49
2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ	54
2.1. Moving Small Cells (mSCs)	54
2.1.1. Σενάριο: Μετακινούμενες Μικρές Κυψέλες σε Δίκτυα Δημόσιας Ασφάλειας (mSC based PS network)	57
2.2. Mobile Edge Computing (MEC).....	59
3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ	60
3.1. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet Of Things - IoT)	61
3.1.1. Περίπτωση Χρήσης: Το IoT στα Συγκοινωνιακά Μέσα και την Εφοδιαστική Αλυσίδα	65
3.1.2. Περίπτωση Χρήσης: Το IoT στα Έξυπνα Περιβάλλοντα.....	65
3.1.3. Περίπτωση Χρήσης: Το IoT στην Υγεία.....	66
3.1.4. Περίπτωση Χρήσης: Το IoT στην Προσωπική και Κοινωνική Ζωή	67
3.1.5. Περίπτωση Χρήσης: Το «Φουτουριστικό» IoT.....	67
3.2. Υγεία	67
Κινητή Υγεία και Εξ αποστάσεως Παρακολούθηση Ασθενών στο 5G.....	67
3.2.1. Περίπτωση Χρήσης: Μετάδοση Βίντεο Εσωτερικού Χώρου	68
3.2.2. Περίπτωση Χρήσης: Κινητό Σύστημα Παρακολούθησης Υγείας.....	68

3.2.3.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Μετάδοση Βίντεο Ιατρικού Περιεχομένου Μέσα από Ασθενοφόρο με Χρήση Δικτύου Μικρών Κυψελών.</i>	70
3.3.	Κατασκευαστική Βιομηχανία	71
3.3.1.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Αυτόνομα και Εξ Αποστάσεως Ελεγχόμενα Μηχανήματα</i> 72	
3.3.2.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Ασφάλεια και Υγεία στα Εργοτάξια</i>	72
3.3.3.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Τρισδιάστατα Μοντέλα</i>	73
3.3.4.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Διαχείριση Διαδικασιών Κατασκευών</i>	73
3.3.5.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Διαχείριση Εκπομπών και Αποβλήτων</i>	74
3.4.	Απρόσμενα Γεγονότα	75
3.4.1.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Επιτάχυνση Εφαρμογών στα Άκρα του Δικτύου 5G, σε Περιβάλλον Σταδίου</i>	75
3.5.	Δημόσια και Πολιτική Προστασία	78
3.5.1.	Περίπτωση Χρήσης: <i>5G E2E τεμαχισμός για εφαρμογές κρίσιμων αποστολών</i> 78	
3.5.2.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Χρήση 5G από Ομάδες Άμεσης Επέμβασης (Πρώτοι Ανταποκρινόμενοι)</i>	81
	<i>Ο Ρόλος του 5G στη Δημόσια Ασφάλεια με Συνδεσιμότητα Πανταχού Παρούσα</i>	82
	<i>Διασφάλιση ποιότητας και συνδεσιμότητας επικοινωνίας</i>	83
	<i>Επιχειρησιακή Αποτελεσματικότητα και Γνώση της Τρέχουσας Κατάστασης</i>	84
3.6.	Μεταφορές.....	86
3.6.1.	Περίπτωση Χρήσης: <i>5G Επικοινωνίες εν Πτήξει και Σύστημα Ψυχαγωγίας</i> ... 86	
3.7.	Έξυπνη Πόλη	89
3.7.1.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Ασύρματη Κυψελοειδής Επικοινωνία Οχήματος προς Οτιδήποτε (C-V2X)</i>	90
3.7.2.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Στύλοι Φωτισμού</i>	92
3.7.3.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Φωτεινοί Σηματοδότες</i>	95
3.7.4.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Πινακίδες</i>	96
3.7.5.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Στύλοι Κοινής Ωφέλειας</i>	97
3.7.6.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Στάσεις Λεωφορείων</i>	97
3.7.7.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Δεξαμενές Ύδατος - Συντριβάνια</i>	98
3.7.8.	Περίπτωση Χρήσης: <i>Εγκαταστάσεις σε Κτήρια</i>	99
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΙΟΙΧΕΩΝ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΩΝ ΤΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ SESAME ΚΑΙ 5G ESSENCE.....	100
4.1.	Επισκόπηση του Ερευνητικού Προγράμματος SESAME	100
4.2.	Αναφορά Ανάλυσης Αγοράς και Επιχειρησιακού Μοντέλου	101
4.3.	Η Επανάσταση των Δικτύων 5G	102

4.4.	Καινοτομίες του Προγράμματος 5G ESSENCE στην Αρχιτεκτονική του 5G	104
4.5.	Ενσωμάτωση των Λειτουργιών “Self-x” για την Υποστήριξη Υψηλότερων Αποδόσεων.....	107
4.5.1.	Ασύρματη Οπισθόζευξη και Λειτουργίες “Self-x”	107
4.5.2.	Εικονικοποίηση της Οπισθόζευξης ανά Μισθωτή	109
4.5.3.	Self-planning (Αυτο-Σχεδιασμός).....	110
4.5.4.	Self-optimization (Αυτο-Βελτιστοποίηση).....	111
4.5.5.	Self-healing (Αυτο-Ίαση).....	112
4.6.	Κύρια Καινοτόμα Χαρακτηριστικά της Αρχιτεκτονικής του Έργου SESAME	113
4.6.1.	Σενάριο 1: Υπηρεσίες Επιχειρήσεων σε Πολυμισθωμένα Μεγάλα Εργασιακά Κέντρα	116
4.6.2.	Σενάριο 2: Βελτιωμένη Εξυπηρέτηση «Εν Κινήσει»	117
4.6.3.	Σενάριο 3: Παροχή Υπηρεσίας σε Απρόσμενα Συμβάντα	118
❖	Συμπερασματική Επισκόπηση	120
❖	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	122

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:	Τύποι Σταθμών Βάσης.....	20
Εικόνα 2:	Ετερογενής Δικτυακή Ανάπτυξη Μικρών Κυψελών και Μακρο-Κυψελών.....	22
Εικόνα 3:	Δίκτυα Μικρών Κυψελών	23
Εικόνα 4:	Μικρές Κυψέλες 2021-2031 Τεχνολογίες, Αγορές, Προγνώσεις - Πιθανά Σενάρια Ανάπτυξης Μικρών Κυψελών στο 5G	26
Εικόνα 5:	Κατηγοριοποίηση Περιπτώσεων Χρήσης (σύμφωνα με την NGMN Alliance).....	31
Εικόνα 6:	Αντιστοίχιση των Ταυτοποιημένων Περιπτώσεων Χρήσης σε Κατηγορίες Σεναρίων κατά το SFC.....	34
Εικόνα 7:	Ενδεικτική Κατηγοριοποίηση των Περιπτώσεων Χρήσης που συσχετίζονται με τους κατά το 5G-PPP Καθετοποιημένους Τομείς της Αγοράς	35
Εικόνα 8:	Γενική Εικόνα των Εφαρμογών που μπορούν να υποστηριχθούν από Συστήματα 5G [38]	41
Εικόνα 9:	Κεντρικοποιημένη Αρχιτεκτονική CoMP	46
Εικόνα 10:	Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική CoMP	46
Εικόνα 11:	Προσέγγιση Συντονισμένου Χρονοπρογραμματισμού	47
Εικόνα 12:	Τεχνικές Συνεργατικής Επεξεργασίας: α) Συνεργατική Μετάδοση, β) Δυναμική Επιλογή Κυψέλης.....	47
Εικόνα 13:	Δίκτυο Πρόσβασης για Συστήματα 5G.....	50
Εικόνα 14:	Αρχιτεκτονική SDN.....	52
Εικόνα 15:	Συμβατικό Ετερογενές Δίκτυο με μερικές femto-, pico- και mSCs	54
Εικόνα 16:	Αρχιτεκτονική μίας mSC	55
Εικόνα 17:	Κατανομή Πόρων σε Συμβατικό Δίκτυο Μετακινούμενων Μικρών Κυψελών [39]	56
Εικόνα 18:	Συμβατικές Επικοινωνίες PS-D2D.....	56
Εικόνα 19:	Προτεινόμενο Δίκτυο Δημόσιας Ασφάλειας με Μετακινούμενες Μικρές Κυψέλες.....	57
Εικόνα 20:	Κατανομή Πόρων των RmSCs, ImScs και IUEs για τη Λειτουργία Δημόσιας Ασφάλειας	58
Εικόνα 21:	Περιπτώσεις Χρήσεων Μικρών Κυψελών στα Δίκτυα 5G.....	60
Εικόνα 22:	Μία Τυπική Δομή Δικτύου Φεμτο-Κυψελών [53]	63
Εικόνα 23:	Τομείς Εφαρμογών του IoT [53].....	65
Εικόνα 24:	Ενδεικτική Ανάπτυξη Φεμτο-Κυψελών σε Κατοικία [156].....	66
Εικόνα 25:	Σενάριο Εσωτερικού Χώρου Ιατρικού Υπερηχογραφήματος Συνεχούς Ροής [18].....	68
Εικόνα 26:	Περίπτωση Χρήσης Μετάδοσης Βίντεο Συνεχούς Ροής από Ασθενοφόρο	71
Εικόνα 27:	5G στην Κατασκευαστική Βιομηχανία [34]	72
Εικόνα 28:	Επιτάχυνση Εφαρμογών στα Άκρα του Δικτύου 5G σε Περιβάλλον Σταδίου [169].....	76
Εικόνα 29:	Εφαρμογές Κρίσιμων Αποστολών για Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας [169]	79
Εικόνα 30:	Λύσεις Δικτυακής Κάλυψης IAB για Δημόσια Ασφάλεια [191]	82
Εικόνα 31:	Επικοινωνίες Ομάδων για Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας [191].....	83
Εικόνα 32:	Διαφορετικά Επίπεδα Πρόσβασης με βάση την Προτεραιότητα για Ομάδες Χρηστών [191]	84
Εικόνα 33:	5G NR Ακριβής Προσδιορισμός Θέσης Βασισμένος σε IAB [191].....	85
Εικόνα 34:	Ενσωματωμένη Εν Πτήση Συνδεσιμότητα και Συστήματα Ψυχαγωγίας [169].....	87
Εικόνα 35:	Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G σε Έξυπνες Πόλεις	89

Εικόνα 36:	Περιπτώσεις Επικοινωνίας V2X.....	90
Εικόνα 37:	Τεχνολογίες Επικοινωνίας Vehicle-to-Everything (V2X)	91
Εικόνα 38:	Κουτιά Μικρών Κυψελών Τοποθετημένα στο Κάτω Μέρος ή στην Κορυφή των Στύλων Φωτισμού	92
Εικόνα 39:	Προσέγγιση των Έξυπνων Στύλων Φωτισμού 5G, με πιθανές δυνατότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παροχή νέων υπηρεσιών [64].....	93
Εικόνα 40:	Προσδοκώμενοι Ενδιαφερόμενοι Φορείς για Αξιοποίηση των Στύλων Φωτισμού 5G των πόλεων	95
Εικόνα 41:	Απεικόνιση Μικρών Κυψελών, εγκατεστημένων στην Κορυφή Φωτεινών Σηματοδοτών.....	96
Εικόνα 42:	Μικρές Κυψέλες εγκατεστημένες στα Άκρα Πινακίδων	97
Εικόνα 43:	Μικρές Κυψέλες εγκατεστημένες σε Ξύλινους Στύλους Κοινής Ωφέλειας: (α) Μικρή Κυψέλη και Καμπίνες εγκατεστημένες στο Μέσο Στύλων Κοινής Ωφέλειας και (β) Στερεωμένες στις Γραμμές Ηλεκτροδότησης.....	97
Εικόνα 44:	Απεικόνιση Μικρών Κυψελών σε Διαφημιστικές Πινακίδες σε Στέγαστρο Στάσης Λεωφορείων	98
Εικόνα 45:	Μικρές Κυψέλες που φιλοξενούνται σε Δεξαμενές Νερού	99
Εικόνα 46:	Σύγκριση της Ενσύρματης Τοπολογίας Αστέρα και της Ασύρματης Τοπολογίας Πλέγματος στο Πρόγραμμα SESAME	108
Εικόνα 47:	Παράδειγμα Τοπολογίας για μία Ανάπτυξη Υποδομής SESAME με μερικές CESCs που δρουν ως Κόμβοι Αναμεταδοτών ή Πύλες Εξόδου	109
Εικόνα 48:	Πιθανή Εικονικοποίηση ανά Μισθωτή, της Παραδειγματικής Τοπολογίας.....	110
Εικόνα 49:	Πεδίο των δομικών Στοιχείων του Έργου SESAME (φυσική άποψη).....	113
Εικόνα 50:	Συνολική Αρχιτεκτονική του Έργου SESAME.....	114
Εικόνα 51:	Προτεινόμενο Σύστημα για Πολυμισθωμένες Επιχειρηματικές Υπηρεσίες	116
Εικόνα 52:	Εμπειρία Βελτιωμένης Υπηρεσίας «Εν Κινήσει»	119

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εύρος Ισχύος Εκπομπής για Διάφορες Περιπτώσεις Μικρών Κυψελών	24
Πίνακας 2: Ταυτοποίηση των Περιπτώσεων Χρήσης	31
Πίνακας 3: Αντιστοίχιση των Ταυτοποιημένων Περιπτώσεων Χρήσης σε Κατηγορίες Σεναρίων κατά το SCF	34
Πίνακας 4: Ενδεικτική Κατηγοριοποίηση των Περιπτώσεων Χρήσης που συσχετίζονται με τους κατά το 5G-PPP Καθετοποιημένους Τομείς της Αγοράς	35
Πίνακας 5: Τυπικά Σενάρια Ανάπτυξης Μικρών Κυψελών (με αναφορά σε στόχους, εμπλεκόμενους χρήστες, μέσα υλοποίησης και πυκνότητα)	37

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

3D	Three-dimensional
3G	Third Generation of Mobile Communications
3GPP	The Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation of Mobile Communications
5G	Fifth Generation of Mobile Communications
5GMF	The Fifth Generation Mobile Communication Promotion Forum
5G PPP	The 5G Infrastructure Public Private Partnership
6G	Sixth Generation of Mobile Communications
aaS	as a Service
ADMM	Alternative Direction Multiplier Method
ANR	Automatic Neighbor Relations
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
APBS	Access Point Base Station
AR	Augmented Reality
AS	Application Server
ASA	Authorized Shared Access
BAN	Body Area Network
BBU	BaseBand Unit
BIM	Building Information Modelling
BS	Base Station
BSN	Body Sensor Network
BSS	Business Support System
BYOD	Bring your Own Device
C-ACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
C-RAN	Cloud Radio Access Network
C-V2X	Cellular Vehicle to Everything
CA	Carrier Aggregation
CAPEX	Capital Expenditures
CAV	Connected and Autonomous Vehicle
CCI	Co-Channel Interference
CCO	Coverage and Capacity Optimization
CDMA	Code Division Multiple Access
CESC	Cloud Enabled Small Cell
CESCM	Cloud Enabled Small Cell Manager
CN	Core Network
COC	Cell Outage Compensation
COD	Cell Outage Detection
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP	Control Plane
CPE	Customer Premises Equipment
CPU	Central Processing Unit
CR	Cognitive Radio
cSD-RAN	centralized Software Defined-RAN
CSI	Channel State Information
cSON	centralized SON
CU	Centralized Unit

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

CV	Connected Vehicle
D2D	Device-to-Device
DAS	Distributed Access System
DAS	Distributed Antenna System
DB	Data Base
dBm	decibel referred to 1 milliwatt
DC	Data Centre
DL	Downlink
DL	Download
DP	Data Plane
DSL	Digital Subscriber Line
DSRC	Dedicated Short Range Communication
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
E2E	End to End
EC	European Commission
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eMBMS	evolved Multimedia Broadcast Multicast Service
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMF	Electromagnetic Field
EMS	Element Management System
eNB	evolved nodeB
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	European Union
EUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FAP	Femtocell Access Point
FBS	Femto Base Station
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency-Division Duplex
FR	First Responder
GA	Grant Agreement
GHz	Giga Hertz
GLOSA	Green Light Optimized Speed Advisory
GPS	Global Positioning System
GS	Group Specification
GSM	Global System for Mobile Communications
GSMA	Global System for Mobile Communications Alliance
GW	Gateway
GWCN	Gateway Core Network
HAN	Home Area Network
H2020	Horizon 2020
HetNet	Heterogeneous Network
HD	High Definition
HNB	Home NodeB
HO	Handoff
HO	Handover
HOF	History-based Offloading Framework
HTC	Human-Type Communication
HW	Hardware
IaaS	Infrastructure as a Service

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

IAB	Integrated Access and Backhaul
IBS	In-Building System
ICI	Inter-Carrier Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
IFE	In Flight Entertainment
IFEC	In Flight Entertainment and Communication
IIoT	Industrial IoT
IMEI	International Mobile Equipment Identity
ImSC	Isolated moving Small Cell
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
IoV	Internet of Vehicles
IP	Internet Protocol
ISG	Industry Specification Group
ISP	Internet Service Provider
IT	Information Technology
ITS	Intelligent Transport System
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
IUE	Isolated User Equipment
KPI	Key Performance Indicator
KVM	Kernel-based Virtual Machine
LMR	Land Mobile Radio
LoS	Line of Sight
LPN	Low Power Node
LPWAN	Low-Power Wide Area Network
LSA	Licensed Shared Access
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
M2M	Machine-to-Machine
M&O	Management and Orchestration
M-eNB	Macro-evolved nodeB
MANO	Management and Orchestration
MBB	Mobile Broadband
MBS	Macrocellular Base Station
MC	Mission Critical
MC-PS	Mission Critical - Public Safety
MC-PTT	Mission Critical - Push-To-Talk
MCC	Mobile Cloud Computing
MEC	Mobile Edge Computing
MEC	Multi-access Edge Computing
METIS	Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society
MHz	Mega Hertz

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLB	Mobility Load Balance
mMTC	massive Machine Type Communications
mmWave	millimeter Wave
MOCN	Multi-Operator Core Network
MUE	Macro User Equipment
MNO	Mobile Network Operator
MO	Mobile Operator
MPC	Moving Personal Cell
MR	Mixed Reality
MRO	Mobility Robustness Optimization
mSC	moving Small Cell
MS	Mobile Station
mSCNO	mobile Small Cell Network Operator
MTC	Machine-Type Communication
MUE	Macro User Equipment
NB-IoT	NarrowBand IoT
NF	Network Function
NFV	Network Function Virtualization
NFVI	Network Function Virtualization Infrastructure
NFVO	Network Function Virtualization Orchestrator
NG	Next Generation
NGMN	Next-Generation Mobile Network
NMS	Network Management System
NO	Network Operator
NR	New Radio
NS	Network Service
NSC	Neighborhood Small Cell
NTN	Non Terrestrial Network
OBU	On-Board Unit
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operating Expenditures
OS	Operating System
OSM	Open Source MANO
OSS	Operations Support System
OTT	Over-The-Top
P2I	Pedestrian to Infrastructure
PC	Personal Computer
PED	Personal Device
PHY	Physical layer
PNF	Physical Network Function
PoC	Proof of Concept
PPDR	Public Protection and Disaster Relief
ProSe	Proximity Service
PRS	Positioning Reference Signal
PPP	Public Private Partnership
PS	Public Safety
PTT	Push-To-Talk
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

QR	Quick Response
R&D	Research and Development
RAN	Radio Access Network
RAS	Radio Access and Spectrum
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RmSC	Relay moving Small Cell
RN	Radio Network
RNC	Radio Network Controller
RoW	Right of Way
RRH	Remote Radio Head
RRM	Radio Resources Management
RSU	Road Side Unit
RT	Real Time
RUE	Relay User Equipment
Rx	Reception
SA	Standalone
SC	Small Cell
SCaaS	Small Cell as a Service
SCF	Small Cell Forum
SCNO	Small Cell Network Operator
SD-RAN	Software Defined Radio Access Network
SDN	Software Defined Networking
SDO	Standards Developing Organization
SFC	Service Function Chaining
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SLA	Service-Level Agreement
SME	Small- and Medium-sized Enterprise
SMS	Short Message Service
SO	Spectrum Owner
SON	Self-Organizing Network
SP	Service Provider
SRS	Sounding Reference Signal
SW	Software
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
TCCA	The Critical Communications Association
TDD	Time-Division Duplex
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TS	Technical Specification
Tx	Transmission
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDN	Ultra-Dense Network
UE	User Equipment
UL	Uplink
UL	Upload
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	User Plane

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

URLLC	Ultra-Reliable, Low Latency Communications
V2D	Vehicle to Device
V2G	Vehicle to Grid
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2N	Vehicle to Network
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2R	Vehicle to the Road
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VIM	Virtual Infrastructure Manager
VM	Virtual Machine
VNF	Virtual Network Function
VNFM	Virtual Network Function Manager
VNO	Virtual Network Operator
VR	Virtual Reality
VSCNO	Virtual Small Cell Network Operator
WAN	Wide Area Network
WAT	Wireless Access Technology
WBAN	Wireless Body Area Network
WET	Wireless Energy Transfer
WiMAX	World Interoperability for Microwave Access
WHO	World Health Organization
WG	Working Group
WiFi, Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wide Local Area Network
WRC	World Radiocommunication Conference
WSN	Wireless Sensor Network
WWW, www	World Wide Web

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

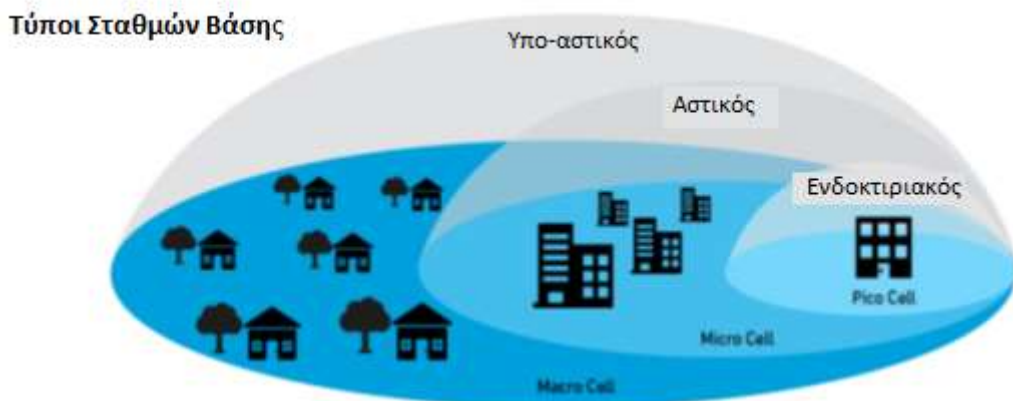
Στην αρχή τα συστήματα επικοινωνιών ξεκίνησαν τη λειτουργία τους με τις μακρο-κυψέλες (**macro-cells**), με μεγάλη εμβέλεια δράσης (της τάξης χιλιομέτρων) και μεγάλη ισχύ εκπομπής, οι οποίες τοποθετούνταν σε οροφές κτιρίων και σε ψηλά σημεία των πόλεων. Με την εξέλιξη των απαιτήσεων των συστημάτων δημιουργήθηκε η ανάγκη για περισσότερα επίπεδα σταθμών βάσης ικανών ώστε να καλύπτουν χρήστες σε μικρότερες εδαφικές περιοχές και ιδίως σε τοπικό επίπεδο. Επιπλέον, πολλοί χρήστες είχαν αδυναμία λήψης σήματος εντός των κατοικιών τους αλλά και σε συγκροτήματα γραφείων. Έτσι εμφανίστηκαν εναλλακτικά οι μικρο-κυψέλες (**micro-cells**), οι πικο-κυψέλες (**pico-cells**) και οι φεμτο-κυψέλες (**femto-cells**) οι οποίες είναι μικρότερες σε μέγεθος και περιλαμβάνονται όλες στον ευρύτερο όρο «**μικρές κυψέλες**» («**small cells - SCs**»). Ειδικότερα, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις ([1], [2]):

Φεμτο-κυψέλες: Είναι ο μικρότερος τύπος μικρών κυψελών που λειτουργεί σε αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων και καλύπτουν περιοχές απόστασης από 10 έως 100 μέτρα και όχι παραπάνω από 30 χρήστες τη φορά. Είναι χαμηλής ισχύος και απαιτούν συνδέσεις υψηλής ευρυζωνικότητας. Δημιουργούν ένα τοπικό κυψελοειδές δίκτυο και χρησιμοποιούν διαδικτυακή σύνδεση για τη μεταφορά ενός αξιόπιστου σήματος κινητής τηλεφωνίας. Αναφέρονται σε περιπτώσεις εσωτερικών ιδιωτικών χώρων και σε μερικές μονάδες υψηλής χωρητικότητας που αναπτύσσονται σε επιχειρήσεις.

Πικο-κυψέλες: Καλύπτουν περιοχές απόστασης από 100 έως 200 μέτρα και όχι παραπάνω από 100 χρήστες τη φορά. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς δημόσιους χώρους και επιχειρήσεις.

Μικρο-κυψέλες: Καλύπτουν περιοχές απόστασης από 200 έως 2000 μέτρα και όχι παραπάνω από 2000 χρήστες τη φορά. Κυρίως τοποθετούνται σε εξωτερικούς χώρους για τη βελτίωση του σήματος σε περιοχές όπου οι σταθμοί βάσης μακρο-κυψελών δεν παρέχουν κάλυψη ή όπου η κάλυψη είναι εν γένει περιορισμένη.

Και στις τρεις κατηγορίες μικρών κυψελών ο τύπος της οπισθοζεύξης είναι ασύρματος.

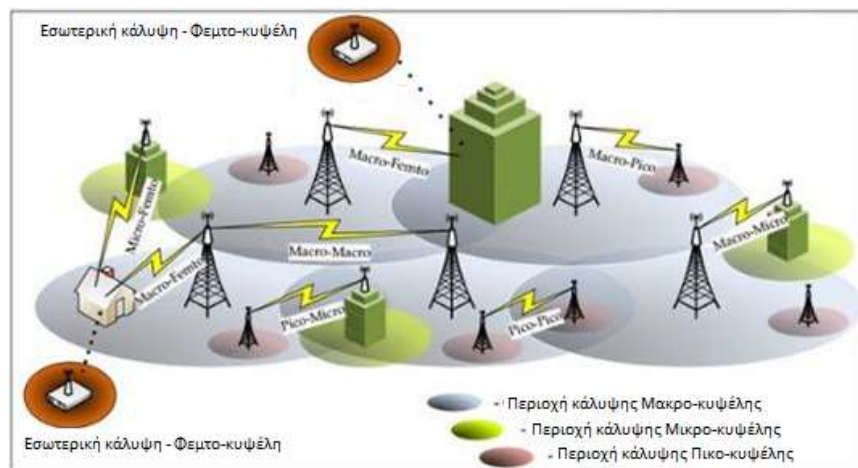


Εικόνα 1: Τύποι Σταθμών Βάσης.

1.1. Τι Είναι οι Μικρές Κυψέλες

Ο όρος “small cells” καλύπτει τις περιπτώσεις των femto-cells, pico-cells, micro-cells και metro-cells που χρησιμοποιούνται σε οικιακά περιβάλλοντα (Οικιακός BS (Base Station)), επιχειρηματικά περιβάλλοντα (BS Τοπικής Περιοχής), αστικά και αγροτικά περιβάλλοντα (Μεσαίου Εύρους BS). Οι αναπτύξεις των διασυνδεδεμένων μικρών κυψελών αποκαλούνται και ως «καταναμημένα συστήματα κεραιών» (Distributed Antenna Systems - DAS) ή «ενδοκτιριακά συστήματα» (In-Building Systems - IBS) όπου παρέχουν υπηρεσίες σε μια υφιστάμενη δομή. Οι σταθμοί βάσης τοπικής περιοχής τυπικά αναπτύσσονται σε ενδοκτιριακά περιβάλλοντα προσβάσιμα στο ευρύ κοινό (όπως π.χ. εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια και σταθμοί). Οι μεσαίου εύρους σταθμοί βάσης τυπικά αναπτύσσονται σε εξωτερικά περιβάλλοντα. Συχνά ενσωματώνονται σε οδικές δομές όπως πυλώνες φωτισμού, διαφημιστικά πλαίσια, οδικές σημάνσεις, κ.α. Μπορούν επίσης να εγκαθίστανται για να επεκτείνουν την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου κινητών επικοινωνιών σε μια τοπική περιοχή, όπως π.χ. απομονωμένα χωριά, βιομηχανικές περιοχές ή για σκοπούς έκτακτης ανάγκης.

Στα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας επικρατούν οι *μακρο-κυψέλες (macro-cells)*. Αυτές είναι μεγάλες κυψέλες εγκατεστημένες τυπικά σε ιστούς ή σε οροφές κτιρίων σε αστικά κέντρα και κωμοπόλεις, παράλληλα με τους αυτοκινητόδρομους ή σε αγροτικούς λόφους. Έχουν ραδιοκάλυψη από μερικά χιλιόμετρα μέχρι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα και εξυπηρετούνται από υψηλής ισχύος σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που οφείλεται στην χρήση έξυπνων συσκευών και στις υπηρεσίες μεγάλης ευρυζωνικότητας, έχουν αναγκάσει τους παρόχους να αυξήσουν την δικτυακή τους κάλυψη και την ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων. Για το σκοπό αυτό, μία από τις πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις είναι η ανάπτυξη ενός νέου τύπου τεχνολογίας ευρυζωνικής υποδομής, η τεχνολογία των μικρών κυψελών, η οποία περιλαμβάνει μικρές κυψέλες πυκνά τοποθετημένες που επαναχρησιμοποιούν περιορισμένο φάσμα συμπληρώνοντας τα υφιστάμενα μακρο-δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (*Εικόνα 2*)¹.



Εικόνα 2: Ετερογενής Δικτυακή Ανάπτυξη Μικρών Κυψελών και Μακρο-Κυψελών¹.

¹ Εικόνα από το άρθρο: Ganni, S., Pratap, A., and Misra, R. (2017, July): **Distributed Algorithm for Resource Allocation in Downlink Heterogeneous Small Cell Networks**. In: Proceedings of the 7th ACM

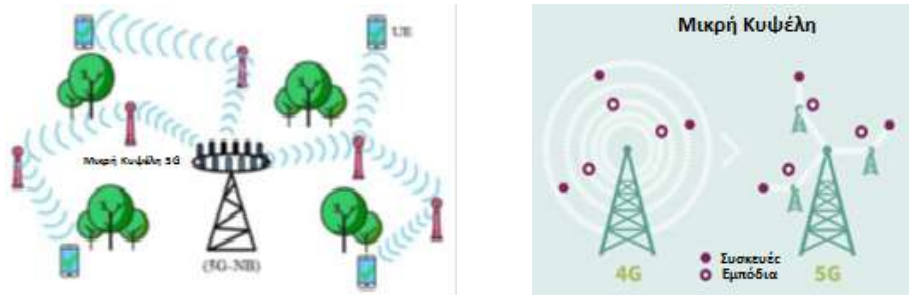
Η χρήση των μικρών κυψελών κατά κανόνα πλεονεκτεί και τούτο οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- **Βελτίωση της δικτυακής κάλυψης:** Οι μικρές κυψέλες μπορούν να εξασφαλίσουν συνδέσεις και να λειτουργήσουν ικανοποιητικά σε πολλά δικτυακά περιβάλλοντα που περιλαμβάνουν εσωτερικούς χώρους, εξωτερικές αγροτικές περιοχές, πλοία, τρένα και αεροσκάφη.
- **Ενίσχυση της επάρκειας φάσματος,** επιτρέποντας καλύτερη φασματική διαχείριση.
- **Βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου:** Οι μικρές κυψέλες μπορούν να αυξήσουν τη χωρητικότητα σε μια περιοχή με αποδοτικό τρόπο, σε αντίθεση με την τοποθέτηση περισσότερων μακρο-κυψελών.
- **Αισθητικές απαιτήσεις:** Η μικρή, συμπαγής και διακριτική μορφή των μικρών κυψελών είναι κατάλληλη για εκτενή δικτυακή ανάπτυξη που αποφεύγει τη δημιουργία ανεπιθύμητης οπτικής θέας και αισθητικής σε αστικές υποδομές, περιλαμβανομένων των μνημείων και των εμβληματικών κτιρίων.
- **Μείωση ενεργειακών απαιτήσεων:** Η μικρότερη, συγκριτικά, ενεργειακή κατανάλωση των μικρών κυψελών οδηγεί σε μειώσεις του αποτυπώματος άνθρακα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και παράλληλα αυξάνει τις πιθανότητες για την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για δικτυακές λειτουργίες [3]. Οι μικρές κυψέλες επιτρέπουν στις τερματικές συσκευές να λειτουργούν με πολύ χαμηλότερη ισχύ, γεγονός που αυξάνει το χρόνο ζωής των μπαταριών σε συνδυασμό με τη μείωση των παρεμβολών και τη μείωση της έκθεσης των χρηστών σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η ανάγκη για χρήση των μικρών κυψελών γίνεται περισσότερο επιτακτική στα δίκτυα 5G εξαιτίας της εμφάνισης υψηλότερων ζωνών φάσματος οι οποίες απαιτούν την ανάπτυξη πυκνότερων δικτύων για την υποστήριξη της κίνησης μεγαλύτερου όγκου δεδομένων ανά περιοχή.

Οι μικρές κυψέλες είναι σημεία κυψελοειδούς ασύρματης πρόσβασης χαμηλής ισχύος αλλά και εν γένει χαμηλότερου κόστους (σε σύγκριση με άλλες δικτυακές λύσεις). Μπορεί να εφαρμοστούν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους και σε αδειοδοτούμενα, κοινόχρηστα ή μη αδειοδοτούμενα φάσματα. Οι μικρές κυψέλες διανέμουν υψηλής ποιότητας κάλυψη κινητής τηλεφωνίας συμπληρώνοντας το δίκτυο των μακρο-κυψελών, όπου το σήμα της κεραίας macro-cell δεν επαρκεί. Στα αστικά περιβάλλοντα, ορισμένες επιχειρήσεις και νοικοκυριά ενδέχεται να έχουν προβλήματα κάλυψης ή/και προβλήματα ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων εντός των κτιρίων. Η αρχιτεκτονική των μικρών κυψελών έρχεται να επιλύσει τα προβλήματα αυτά καθώς ουσιαστικά βελτιώνει την κάλυψη, προσθέτει στοχευμένη χωρητικότητα και υποστηρίζει νέες υπηρεσίες και εμπειρίες χρηστών.

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυψελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G



Εικόνα 3: Δίκτυα Μικρών Κυψελών.

Οι μικρές κυψέλες μπορούν να τοποθετούνται κατά αρκετές δεκάδες έως και εκατοντάδες σε μια περιοχή (ανάλογα με το μέγεθος αυτής και το είδος των εφαρμογών), σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους σε κτίρια, στέγες σπιτιών, φανάρια δρόμων, πυλώνες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και φωτισμού ή/και σε άλλες κατάλληλες επιφάνειες, προκειμένου να σχηματίσουν ένα «πυκνό» δίκτυο που λαμβάνει σήματα από τους σταθμούς βάσης και στέλνει τα διάφορα δεδομένα προς τους χρήστες. Η δομή του δικτύου αυτού οδηγεί σε αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος. Έχοντας εγκαταστήσει περισσότερους σταθμούς, σημαίνει ότι οι συχνότητες που ένας σταθμός χρησιμοποιεί για τη σύνδεση με τερματικές συσκευές μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλον σταθμό σε διαφορετική περιοχή, για να εξυπηρετηθούν και άλλοι πελάτες. Χρησιμοποιούνται τα ίδια κανάλια και φάσματα εκπομπής ταυτόχρονα σε πολλά μέρη και χωρίς παρεμβολές, επιτυγχάνοντας εν τέλει αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, βελτίωση της ποιότητας της επικοινωνίας και καλύτερη κάλυψη σε σημεία που η εγκατάσταση ενός κλασικού συστήματος πύργου εκπομπής μπορεί να είναι δύσκολη έως αδύνατη [4].

Η μικρή κυψέλη είναι «μικρή» γιατί αναφέρεται σε μικρή περιοχή κάλυψης του ασύρματου σήματος και στο μικρό μέγεθος της υποδομής/συσκευής. Οι εγκαταστάσεις των μικρών κυψελών καλύπτουν μικρές γεωγραφικές περιοχές της τάξης εκατοντάδων μέτρων σε σχέση με τους παραδοσιακούς πύργους εκπομπής (macrocells) που μπορούν να καλύψουν αρκετά χιλιόμετρα, προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο εξοπλισμός εκπομπής που μπορεί να συνοδεύει την κεραία είναι και αυτός μικρός σε μέγεθος, βρίσκεται σε δημόσια ή ιδιωτική ιδιοκτησία και συμβάλλει στην ενίσχυση της κάλυψης των πύργων εκπομπής και στην προσθήκη χωρητικότητας σε περιοχές με μεγάλη ζήτηση όπου συγκεντρώνονται πολλά άτομα (όπως π.χ. πλατείες, στάδια, πεζόδρομοι, πάρκα, πανεπιστήμια και μεγάλα κτίρια). Η κάλυψη τέτοιου είδους «πυκνών» περιοχών συνιστά πρόκληση για τους παρόχους ασύρματων δικτύων και έτσι στις ίδιες υποδομές μπορούν να συμβαίνουν διαφορετικές εγκαταστάσεις από διαφορετικούς παρόχους με αποτέλεσμα την δημιουργία συστάδων μικρών κυψελών [81].

Αρκετές χώρες ακολουθούν τις Συστάσεις του παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (World Health Organization - WHO) και της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - ITU) και έχουν εφαρμόσει τα όρια σχετικά με τη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τα οποία έχουν τεθεί από τη Διεθνή Επιτροπή για την προστασία από μη-ιονίζουσες Ακτινοβολίες (International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP). Οι βασικές θεωρήσεις του WHO αλλά και πολλών ανεξάρτητων εκθέσεων συνίστανται στο ότι δεν τίθενται κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία όταν οι εκπομπές των κεραιών συνάδουν με τα θεσπισμένα όρια [82]. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού μικρών κυψελών οφείλουν να συμμορφώνονται με σχετικά τεχνικά πρότυπα που έχουν θεσπιστεί από αρμόδιους φορείς τυποποίησης (όπως π.χ. η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission - IEC) καθώς και με οποιαδήποτε άλλες απαιτήσεις από τη νομοθεσία για θέματα υγείας και ασφάλειας.

Σύμφωνα με την Τεχνική Προδιαγραφή 3GPP TS 36.104 [83] το εύρος της ισχύος εκπομπής για διάφορες περιπτώσεις μικρών κυψελών είναι όπως στον ακόλουθο Πίνακα 1:

Κατηγορία BS (κατά 3GPPP)	3GPP Pr _{at} (Ισχύς εκπομπής ανά φέρουσα ανά σύνδεσμο)
BS Ευρείας Περιοχής	(Σημείωση*)
BS Μεσαίου Εύρους	< + 38 dBm (6.3 W)
BS Τοπικής Περιοχής	< + 24 dBm (250 mW)
Οικιακός BS	< + 20 dBm (100 mW, για μια θύρα κεραίας εκπομπής) < + 17 dBm (50 mW, για δύο θύρες κεραίας εκπομπής) < + 14 dBm (25 mW για τέσσερις θύρες κεραίας εκπομπής) < + 11 dBm (12.5 mW για οκτώ θύρες κεραίας εκπομπής)

Πίνακας 1: Εύρος Ισχύος Εκπομπής για Διάφορες Περιπτώσεις Μικρών Κυψελών.

Σημείωση*: Δεν τίθεται ανώτατο όριο για τη διαβαθμισμένη ισχύ εξόδου για BS Ευρείας Περιοχής.

(Η διαβαθμισμένη ισχύς εξόδου (rated output power - Pr_{at}) του σταθμού βάσης είναι η μέση στάθμη ισχύος ανά φέρουσα για τον BS που λειτουργεί σε διαρθρώσεις απλής φέρουσας, πολλαπλής φέρουσας ή συνάθροισης φέρουσας τις οποίες ο κατασκευαστής έχει δηλώσει για να είναι διαθέσιμες στον σύνδεσμο της κεραίας κατά τη διάρκεια της περιόδου που ο πομπός είναι σε κατάσταση λειτουργίας).

Γιατί οι Μικρές Κυψέλες είναι Απαραίτητες στην Εποχή του 5G

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για χρήση μικρών κυψελών στα δίκτυα 5G είναι περισσότερο επιτακτική, εξαιτίας της χρήσης υψηλότερων συχνοτήτων φάσματος οι οποίες καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη «πυκνότερων» δικτύων για την υποστήριξη πολύ μεγαλύτερων ρυθμών στην κίνηση των δεδομένων.

Με δύο νέες ζώνες συχνοτήτων τις, sub-6GHz (3 - 7 GHz) και mmWave (24 - 48 GHz), που περιλαμβάνονται στα δίκτυα 5G, υποστηρίζεται πολύ μεγαλύτερη ευρυζωνικότητα, χαμηλότερη καθυστέρηση, υψηλότερη αξιοπιστία και αρκετά περισσότερες συνδέσεις σε σύγκριση με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας της προηγούμενης γενιάς. Αποτελεί πλέον γεγονός το ότι το 5G πλεονεκτεί στην επιτάχυνση της ανάπτυξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας ενώ ταυτόχρονα δίνει νέες ωθήσεις σε βιομηχανικούς κλάδους, όπως ο κατασκευαστικός τομέας, η ψυχαγωγία, η υπολογιστική και η αυτοματοποίηση.

Εντούτοις, υπάρχουν πολλές προκλήσεις που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν. Μια από αυτές είναι η εξασθένηση σήματος των υψηλών συχνοτήτων. Οι μικρές κυψέλες προτίθενται να αντιμετωπίσουν την ως άνω πρόκληση. Η δημιουργία ενός «πυκνού» αστικού δικτύου με την εφαρμογή πολλών μικρών κυψελών αποτελεί το «βασικό κλειδί» στις εφαρμογές 5G καθώς επιτρέπει την επέκταση του μακρο-δικτύου και κατά συνέπεια ενισχύει την χωρητικότητα των δεδομένων [1].

Τα ασύρματα δίκτυα 3G, 4G και LTE χρησιμοποιούν ήδη τις μικρές κυψέλες για να επεκτείνουν την κάλυψη και για να βελτιώνουν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Οι μικρές κυψέλες είναι σημεία ραδιοπρόσβασης χαμηλής ισχύος που συνδέουν κινητές

συσκευές/εξοπλισμό σε κινητά δίκτυα σε μια μικρή περιοχή. Επαναχρησιμοποιούν συχνότητες σε μία υπερβολικά πυκνή βάση, ώστε να εκμεταλλεύονται πλήρως το διαθέσιμο φάσμα [6].

Για τα 5G δίκτυα, οι διαχειριστές σκοπεύουν περισσότερο να χρησιμοποιήσουν το φάσμα υψηλών συχνοτήτων για να εξυπηρετούν κοντινότερες περιοχές και λιγότερο τις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες που χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι διακομιστές θα χρειαστούν έναν μεγαλύτερο αριθμό σημείων πρόσβασης που θα καλύπτουν μικρές περιοχές ώστε να μπορέσει να εξαπλωθεί αποτελεσματικά το 5G. Η απαιτούμενη λύση είναι μία μορφή υποδομής πυκνού δικτύου, η οποία επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση και λειτουργία των μικρών κυψελών, ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους.

Οι διαχειριστές κινητής τηλεφωνίας διαμοιράζουν τα δίκτυά τους μέσω σταθμών βάσεων χρησιμοποιώντας μακρο-κυψέλες και μικρο-κυψέλες. Οι μακρο-κυψέλες καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές ενώ οι διαφορετικοί τύποι μικρο-κυψελών καλύπτουν πολύ μικρότερες και ποικίλες γεωγραφικές περιοχές παρέχοντας υπηρεσίες σε μικρότερο αριθμό τελικών χρηστών, τόσο σε εσωτερικούς όσο και εξωτερικούς χώρους. Οι μικρο-κυψέλες σε σχέση με τις μακρο-κυψέλες χρησιμοποιούν χαμηλότερη ισχύ, απαιτούν μικρότερο χώρο και αυξάνουν την χωρητικότητα, «πυκνώνοντας» το δίκτυο. «Πύκνωση» του δικτύου συνεπάγεται εγκατάσταση πολλών μικρών κυψελών για την παροχή υπηρεσιών σε περισσότερους χρήστες, χαμηλή καθυστέρηση, περισσότερη ζωή μπαταρίας στις κινητές συσκευές και επεκταμένη κάλυψη. Οι μικροκυψέλες λειτουργούν σε φάσμα αδειοδοτούμενο και μη, σε περιοχή από 10 μέτρα μέχρι και μερικά χιλιόμετρα και τοποθετούνται σε κτίρια, αστικά κέντρα και προαστιακές περιοχές. Είναι μικρές σε μέγεθος και δεν είναι ιδιαίτερα εμφανείς, οπότε η εγκατάστασή τους είναι εν γένει εύκολη και γρήγορη. Έχουν ως κύριο στόχο να φέρουν τους τελικούς χρήστες και τις κινητές τους συσκευές πιο κοντά στο ραδιοκυματικό κινητό δίκτυο, βελτιώνοντας την απόδοση στην πρόσβαση [10].



Εικόνα 4: 5G Μικρές Κυψέλες 2021-2031: Τεχνολογίες, Αγορές, Προγνώσεις - Πιθανά Σενάρια Ανάπτυξης Μικρών Κυψελών στο 5G².

1.2. Κατηγορίες Σεναρίων

Νοούνται τέσσερις βασικές κατηγορίες σεναρίων, τέσσερα δηλαδή παραδείγματα εφαρμογών οι οποίες συνθέτουν μία συλλογή χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την παροχή υπηρεσιών. Πρόκειται για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1. **Οικιακές μικρές κυψέλες** οι οποίες είναι μικρές κυψέλες που προορίζονται για οικιακές εφαρμογές ή εφαρμογές σε μικρά γραφεία. Οι εφαρμογές αυτές τυπικά αφορούν εσωτερικούς χώρους και/ή περιοχές των οποίων οι ανάγκες μπορούν να καλύπτονται από μια μόνο μικρή κυψέλη. Η περίπτωση λογαριάζεται ως το μέρος της αγοράς που ήδη έχει εκμεταλλευτεί το 4G.
2. **Επιχειρησιακές μικρές κυψέλες** που βασίζονται σε γεωγραφικά όρια πέρα από τη στενή έννοια της οικιακής χρήσης. Αυτές αφορούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και υψηλότερο αριθμό χρηστών. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ανάγκη για κάλυψη με υψηλή αξιοπιστία και η χωρητικότητα είναι αρκετά σημαντική.
3. **Αστικές μικρές κυψέλες** οι οποίες ορίζονται ως βασικοί σταθμοί δημόσιας πρόσβασης με σκοπό την ενίσχυση της χωρητικότητας και την κάλυψη σε «πυκνά» περιβάλλοντα, όπως είναι π.χ. οι κεντρικές ζώνες επαυξημένης ζήτησης μιας πόλης και διάφοροι κόμβοι μεταφοράς και λιανικού εμπορίου.
4. **Αγροτικές και απομακρυσμένες μικρές κυψέλες** οι οποίες είναι προσανατολισμένες για να «φέρουν» την κινητή επικοινωνία σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές [6].

² Εικόνα από: Ghang, Y.-H. (2021): *5G Small Cells 2021-2031: Technologies, Markets, Forecast*. IDTechEx. (<https://www.idtechex.com/en/research-report/5g-small-cells-2021-2031-technologies-markets-forecast/825>)

Στην εποχή του 5G οι μικρές κυψέλες θα εφαρμόζονται σε ένα ευρύτερο πεδίο σεναρίων σε σχέση με το παρελθόν και οι αρχιτεκτονικές εκτιμάται ότι θα ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό. Οι περιπτώσεις χρήσεων των μικρών κυψελών υπόκεινται σε δυναμικές μεταβολές. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις των πελατών και των φορέων εκμετάλλευσης έχουν συνδυαστεί με αυτές των «ουδέτερων ξενιστών»³ (“neutral hosts”) και επιχειρήσεων που θα αποτελέσουν μοχλό ανάπτυξης των ιδιωτικών δικτύων.

Στην συνέχεια της ενότητας, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα και περιπτώσεις χρήσης των μικρών κυψελών σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ως κάτωθι:

Εμπορικές Ιδιοκτησίες: Επιχειρησιακά πάρκα, οικήματα, κτίρια γραφείων, διαμερίσματα και εμπορικά κέντρα χρειάζονται συνδεσιμότητα. Οι τελικοί χρήστες απαιτούν ασφαλή και αξιόπιστη συνδεσιμότητα η οποία δύναται να επιτυγχάνεται με τη χρήση μικρών κυψελών, οι οποίες με τη σειρά τους ενισχύουν το σήμα ενός παρόχου και σε εσωτερικούς χώρους.

Χώροι συγκέντρωσης: Ο ρόλος των μικρών κυψελών στη συνδεσιμότητα των χώρων συγκέντρωσης έχει αυξητική τάση και μεταβάλλεται δυναμικά. Στάδια και χώροι συγκέντρωσης παρέχουν πολύ συγκεκριμένες προκλήσεις και συνήθως έχουν υψηλή ζήτηση για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Επίσης απαιτείται εκτίμηση για τις διαφορετικές απαιτήσεις που έχουν οι επισκέπτες, το προσωπικό και οι υπηρεσίες επειγόντων περιστατικών. Οι επισκέπτες χρειάζονται αξιόπιστη συνδεσιμότητα για φωνητικές κλήσεις και για τη δυνατότητα λήψης και μεταφόρτωσης περιεχομένου κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος ή μίας επίσκεψης. Παράλληλα, θα πρέπει να υπάρχει διασφάλιση ως προς τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας για την εξυπηρέτηση κρίσιμων υπηρεσιών και υπηρεσιών ασφάλειας. Υπάλληλοι, προσωπικό τεχνικής υποστήριξης και προσωπικό για τις υπηρεσίες επειγόντων περιστατικών χρησιμοποιούν την ασύρματη συνδετικότητα για τη διασφάλιση της ομαλής και ασφαλούς λειτουργίας του χώρου συγκέντρωσης και των εκδηλώσεων που πραγματοποιούνται στο χώρο.

Ιδιωτικά δίκτυα: Τα ιδιωτικά δίκτυα εκτιμάται ότι θα μεταβάλλουν τις επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας. Σήμερα αυτά αποτελούν σημαντικό μέρος των εν εξελίξει εργασιών του Small Cell Forum⁴ (SCF). Τα ιδιωτικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα παρέχουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα, εξατομικευμένες προσφορές υπηρεσιών και πρόσβαση σε νέους επιχειρηματικούς τομείς. Η ανάγκη των πελατών για Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), ευρυζωνικότητα και ασφάλεια, αδιάλειπτες επικοινωνίες θα παίξει σημαντικό ρόλο. Όμως, τα ιδιωτικά δίκτυα

³ Η έννοια του «Ουδέτερου Ξενιστή» δεν είναι νέα. Το αντίστοιχο σύστημα επιτρέπει σε έναν τρίτο φορέα να επενδύσει στην κατασκευή της υποδομής για το δημόσιο κινητό δίκτυο πρόσβασης, η χρήση του οποίου μπορεί να προσφερθεί σε παρόχους δικτύων κινητής τηλεφωνίας (mobile Network Operators - MNOs). Στο παρελθόν αυτή η προοπτική έλαβε χώρα ουσιαστικά μέσω της χρήσης μικρών κυψελών και ενός συστήματος κατανεμημένης πρόσβασης (Distributed Access System - DAS). Ένα σύστημα Ουδέτερου Ξενιστή συχνά αναφέρεται ως ικανό για τη μείωση του κόστους όπως επίσης και για την ενίσχυση της ευελιξίας. Ουσιαστικά παρέχει έναν μηχανισμό για την ευκολότερη ανάπτυξη του δικτύου με τη συμμετοχή νέων «παικτών». Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πλήρωση αυτού του βασικού σκοπού. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε π.χ., μεταξύ άλλων: <https://stlpartners.com/articles/telco-cloud/neutral-host-how-open-ran-and-neutral-host-paves-way-5g/>

⁴ Το SCF είναι ένας διεθνής οργανισμός με παγκόσμια εμβέλεια και με στόχο την υποστήριξη ευέλικτης και χαμηλού κόστους υποδομής κινητών επικοινωνιών, μέσω της χρήσης μικρών κυψελών. Η βασική του επιδίωξη συνίσταται στο να καταστήσει την κινητή κυψελοειδή συνδετικότητα ως έναν προσβάσιμο πόρο μέσω των μικρών κυψελών, για οργανισμούς όλων των μεγεθών και για την υποστήριξη του ψηφιακού μετασχηματισμού της βιομηχανίας, των εταιρειών και των κοιντήτων. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.smallcellforum.org/>.

κινητής τηλεφωνίας πρέπει να είναι ειδικού σκοπού για να υποστηρίζουν τις ειδικές απαιτήσεις των αντίστοιχων, κατά περίπτωση, πελατών. Ένα ιδιωτικό δίκτυο μπορεί να είναι αυτο-διαχειριζόμενο από τον πάροχο υπηρεσιών ή πελάτη. Ο πάροχος υπηρεσιών μπορεί να είναι ένας διαχειριστής δικτύου κινητής τηλεφωνίας, ένας «ουδέτερος ξενιστής» ή ένας πάροχος συγκεκριμένων-βιομηχανικών τεχνολογιών.

Πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα: Η απαίτηση για κάλυψη κινητής τηλεφωνίας σε εξωτερικό χώρο ενός πυκνοκατοικημένου αστικού περιβάλλοντος δεν είναι ομοιόμορφη. Κορυφώνεται σε συγκεκριμένες περιοχές, σε ορισμένες στιγμές της ημέρας ή του έτους ή κατά τη διάρκεια ορισμένων γεγονότων. Οι πάροχοι πρέπει να είναι έτοιμοι ώστε να ικανοποιήσουν την αυξανόμενη και ανομοιόμορφη απαίτηση των πελατών και των τελικών χρηστών. Προς τούτο, οι μικρές κυψέλες συνιστούν μια εξαιρετικά αποτελεσματική και αποδοτική λύση, βάσει του κόστους.

Εικονικοποίηση: Η εικονικοποίηση του δικτύου αποτελεί ένα από τα τρέχοντα μείζονος σημασίας θέματα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Οι δυνατότητες που παρέχει όταν εφαρμόζεται στα δίκτυα πρόσβασης είναι αξιοσημείωτες και αυτές επιτυγχάνονται με τη χρήση νέων μικρών κυψελών οι οποίες περιλαμβάνουν συστάδες «εικονικών κυψελών» που τρέχουν από έναν κεντρικό ελεγκτή μαζί με απομακρυσμένες ραδιοκεφαλές χαμηλής ισχύος. Η προσέγγιση αυτή σχεδιασμού δικτύου μεταβάλλει τα οικονομικά και τη λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Εφαρμογές στον τομέα της υγείας: Ιδιωτικά δίκτυα 5G παρέχουν στους γιατρούς και τις νοσοκόμες ευπροσάρμοστες και υψηλής ποιότητας «εν κινήσει» υπηρεσίες φωνής, μηνυμάτων και δεδομένων. Τα ιδιωτικά δίκτυα στον τομέα της υγείας πρέπει να καλύπτουν απομονωμένους ή δυσπρόσιτους εσωτερικούς χώρους. Η τεχνολογία των μικρών κυψελών πλεονεκτεί σε διαλειτουργικότητα, σε ανοικτά συστήματα και στην αυτοματοποίηση του δικτυακού προγραμματισμού καθιστώντας την εύκολη στην εγκατάσταση και με καλή σχέση απόδοσης-κόστους. Οι επικοινωνίες για νοσοκόμες και ιατρούς που χρειάζονται στιγμιαία πρόσβαση στα αρχεία των ασθενών μέσω κινητών συσκευών, πρέπει επίσης να είναι ασφαλείς. Η λύση ενός ιδιωτικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας δύναται να εξασφαλίζει υψηλότερα επίπεδα κρυπτογράφησης και τη δυνατότητα πρόσβασης στις πληροφορίες αποκλειστικά και μόνο από το ιδιωτικό δίκτυο του νοσοκομείου. Αποκλειστικά ιδιωτικά δίκτυα προσδοκούν στην επίτευξη όλων αυτών των παροχών στον τομέα της υγείας [6].

1.3. Ταυτοποίηση και Ταξινόμηση Περιπτώσεων Χρήσης

Η ταυτοποίηση περιπτώσεων χρήσης 5G μικρών κυψελών απαιτεί βαθιά γνώση της ανάπτυξης του υφιστάμενου επιχειρησιακού πλαισίου 4G/LTE, χαρακτηριζόμενη από αλλαγές στους πελάτες, στη τεχνολογία και τις ρυθμίσεις των φορέων εκμετάλλευσης. Αν και τα έξυπνα τηλέφωνα αναμένεται ότι θα είναι οι βασικές προσωπικές συσκευές, σταδιακά αναδεικνύεται η χρήση και άλλων εξοπλισμών όπως π.χ. των αισθητήρων και των συσκευών που μπορούν να φορεθούν (wearables). Με την υποστήριξη της τεχνολογίας νέφους, οι προσωπικές συσκευές θα προωθήσουν την αξιοποίηση υπηρεσιών όπως είναι η παραγωγή και μερισμός υψηλής ποιότητας (βίντεο) περιεχομένου, πληρωμές, ταυτοποίηση, παιχνίδια στο νέφος, κινητή τηλεόραση και γενικά στην υποστήριξη της «έξυπνης» ζωής. Η ανάπτυξη των υπηρεσιών αυτών θα αλλάξει ριζικά τις εφαρμογές που αφορούν στην υγεία, στην ασφάλεια και στην κοινωνική ζωή, όπως και στον έλεγχο των οικιακών συσκευών, των αυτοκινήτων και άλλων μηχανών. Από την άλλη μεριά τα όρια ανάμεσα στην προσωπική και επιχειρηματική χρήση των συσκευών «εξασθενούν», αφού ολοένα και περισσότερες τάσεις στην αγορά των καταναλωτών εφαρμόζονται και στη βιομηχανία. Η κινητικότητα καθίσταται βασικός παράγοντας για την

ανάπτυξη της παραγωγικότητας και, στα επόμενα χρόνια, οι επιχειρήσεις προοδευτικά θα δημιουργούν τις δικές τους εφαρμογές για κινητές συσκευές.

Η φορητότητα των εφαρμογών, υποστηριζόμενη από υπηρεσίες νέφους, θα παρέχει νέα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα αλλά επίσης θα συνεπάγεται τη διαχείριση νέων προκλήσεων όπως είναι η ιδιωτικότητα, η ασφάλεια ή η απόδοση.

Επιπλέον, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων έχουν ήδη ξεκινήσει να επωφελούνται από ενδεχόμενες συνεργασίες με «παίκτες» ΟΤΤ (Over-The-Top⁵) για να διανέμουν στους τελικούς χρήστες πακετοποιημένες υπηρεσίες, με νέες απαιτήσεις κατ'αίτηση και με υψηλά ευέλικτο και προγραμματίσιμο τρόπο.

Υπό αυτό το πλαίσιο, μια εξέλιξη ενός καθολικού επιχειρηματικού μοντέλου των υπηρεσιών των κινητών παρόχων θα περιλαμβάνει την εξέλιξη των τρεχουσών υπηρεσιών καθώς επίσης και την ανάδειξη νέων υπηρεσιών, όπως αυτοματοποιημένες βιομηχανίες και έξυπνα περιβάλλοντα χρηστών, δημόσια ασφάλεια και υπηρεσίες κρίσιμων αποστολών (Mission Critical - MC). Αξιοποίηση δυνατοτήτων όπως τα μεγάλα δεδομένα (big data), η γειννίαση (proximity), οι γεω-κοινωνικές υπηρεσίες και πολλές άλλες θα συμβάλουν στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών.

Συνοψίζοντας την παραπάνω θεώρηση, ο ακόλουθος **Πίνακας 2** περιέχει κατηγοριοποιημένες όλες τις εφαρμογές από τη βιβλιογραφία, όπως αυτές παρέχονται από διάφορους Οργανισμούς Τυποποίησης (ITU⁶, ETSI⁷, 3GPP⁸), τοπικές-περιφερειακές δράσεις-προγράμματα

⁵ Over-The-Top Player (OTT): Ο όρος εμπλέκει τρίτους φορείς οι οποίοι παράγουν, ελέγχουν και διανέμουν υπηρεσίες πάνω από τον δικτυακό πάροχο (Network Operator - NO) / εικονικό δικτυακό πάροχο (Virtual Network Operator - VNO).

⁶ Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU) είναι ο εξειδικευμένος φορέας των Ηνωμένων Εθνών για τις τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε σχετικά: <https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>

⁷ Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute - ETSI) είναι ένας ανεξάρτητος, μη κερδοσκοπικός οργανισμός τυποποίησης στον τομέα των πληροφοριών και των επικοινωνιών. Το ETSI υποστηρίζει την ανάπτυξη και δοκιμή παγκόσμιων τεχνικών προτύπων για συστήματα, εφαρμογές και υπηρεσίες με δυνατότητα Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ). Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.etsi.org/>.

⁸ Το Εταιριστικό Έργο 3^{ης} Γενιάς (The 3rd Generation Partnership Project – 3GPP) είναι ένας γενικός όρος για έναν αριθμό οργανισμών τυποποίησης που αναπτύσσουν πρωτόκολλα για κινητές τηλεπικοινωνίες. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.3gpp.org/>.

(METIS⁹, RAS, 5GPPP¹⁰, 5GForum¹¹, 5GMF¹², IMT-2020¹³ Promotion group, 4G Americas¹⁴) και βιομηχανικούς συνασπισμούς (Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance¹⁵, Small Cell Forum) [7].

ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΧΡΗΣΗΣ

1. Εκτεταμένο βίντεο
2. Υπηρεσίες νέφους των παρόχων
3. Έξυπνη πόλη / Πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα
4. Έξυπνο γραφείο / Ενιαία Επιχειρηματική Επικοινωνία
5. Έξυπνο σπίτι
6. Μερικώς βίντεο HD/εικόνας σε στάδια/ανοιχτές συγκεντρώσεις
7. 50 + Mbps παντού
8. Υπηρεσίες ανάλογα με την τοποθεσία
9. Δίκτυα υπερ-χαμηλού κόστους
10. Οχήματα υψηλών ταχυτήτων
11. Μετακινούμενα σημεία επαυξανόμενης ζήτησης (hot spots)
12. Απομακρυσμένη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών
13. Δίκτυα οχημάτων
14. 3D συνδεσιμότητα
15. Διαχείριση οχημάτων/εφοδιαστική (επιμελητεία)
16. Έξυπνες φορητές συσκευές
17. Δίκτυα αισθητήρων
18. Ανάλυση δεδομένων
19. M2M - Μηχανή προς μηχανή
20. Κινητό βίντεο επιτήρησης-παρακολούθησης

⁹ Το πρόγραμμα METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society) αποτέλεσε μια μοναδική καινοτομική δράση με βασικό στόχο την ανάπτυξη του 5G ως το σύστημα κινητών και ασύρματων επικοινωνιών της επόμενης γενιάς. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://metis2020.com/>.

¹⁰ Ο φορέας 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) αποτελεί μια από κοινού πρωτοβουλία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της ευρωπαϊκής βιομηχανίας ICT (κατασκευαστές εξοπλισμού, τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι και πάροχοι υπηρεσιών, SMEs and ερευνητικών ινστιτούτων, για την προώθηση του 5G. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://5g-ppp.eu/>.

¹¹ Βασικός στόχος του 5G Forum είναι η διάθεση μιας ανοικτής πλατφόρμας όπου διάφοροι συθμετέχοντες φορείς από τη βιομηχανία θα είναι σε θέση ώστε να αναπτύξουν δράσεις συνεργασίας και R&D σχετικά με το 5G, για να βοηθήσουν στην επίτευξη της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <http://www.5gforum.org/html/en/main.php>.

¹² Το Fifth Generation Mobile Communication Promotion Forum (5GMF) προωθεί δράσεις έρευνας και ανάπτυξης για το 5G. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://5gmf.jp/en/>.

¹³ International Mobile Telecommunications-2020 (IMT 2020) είναι οι απαιτήσεις που εκδόθηκαν από τον Τομέα Ραδιοεπικοινωνιών ITU της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών το 2015 για δίκτυα, συσκευές και υπηρεσίες 5G. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://en.wikipedia.org/wiki/IMT-2020>.

¹⁴ 5G Americas είναι ένας βιομηχανικός εταιρικός συνασπισμός αποτελούμενος από κορυφαίους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και κατασκευαστές εξοπλισμού. Η Βασική αποστολή του συνίσταται στην υποστήριξη της προόδου και των δυνατοτήτων των ασύρματων τεχνολογιών LTE και της εξέλιξης προς το 5G, μέσα από ένα οικοσύστημα δικτύων, υπηρεσιών, εφαρμογών και συνδεδεμένων συσκευών στην Αμερική. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.5gamericas.org/>.

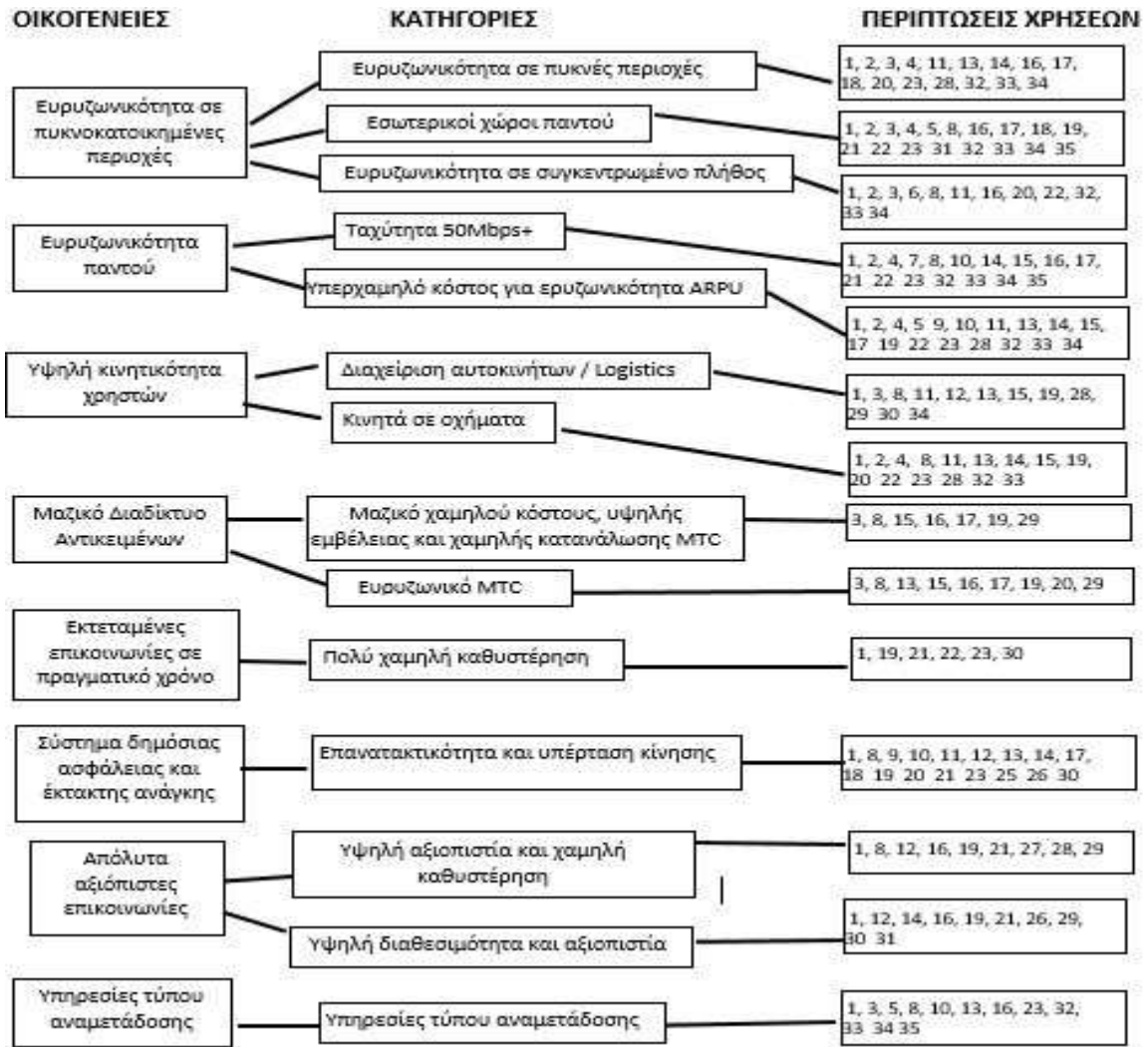
¹⁵ Το όραμα του φορέα NGMN Alliance είναι να παράσχει συστηματική καθοδήγηση για την επίτευξη καινοτόμων και οικονομικά προσιτών κινητών υπηρεσιών για τον τελικό χρήστη, με ιδιαίτερη έμφαση στην υποστήριξη της υλοποίησης του 5G, σε Πράσινα Δίκτυα στο 6G. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.ngmn.org/about-us/vision-mission.html#top>.

21. Άμεσο διαδίκτυο (μεγάλη διαθεσιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια, μικρή καθυστέρηση)
22. Παιχνίδια
23. Επαυξημένη/Εικονική/Υποβοηθούμενη πραγματικότητα
24. Ενέργειες διαχείρισης φυσικών καταστροφών
25. Στρατιωτικές ενέργειες
26. Κρίσιμες υπηρεσίες
27. Παρακολούθηση υποδομής/Εξυπνο δίκτυο
28. Έλεγχος κυκλοφορίας/Αυτόματη οδήγηση
29. Συνεργατικά ρομπότ
30. Διαχείριση εργαλείων/Επιχειρήσεις από απόσταση
31. Ηλεκτρονική υγεία
32. Πληροφόρηση-ειδήσεις
33. Υπηρεσίες τύπου αναμετάδοσης (τοπικές-περιφερειακές-εθνικές)
34. Υπηρεσίες περιεχομένου
35. Απομακρυσμένη εκπαίδευση

Πίνακας 2: Ταυτοποίηση των Περιπτώσεων Χρήσης.

Τα στοιχεία του **Πίνακα 2** ομαδοποιούνται σε 15 κατηγορίες οι οποίες επιπλέον μπορούν να υπαχθούν στις παρακάτω οκτώ (8) οικογένειες περιπτώσεων χρήσης.

Η **Εικόνα 5** απεικονίζει την ομαδοποίηση, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχουν ξεχωριστές κατηγορίες αφού μία περίπτωση χρήσης μπορεί να υπαχθεί σε μία ή περισσότερες κατηγορίες/οικογένειες [7].



Εικόνα 5: Κατηγοριοποίηση Περιπτώσεων Χρήσης (σύμφωνα με την NGMN Alliance).

Οι οικογένειες παρατίθενται ως εξής:

1. Ευρυζωνικότητα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές

Η οικογένεια αυτή περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με νέες υπηρεσίες και εφαρμογές σε μία πλήρως συνδεδεμένη κοινωνία με μεγάλο αριθμό συσκευών. Η ανάγκη για εκτεταμένη επικοινωνία εμφανίζεται σε κέντρα πόλεων, μεγάλα κτίρια, πολυκαταστήματα και σπουδαία γεγονότα. Η ανάγκη αυτή υπερτονίζεται με την αυξημένη ζήτηση για επαυξημένη πραγματικότητα, αναγνώριση περιεχομένου, αλληλεπίδραση πολλών χρηστών και δεξιότητες 3D.

2. Ευρυζωνικότητα παντού

Η οικογένεια αυτή εστιάζει στην παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών παντού, ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές όπως προάστια ή αγροτικές περιοχές, ειδικά όταν το κόστος είναι βασικός παράγοντας για την παροχή υπηρεσιών.

3. Υψηλή κινητικότητα χρηστών

Η οικογένεια αυτή τονίζει την αυξητική τάση για αιτήματα παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών σε αυτοκίνητα, τρένα και αεροπλάνα είτε για διασκέδαση είτε για πρόσβαση στο διαδίκτυο και για αυτόνομη οδήγηση είτε για πληροφορίες πραγματικού χρόνου.

4. Μαζικό Διαδίκτυο Αντικειμένων

Η οικογένεια αυτή καλύπτει τις νέες υπηρεσίες που σχετίζονται με την διάδοση συσκευών IoT, όπως αισθητήρες, κάμερες με ευρύ φάσμα δυνατοτήτων και απαιτήσεων και που αφορούν σε δύο τομείς επικοινωνίας¹⁶, ήτοι ανθρώπινου τύπου (HTC) και τύπου μηχανής (MTC).

5. Εκτεταμένες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο

Υψηλές απαιτήσεις για διάδραση σε πραγματικό χρόνο και αυτό βάσει της εφαρμογής μπορεί να απαιτεί υψηλό εύρος ζώνης, κινητικότητα, χαμηλή καθυστέρηση.

6. Σύστημα δημόσιας ασφάλειας και έκτακτης ανάγκης

Η οικογένεια αυτή καλύπτει τις περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με συστήματα εκτάκτων αναγκών και δημόσιας ασφάλειας. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να λειτουργεί και ως «γραμμή έκτακτης ανάγκης» με απαίτηση για υψηλά επίπεδα διαθεσιμότητας και με δυνατότητα λειτουργίας, ακόμα και σε περιπτώσεις ασταθούς σύνδεσης.

7. Απόλυτα αξιόπιστες επικοινωνίες

Η οικογένεια αυτή περιλαμβάνει τις νέες περιπτώσεις χρήσεων που σχετίζονται με το πλεονέκτημα της αξιόπιστης επικοινωνίας τύπου μηχανής (MTC) από βιομηχανίες, όχι μόνο στους τομείς της αυτοκίνησης, της υγείας και της υποβοηθούμενης διαβίωσης αλλά και στους κατασκευαστικούς τομείς ή την γεωργία. Οι απαιτήσεις αφορούν σε απομακρυσμένη λειτουργία και έλεγχο αλλά και σε πολύ μικρή δικτυακή καθυστέρηση.

8. Υπηρεσίες τύπου αναμετάδοσης

Η οικογένεια αυτή καλύπτει τις περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με την παραμετροποίηση της πληροφορίας σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο, συνδυασμένη με κανάλι ανάδρασης για διαδραστικές υπηρεσίες.

Στην **Εικόνα 5** εκτός της κατηγοριοποίησης των ταυτοποιημένων περιπτώσεων χρήσης, επισημαίνονται και οι κατηγορίες που οι μικροκυψέλες μπορούν να έχουν καθοριστικό ρόλο για να παρέχουν πολυμίσθωση και υπηρεσίες στα άκρα [7].

¹⁶ Βλέπε επίσης: Senel, K., Björnson, E., and Larsson, E.G. (2018): **Human and Machine Type Communications Can Coexist in Uplink Massive MIMO Systems**. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 6613-6617, doi: 10.1109/ICASSP.2018.8461726.

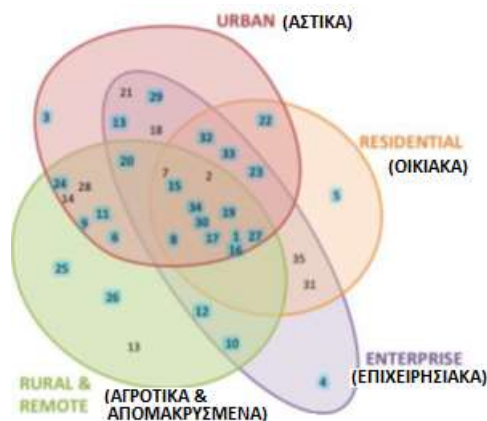
1.4. Αντιστοίχιση Σεναρίων - Περιπτώσεων Χρήσης

Αφού ορίστηκαν τα τέσσερα γενικά σενάρια - κατηγορίες και οι πιθανές χρήσεις τους για τις μελλοντικές 5G υπηρεσίες, το επόμενο λογικό βήμα είναι η αντιστοίχιση σε πιθανά λειτουργικά σενάρια. Ο **Πίνακας 3** συνοψίζει τις αντιστοιχίες αυτές.

ΟΙΚΙΑΚΑ (RESIDENTIAL)	1, 2, 5, 7, 8, 16, 17, 19, 22, 23, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΑ (ENTERPRISE)	1, 2, 4, 7, 10, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35
ΑΣΤΙΚΑ (URBAN)	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34
ΑΓΡΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΑ (RURAL & REMOTE)	1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 34

Πίνακας 3: Αντιστοίχιση των Ταυτοποιημένων Περιπτώσεων Χρήσης σε Κατηγορίες Σεναρίων κατά το SCF.

Τα στοιχεία από τον **Πίνακα 2** καταδεικνύουν την ύπαρξη υπερκαλύψεων οι οποίες διακρίνονται ευκρινώς στην παρακάτω **Εικόνα 6** (σύμφωνα με την [7]).



Εικόνα 6: Αντιστοίχιση των Ταυτοποιημένων Περιπτώσεων Χρήσης σε Κατηγορίες Σεναρίων κατά το SCF.

1.5. Σύντομη Ανάλυση Καθετοποιημένων Αγορών

Με βάση το επιχειρηματικό πλαίσιο αναφοράς και τα αντίστοιχα επιχειρηματικά μοντέλα, το επόμενο βήμα στις κινητές επικοινωνίες θα σχετίζεται άμεσα με την αυτοματοποίηση των βιομηχανιών και των διαδικασιών τους.

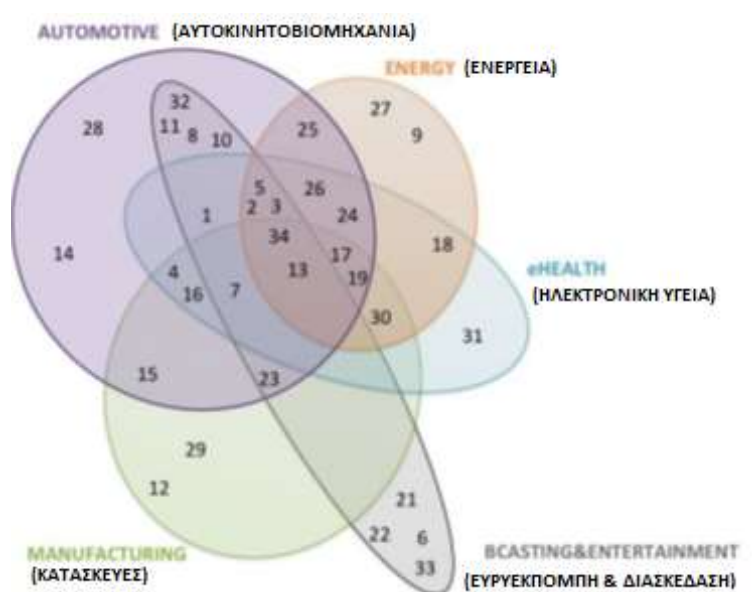
Η δημιουργία νέων υπηρεσιών για τομείς όπως π.χ. η υγεία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η διασκέδαση-ψυχαγωγία και η διάθεση ενέργειας δεν θα αρκείται μόνο στην επίτευξη απλής επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων αλλά θα οδηγήσει σε νέες θεωρήσεις-απαιτήσεις που θα χρειάζονται ευκολίες νεφοϋπολογιστικής, διαχείρισης μεγάλων δεδομένων, ασφάλειας και άλλων δυνατοτήτων που σχετίζονται με το υποκείμενο δίκτυο και τους συναφείς πόρους του.

Ο **Πίνακας 4** συνιστά μία ενδεικτική κατάταξη των υπηρεσιών σε πέντε κάθετες αγορές, ήτοι: **Ενέργεια (energy)**, **Αυτοκινητοβιομηχανία (Automotive)**, **Ηλεκτρονική Υγεία (eHealth)**, **Κατασκευές (Manufacturing)** και **Ευρυεκπομπή-Διασκέδαση (Broadcasting & Entertainment)**.

Ενέργεια (Energy)	2, 3, 5, 9, 13, 17, 18, 19, 24, 25, 26, 27, 30, 34
Αυτοκινητοβιομηχανία (Automotive)	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 23, 25, 26, 28, 32, 34
Ηλεκτρονική Υγεία (eHealth)	1, 2, 3, 4, 5, 7, 13, 16, 17, 18, 19, 24, 26, 30, 31, 34
Κατασκευές (Manufacturing)	4, 7, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 23, 29, 30, 34
Ευρυεκπομπή & Διασκέδαση (Broadcasting & Entertainment)	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 21, 22, 23, 32, 33, 34, 35

Πίνακας 4: Ενδεικτική Κατηγοριοποίηση των Περιπτώσεων Χρήσης που συσχετίζονται με τους κατά το 5G-PPP Καθετοποιημένους Τομείς της Αγοράς.

Όπως στην προηγούμενη κατηγοριοποίηση, οι ομάδες αποτελεσμάτων δεν είναι ξεχωριστές αλλά γίνεται επικάλυψη περιπτώσεων χρήσης σε μερικούς κάθετους τομείς, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7** (σύμφωνα με την [7]).



Εικόνα 7: Ενδεικτική Κατηγοριοποίηση των Περιπτώσεων Χρήσης που συσχετίζονται με τους κατά το 5G-PPP Καθετοποιημένους Τομείς της Αγοράς.

1.6. Τυπικά Σενάρια Ανάπτυξης Μικρών Κυψελών

Τα τυπικά σενάρια ανάπτυξης μικρών κυψελών είναι εγκαταστάσεις εξωτερικού χώρου σε αστικές και αγροτικές περιοχές και κυρίως εγκαταστάσεις εσωτερικού χώρου στο περιβάλλον των επιχειρήσεων.

Ο παρακάτω **Πίνακας 5** παρέχει μία συνοπτική εικόνα των διαφορετικών σεναρίων ανάπτυξης, με επιπλέον αναφορά στους αντίστοιχους στόχους, στους εμπλεκόμενους χρήστες, στα μέσα υλοποίησης και ιδίως στις τυπικές πυκνότητες ανάπτυξης των μικρών κυψελών [3].

Σενάριο ανάπτυξης	Στόχος	Αφορά σε	Υλοποίηση	Πυκνότητα ανάπτυξης
Οικιακά	Βελτίωση υπηρεσιών σε οικίες	Άτομα ή οικογένειες	Εσωτερικοί τοίχοι, οροφές, επιφάνειες τραπεζιών	Υψηλή / Μεσαία
Επιχειρησιακά	Εξυπηρέτηση πελατών σε αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα, στάδια ή αύξηση της παραγωγικότητας σε γραφεία, εργοστάσια, νοσοκομεία	Πελάτες ή υπαλλήλους εταιρειών	Εσωτερικοί τοίχοι, οροφές, εσωτερικοί/ εξωτερικοί θόλοι-στέγαστρα και άλλες δομικές ρυθμίσεις	Μεσαία / Υψηλή
Αστικά	Κάλυψη κενών στις αστικές περιοχές και παροχή πρόσθετης χωρητικότητας σε σημεία με μεγάλη κίνηση όπως καφετέριες, εμπορικά τετράγωνα, στάσεις λεωφορείων	Κατοίκους αστικών περιοχών ή επισκέπτες σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος.	Πλευρές των κτηρίων ή κατασκευές στους δρόμους (κολώνες φωτισμού, διαφημιστικές πινακίδες)	Υψηλή
Αγροτικά	Ικανοποίηση υποχρεώσεων για ενιαία πρόσβαση σε ευρυζωνικές υπηρεσίες	Αγροτικές κοινότητες	Εξωτερικοί χώροι σε στέγες ή κεραίες	Χαμηλή
Συγκοινωνιακοί διάδρομοι	Διασφάλιση παροχής υπηρεσιών σε αυτοκινητόδρομους, τρένα και δημόσιες μεταφορές	Επιβάτες, ταξιδιώτες, οδηγούς.	Κολώνες φωτισμού, σηματοδότες, επίγειοι σταθμοί, τούνελ, γέφυρες	Μέτρια / Υψηλή

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυψελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

Εναέρια	Ταχύτατη ανταπόκριση σε απρογραμμάτιστες ή ξαφνικές υψηλές ζητήσεις κίνησης.	Θεατές ή οργανωτές μεγάλων γεγονότων όπως φεστιβάλ και επείγουσες καταστάσεις όπως π.χ. πυροσβεστικές δράσεις.	Τοποθέτηση σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα	Χαμηλή / Μεσαία
----------------	--	--	---	-----------------

Πίνακας 5: Τυπικά Σενάρια Ανάπτυξης Μικρών Κυψελών (με αναφορά σε στόχους, εμπλεκόμενους χρήστες, μέσα υλοποίησης και πυκνότητα).

1.7. Παράγοντες που πρέπει να Ληφθούν Υπόψη στην Ανάπτυξη των Μικρών Κυψελών

Διαθεσιμότητα επαρκούς φάσματος: Τα υφιστάμενα δίκτυα 4G/LTE χρησιμοποιούν τις διαθέσιμες αδειοδοτημένες συχνότητες στη ζώνη ραδιοφάσματος των 3 GHz για κάλυψη ευρείας περιοχής. Εντούτοις η διαθεσιμότητα του φάσματος σε αυτές τις ζώνες υπόκειται σε περιορισμό λόγω του μεγάλου αριθμού άλλων ασύρματων συστημάτων που λειτουργούν στην ίδια περιοχή. Τα μελλοντικά συστήματα 5G NR¹⁷ (New Radio) θέτουν ακόμα μεγαλύτερες φασματικές απαιτήσεις για την υποστήριξη της διαδικασίας πύκνωσης των μικρών κυψελών που χρειάζονται για την πλήρωση στόχων επιδόσεων για υπηρεσίες βελτιωμένης κινητής ευρυζωνικής πρόσβασης (enhanced mobile broadband - eMBB). Προς το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προσφάτως εκχωρηθείσες ζώνες στις ενδιάμεσες ζώνες μεταξύ 3 και 7 GHz. Επιπλέον, εκχωρήσεις υψηλότερων ζωνών (mmWave) στις ζώνες μεταξύ 24 and 28 GHz θα παράσχουν ακόμα εκτενέστερο παρακείμενο ζωνικό εύρος που χρειάζεται για τη διάθεση υπηρεσιών eMBB.

Εντούτοις, τα χαρακτηριστικά ραδιοδιάδοσης στις ζώνες mmWave [84] θέτουν προκλήσεις λόγω των υψηλότερων απωλειών διαδρομής και των αυστηρών απαιτήσεων οπτικής επαφής (LoS). Αυτά τα χαρακτηριστικά περιορίζουν τη δυνητική κυψελική περιοχή, ιδίως σε αστικές περιοχές λόγω της παρουσίας πολλαπλών εμποδίων στη διαδρομή του σήματος όπως π.χ. ακανόνιστες κτιριακές υποδομές, φυλλώματα και ενδεχομένως τυχαίες σκιάσεις από ανθρώπους, οχήματα κ.ο.κ. Ένας άλλος περιορισμός στις ζώνες mmWave είναι η ανικανότητα της διάθεσης εσωτερικής κάλυψης από εξωτερικούς σταθμότοπους (sites), λόγω των υψηλών από το εξωτερικό προς το εσωτερικό απωλειών διείσδυσης όταν το σήμα διαδίδεται μέσω των τοίχων των κτιρίων. Αυτοί οι περιορισμοί ενδογενώς θέτουν την απαίτηση για μαζική ανάπτυξη μικρών κυψελών (σε αμφότερα τα εσωτερικά και τα εξωτερικά περιβάλλοντα) για την πλήρη επίτευξη των βελτιώσεων χωρητικότητας των mmWave 5G δικτύων.

Σταθεροί σύνδεσμοι υψηλής χωρητικότητας προς τις μικρές κυψέλες: Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν είναι μόνο ασύρματα δίκτυα πρόσβασης αλλά επίσης περιλαμβάνουν σταθερές ζεύξεις, οι οποίες συνδέουν τους σταθμούς βάσης σε ένα κινητό δίκτυο πυρήνα ή στο δημόσιο δίκτυο για σύνδεση με το Διαδίκτυο (Ιντερνετ). Αυτές οι ενσύρματες ή ασύρματες ζεύξεις (που βασιζονται σε οπτικές ίνες, μικροκυματικές ζεύξεις, δορυφόρους, κτλ.) οι οποίες συνδέουν τους κυψελοειδείς σταθμούς βάσης μεταξύ τους και με το δίκτυο πυρήνα είναι γνωστές ως συνδέσεις οπισθόζευξης¹⁸ (backhaul links). Επιπλέον, η εξέλιξη προς το 5G οδηγεί γρήγορα σε μία μετακίνηση προς νεφοπαγείς εικονικοποιημένες αρχιτεκτονικές ραδιοπρόσβασης, όπου χρησιμοποιούνται συνδέσεις εμπροσθόζευξης¹⁹ (fronthaul links) για τη

¹⁷ Η 5G NR είναι νέα τεχνολογία ραδιοπρόσβασης που αναπτύχθηκε από το 3GPP για το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας της πέμπτης γενιάς. Σχεδιάστηκε για να είναι το παγκόσμιο πρότυπο για τη ραδιοδιεπαφή των δικτύων 5G. Η μελέτη της NR εντός του 3GPP ξεκίνησε το 2015 και η πρώτη προδιαγραφή διατέθηκε από τα τέλη του 2017. Βλέπε επίσης: Kavanagh, S. (2020, March): *What is 5G New Radio (5G NR)*, available at <https://5g.co.uk/guides/what-is-5g-new-radio/>

¹⁸ Backhaul (οπισθόζευξη): Ο σύνδεσμος μεταξύ ενός σταθμού βάσης και του πυρήνα ενσύρματου δικτύου. Σε ένα ιεραρχικό δίκτυο τηλεπικοινωνιών, το τμήμα οπισθόζευξης του δικτύου περιλαμβάνει τους ενδιάμεσους συνδέσμους μεταξύ του κεντρικού δικτύου ή του δικτύου κορμού και τα μικρά υποδίκτυα στην άκρη του δικτύου. Ο πιο συνηθισμένος τύπος δικτύου στον οποίο υλοποιείται η οπισθόζευξη είναι ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

¹⁹ Fronthaul (εμπροσθόζευξη): Η σύνδεση μεταξύ των απομακρυσμένων ραδιο-κεφαλών (remote radio heads - RRH) και των Μονάδων Βασικής Ζώνης (Baseband Units - BBU). Το εμπροσθοζευκτικό τμήμα

σύνδεση απομακρυσμένων ραδιο-κεφαλών που κατανέμονται σε κυψελοειδείς σταθμότοπους (cell sites) με μία κοινή μονάδα ζώνης βάσης ([85], [86]). Η επιλογή της τεχνολογίας και ο σχεδιασμός των συνδέσεων οπισθόζευξης και εμπροσθόζευξης συνιστούν μείζον ζήτημα για την επιτευκτική απόδοση της συνολικής υπηρεσίας που προσφέρεται στο δίκτυο κινητών επικοινωνιών, μέσω των μικρών κυψελών. Τυχόν περιορισμοί σχετικά με τη χωρητικότητα των συνδέσεων οπισθόζευξης ή εμπροσθόζευξης ή εισαγόμενες καθυστερήσεις, θα δημιουργούσαν στενωπούς (bottlenecks) στη χωρητικότητα ή θα συνεισέφεραν στη διατεμαστική λανθάνουσα καθυστέρηση (end-to-end latency) που τυγχάνει εμπειρίας από μία υπηρεσία η οποία παρέχεται μέσω των μικρών κυψελών. Συνεπώς, οι σχετικά υψηλότερες απαιτήσεις χωρητικότητας και οι αυστηρές απαιτήσεις των υπηρεσιών 5G θα επηρέαζαν, κατά τρόπο ισχυρό, τον τύπο και το κόστος των υλοποιήσεων των συνδέσεων οπισθόζευξης και εμπροσθόζευξης.

Παροχή ενέργειας στις μικρές κυψέλες: Οι μικρές κυψέλες καταναλώνουν πολύ μικρότερη ενέργεια σε σχέση με τους σταθμούς βάσεων μακροκυψελών εξαιτίας της μικρής περιοχής που καλύπτουν (π.χ. μικρότερη ενέργεια εκπομπής) και των λιγότερων απαιτήσεων σε υποστηρικτικές υποδομές (π.χ. συστήματα ψύξης). Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη πυκνωση του δικτύου 5G δημιουργεί μια συνολική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι μικρές κυψέλες του 5G θα καταναλώνουν ενέργεια για σκοπούς και για υπολογιστικές εργασίες (π.χ. για επεξεργασία σήματος, νεφο-υπολογιστικές επεξεργασίες στα άκρα του δικτύου). Αυτές οι αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις θέτουν περιορισμούς στην πιθανή δικτυακή πυκνωση, εξαιτίας του μη βιώσιμου ενεργειακού κόστους και των επιπτώσεων στο περιβάλλον. Πράσινα ή αποτελεσματικά ενεργειακά σχέδια μικρών κυψελών είναι σημαντικά για να κατανικήσουν αυτό το ενεργειακό εμπόδιο της δικτυακής πυκνωσης.

Από κοινού χρήση των μικρών κυψελών: Η κοινή χρήση δικτυακών υποδομών είναι συνηθισμένη πρακτική στη βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας. Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι για την πρακτική υλοποίηση του «μερισμού» ή της από κοινού χρήσης στα κινητά δίκτυα, ήτοι: η παθητική κοινή χρήση και η ενεργή κοινή χρήση. Στην παθητική κοινή χρήση, πολλαπλοί MNOs²⁰ μοιράζονται τον ίδιο φυσικό χώρο και την υποδομή σταθμότοπου (κεραίες, στύλοι κοινής ωφέλειας, διαφημιστικά πάνελ, σταθερές εγκαταστάσεις για οπισθόζευξη κ.α.). Στην προσέγγιση της ενεργούς κοινής χρήσης, πολλαπλοί MNOs μοιράζονται μερικά – ή όλα – τα ενεργά δικτυακά στοιχεία (π.χ. υλισμικό σταθμών βάσεων, διεπαφές οπισθοζεύξεως ή ακόμα και στοιχεία του δικτύου πυρήνα). Η κοινή χρήση υποδομών είναι πολύ πιο επιτακτική για δίκτυα μικρών κυψελών λόγω της απαιτούμενης πυκνότητας στην ανάπτυξή τους και για την ευρύτερη ποικιλία των σεναρίων ανάπτυξής τους. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των ουδέτερων ξενιστών (neutral hosts²¹) ως βασικών φορέων για την ανάπτυξη μικρών κυψελών. Οι ουδέτεροι ξενιστές είναι εταιρίες που εκμεταλλεύονται την υποδομή τους (π.χ. κτίρια, στύλοι κοινής ωφέλειας, διαφημιστικά πάνελ κ.α.) για να αναπτύξουν και να παρέχουν μικρές κυψέλες για αποκλειστική ή για κοινή χρήση με άλλους MNOs που χρησιμοποιούν ενεργές λύσεις κοινής χρήσης. Η υπηρεσία του ουδέτερου ξενιστή συνιστά ένα μοντέλο Small-

μιας αρχιτεκτονικής τηλεπικοινωνιών C-RAN (Cloud-Radio Access Network) περιλαμβάνει τους ενδιάμεσους συνδέσμους μεταξύ των κεντροκοποιημένων ραδιοελεγκτών και των ραδιοκεφαλών ή των ιστών στην «άκρη» ενός κυψελοειδούς δικτύου. Τα τελευταία χρόνια οι εμπροσθοζεύξεις γίνονται πιο απαραίτητες, ιδίως με την επέκταση χρήσης του 5G.

²⁰ MNOs - Mobile Network Operators: Πάροχοι κινητών δικτύων – φορείς εκμετάλλευσης κινητών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω αναπτυγμένης υποδομής που συμπεριλαμβάνει και μικρές κυψέλες. Οι μικρές κυψέλες μπορεί να είναι ιδιόκτητες ή να μοιράζονται με τρίτους.

²¹ Neutral hosts: Οντότητες που παρέχουν υποδομές μικρών κυψελών για αποκλειστική ή κοινή χρήση από άλλους MNOs. Διαφέρουν από τους MNOs στο γεγονός ότι δεν παρέχουν τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

cells-as-a-service²² ([35], [87], [88]) που μειώνει σημαντικά τις δυσκολίες για κάποιους παίκτες της αγοράς οι οποίοι σκοπεύουν να αναπτύξουν πυκνές μικρές κυψέλες σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.

Ασφαλής λειτουργία των μικρών κυψελών: Η ανάπτυξη και λειτουργία των αναμεταδοτών ραδιοσυχνοτήτων (RF), όπως είναι οι μικρές κυψέλες, εγείρουν αμφιβολίες για την ασφάλεια εξαιτίας της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF). Συνεπώς, οι μικρές κυψέλες ως πηγές ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων θα πρέπει να υποβάλλονται σε αξιολόγηση για συμμόρφωση με τους κανονισμούς περί ανθρώπινης έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για την εξασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας [3].

1.8. Υποστηρικτικές Τεχνολογίες για τα Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας 5G

Η αύξηση του αριθμού των συσκευών και των απαιτήσεων των εφαρμογών θα καθορίσουν τις προδιαγραφές των μελλοντικών συστημάτων 5G. Πολλές εφαρμογές θα είναι διαθέσιμες σε κινητές συσκευές και μεταξύ πολλαπλών διαφορετικών ειδών συσκευών. Εκατομμύρια από τις έξυπνες συσκευές θα χρησιμοποιούν τις ενσωματωμένες δυνατότητες επικοινωνίας και ενσωματωμένους αισθητήρες. Για κάθε συσκευή ή υπηρεσία δεν θα απαιτούνται πολύ υψηλοί ρυθμοί δεδομένων. Η υποστήριξη ενός μεγάλου πλήθους επικοινωνιών από μηχανή-προς-μηχανή (M2M, Machine-to-Machine) στα δίκτυα 5G θα απαιτεί σε σημαντικό βαθμό τα ακόλουθα ([89], [90]):

- Υποστήριξη ενός τεράστιου πλήθους πλήθους συσκευών χαμηλού ρυθμού.
- Διατήρηση ελάχιστου ρυθμού δεδομένων πρακτικά σε όλες τις περιπτώσεις.
- Υποστήριξη μεταφοράς δεδομένων με πολύ χαμηλή καθυστέρηση.

Το σύνολο των απαιτήσεων και προκλήσεων των μελλοντικών δικτύων 5G πρέπει να περιλαμβάνουν: υψηλότερης κορυφής ρυθμούς δεδομένων (higher-peak data rates), αυξημένο αριθμό συσκευών, μεγαλύτερο όγκο κίνησης, μειωμένη καθυστέρηση, βελτιωμένη εσωτερική κάλυψη, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αυξημένη ασυμμετρία στην κίνηση δεδομένων, υψηλή αξιοπιστία, κ.α. Τα άνω προαπαιτούμενα είναι όλα προσανατολισμένα για να διευκολύνουν μία πλήρως κινητή και (δια-)συνδεδεμένη κοινωνία και μπορούν να ικανοποιηθούν μέσω ενός συνδυασμού των παρακάτω «συστατικών»: (i) επιπρόσθετο φάσμα συχνοτήτων, (ii) υψηλότερη φασματική απόδοση, (iii) υψηλότερη πυκνότητα κυψελών [38].

Οραματιζόμενες Εφαρμογές

Βάσει των απαιτήσεων των εφαρμογών, διακρίνονται οκτώ οικογένειες περιπτώσεων χρήσης, όπως στην **Εικόνα 8**:

1. Ευρυζωνικότητα σε πυκνές περιοχές: βίντεο, έξυπνο γραφείο, μερισμός HD βίντεο/εικόνας σε στάδια και ανοιχτές συγκεντρώσεις.
2. Ευρυζωνικότητα παντού: 50+ Mbps παντού, δίκτυα πολύ χαμηλού κόστους.
3. Υψηλότερη φορητότητα χρήση: τρένα υψηλών ταχυτήτων, εξ αποστάσεως υπολογιστική, συνδεσιμότητα 3D.

²² Small cell as a service (SCaaS): Η περίπτωση στην οποία οι μικρές κυψέλες παρέχονται στον πελάτη ως υπηρεσία. Βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: Kostopoulos, A., Chochliouros, I.P., Giannoulakis, I., Kourtis, A., and Kafetzakis, E. (2018): **Small Cells-As-A-Service in 5G Networks**. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), pp.1-5, doi: 10.1109/BMSB.2018.8436701.

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

4. Ισχυρό Διαδίκτυο των Αντικειμένων: έξυπνες φορητές συσκευές, δίκτυα αισθητήρων, κινητή βιντεοεπιτήρηση.
5. Απαιτητικές επικοινωνίες πραγματικού χρόνου: απτικό διαδίκτυο (ασύρματος ανθρώπινος έλεγχος σε πραγματικά και εικονικά αντικείμενα).
6. Επικοινωνία διάσωσης: διαχείριση φυσικών ή ανθρωπογενών καταστροφών.
7. Επικοινωνίες αυξημένης αξιοπιστίας: αυτοματοποιημένος έλεγχος κίνησης και οδήγησης, συνεργατικά ρομπότ, ηλεκτρονική υγεία, δημόσια ασφάλεια.
8. Υπηρεσίες τύπου εκπομπής όπως μετάδοση ειδήσεων και πληροφοριών, τοπικών και περιφερειακών [38].



Εικόνα 8: Γενική Εικόνα των Εφαρμογών που μπορούν να υποστηριχθούν από Συστήματα 5G [38].

1.8.1. Αυξάνοντας την Ασύρματη Χωρητικότητα

✓ Ανάγκη για Επιπλέον Φάσμα

Η διαθεσιμότητα του νέου φάσματος θα επιτρέψει την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων και της χωρητικότητας του δικτύου. Ωστόσο, αφού το φάσμα δεν είναι εν γένει επαρκές στις συχνότητες microwave, μεγάλα μέρη του νέου φάσματος θα είναι διαθέσιμα σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων (π.χ. συχνότητες millimeter waves, mmWaves) μεταξύ 3 και 300 GHz [89]. Σε συχνότητες πάνω από τα 6 GHz, μπορούν να υπάρχουν κανάλια πολύ μεγάλου εύρους (π.χ. 500 με 1000 MHz συνεχόμενου φάσματος) τα οποία να υποστηρίζουν πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και κινητή συνδεσιμότητα μικρής εμβέλειας. Στις συχνότητες αυτές, είναι αναμενόμενο το να υπάρχουν περιορισμοί διάδοσης, ιδιαίτερα όταν υπάρχει εισχώρηση στο εσωτερικό των κτιρίων από το εξωτερικό περιβάλλον. Από την άλλη μεριά, εξαιτίας των πολύ μικρών μήκων κύματος, ένας μεγάλος αριθμός μικρών κεραιών (Multiple Input, Multiple Output - MIMO) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για mmWaves.

Για την κάλυψη των ανωτέρω, η Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών 2015²³ (World Radiocommunication Conference 2015) αναγνώρισε ζώνες συχνοτήτων για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες στην L-ζώνη (1427 -1518 MHz) και στο χαμηλότερο μέρος της C-ζώνης (3.4 - 3.6 GHz).

Από την άλλη μεριά, φάσμα μικρότερο του 1 GHz είναι συγκεκριμένα χρήσιμο για κάλυψη εσωτερικών και αγροτικών περιοχών. Φάσμα που εξαιρείται αδείας ενδείκνυται να καθίσταται εκμεταλλεύσιμο σε χαμηλότερες συχνότητες, ως συμπλήρωμα, σε αποκλειστικά αδειοδοτούμενο φάσμα κινητής τηλεφωνίας. Αυτό υποδηλώνει τη συνύπαρξη ζωνών συχνοτήτων με χαρακτηριστικά διαφορετικής διάδοσης στο ίδιο σύστημα. Αυτή η διάσταση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν χρησιμοποιείται συνάθροιση φέρουσας (CA-Carrier Aggregation)²⁴ [91-92]. Η συνάθροιση φέρουσας, όπως έχει ήδη οριστεί από το LTE-A²⁵ [91], αναμένεται να έχει μεγαλύτερη διείσδυση στις αρχές της δεκαετίας του 2020. Μολαταύτα, θα χρειαστούν εξυπνότερες διατάξεις συνάθροισης φέρουσας για να επωφεληθούν από τη χρήση εφεδρικών συχνοτήτων, θεωρώντας ότι μερικά τμήματα ευρυζωνικότητας ενδέχεται να βρεθούν σε εντελώς ανόμιες ζώνες συχνοτήτων. Προς τούτο, οι Kishiyama et al. (2013) [100] έχουν προτείνει την ιδέα μιας «φαντασμικής κυψέλης» (phantom cell) όπου τα επίπεδα δεδομένων και ελέγχου είναι ξεχωριστά. Οι πληροφορίες ελέγχου αποστέλλονται μέσω υψηλής ισχύος κόμβων σε μικροκυματικές συχνότητες ενώ τα δεδομένα ωφέλιμου φόρτου αποστέλλονται μέσω χαμηλής ισχύος κόμβων σε συχνότητες mmWave.

Λαμβάνοντας υπόψη την ανεπαρκή διαθεσιμότητα φάσματος (scarce spectrum) και την πιθανότητα συνάθροισης φέρουσας, καθίσταται εμφανές το ότι απαιτούνται μεθοδολογίες βελτίωσης της φασματικής χρήσης. Η **γνωστική ή γνωσιακή ραδιοεπικοινωνία (Cognitive Radio - CR)** είναι μία καινοτόμος τεχνική ραδιοεπικοινωνιών οριζόμενη από λογισμικό [93], η οποία θεωρείται ως μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες που βελτιώνουν τη χρήση του συμφορημένου (congested) RF φάσματος. Ένα δίκτυο CR πρέπει να έχει γνώση της κατάστασης του περιεχόμενου ραδιοπεριβάλλοντος και να ρυθμίζει τις δικές του εκπομπές, με βάση την αντίστοιχη κατάσταση. Σε δίκτυα CR που είναι ελεύθερα από παρεμβολές, στους χρήστες CR μπορεί να επιτρέπεται να «δανείζονται» φάσμα μόνο όταν οι αδειοδοτημένοι χρήστες δεν το

²³ International Telecommunication Union (ITU) (2015): **World Radiocommunication Conference 2015 (WRC-15), Geneva, Switzerland, 2-27 November 2015**, available at: <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>. Η WRC-15 έχει επιτύχει συμφωνία για επιπλέον μέρη σε άλλες ζώνες συχνοτήτων, τα οποία ήταν καταναμεμημένα σε κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου δεν υπήρχε παρέμβαση με άλλες υπηρεσίες. Ωστόσο είναι πιθανόν, πέρα της συμφωνίας του WRC-15, να χρειαστεί πρόσθετο φάσμα για την παράδοση όλων των υπηρεσιών που έχει οραματιστεί το δίκτυο 5G.

²⁴ Carrier Aggregation: Η συνάθροιση φέρουσας είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στην ασύρματη επικοινωνία για την αύξηση του ρυθμού δεδομένων ανά χρήστη, με την οποία πολλαπλές πλοκάδες συχνοτήτων (frequency blocks) εκχωρούνται στον ίδιο χρήστη. Ο μέγιστος δυνατός ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη αυξάνεται όσο περισσότερες πλοκάδες συχνοτήτων εκχωρούνται σε έναν χρήστη. Το σύνολο του ρυθμού δεδομένων μίας κυψέλης επίσης αυξάνεται εξαιτίας μιας καλύτερης χρήσης πόρων. Επιπλέον, μέσω της CA είναι δυνατή η εξισορρόπηση φόρτου.

Η βασική ιδέα συνίσταται στη συνάθροιση ορισμένων συνιστωσών φέρουσας (carrier components) και η από κοινού χρήση τους για μετάδοση προς και από μεμονωμένα τερματικά. Μέχρι 5 συνιστώσες φέρουσας μπορούν να υποστούν συνάθροιση είτε ανήκουν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων είτε όχι, και αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει το ζωικό εύρος εκπομπής να φθάσει έως 100 MHz. Επίσης επιτρέπει τη χρήση κατατεμημένου φάσματος καθώς πάροχοι με κατατεμημένο φάσμα μπορούν να χρησιμοποιούν αυτό το χαρακτηριστικό για να προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων συνδυάζοντας όλα τα μικρά τμήματα σε μια επαρκώς μεγαλύτερη συνιστώσα.

²⁵ Το LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) είναι ένα πρότυπο κινητής επικοινωνίας και συνιστά μείζων βελτίωση του προτύπου LTE. Καθιερώθηκε από την 3GPP τον Μάρτιο του 2011 ως 3GPP Release 10. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>

χρησιμοποιούν [101]. Η υπόσχεση του CR για μεγαλύτερη ευελιξία στη χρήση φάσματος μπορεί να πραγματοποιηθεί καλύτερα όταν εφαρμόζεται σε μικρές κυψέλες, όπως σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου.

Με σκοπό την εκμετάλλευση της γνωστικής ραδιοεπικοινωνίας περισσότερο φάσμα συχνοτήτων θα πρέπει να είναι διαθέσιμο για τις μικρές κυψέλες. Τέτοια είναι π.χ. η περίπτωση την οποία έχει θεωρήσει η FCC²⁶ για εφαρμογή κοινής χρήσης της ζώνης 3550 - 3650 MHz [94]. Επίσης, η στρατηγική αυτή για τον μερισμό του αδειοδοτούμενου φάσματος είναι γνωστή ως Licensed or Authorized Shared Access (LSA ή ASA) (Αδειοδοτούμενη ή Εξουσιοδοτούμενη Μεριζόμενη Πρόσβαση²⁷) ([38], [95]).

✓ Ετερογενή Δίκτυα και Κυψέλες Υψηλότερης Πυκνότητας

Τα ετερογενή δίκτυα²⁸ (Heterogeneous Networks - HetNets) εμπλέκουν ένα «μείγμα» από τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών και τύπους κυψελών που μπορούν να εργάζονται από κοινού, για την εξυπηρέτηση ειδικού σκοπού. Οι κόμβοι χαμηλής ισχύος μπορεί να είναι μικρο-κυψέλες, πικο-κυψέλες, φεμτο-κυψέλες, relays (αναμεταδότες) και DAS-Distributed Antenna Systems (καταναμημένα συστήματα κεραιών).

Αν και οι μακρο-κυψέλες (macrocells) θα είναι ο θεμελιώδης πάροχος κάλυψης στα δίκτυα 5G, οι μικρές κυψέλες θα εφαρμοστούν ευρέως σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους ως συμπλήρωμα των μακρο-κυψελών.

Ένας θεμελιώδης, προς επίτευξη, στόχος των συστημάτων 5G είναι η επαύξηση της κάλυψης και των ρυθμών δεδομένων σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου. Σε ένα τέτοιο σενάριο, οι ίδιοι οι συνδρομητές θα εμπλέκονται στην ανάπτυξη ραδιοσταθμών βάσης σε οικίες και γραφεία. Ωστόσο, τεχνικές διαφορές θα αναδειχτούν ανάμεσα στα εσωτερικά και στα εξωτερικά περιβάλλοντα. Τα εσωτερικά περιβάλλοντα είναι πλουσιότερα σε σκέδαση διάχυση και με χαμηλότερη κινητικότητα, σε σχέση με τα εξωτερικά περιβάλλοντα. Εξάλλου τα εσωτερικά περιβάλλοντα εν γένει συνεπάγονται μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των σταθμών βάσης και των τερματικών, μαζί με μια υψηλότερη πιθανότητα οπτικής επαφής (LoS).

NSC - Neighborhood Small Cell (Μικροκυψέλη Γειτονιάς²⁹) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή μικρών κυψελών αναπτυγμένων κυρίως από τους τελικούς χρήστες ([96]-[98]). Οι αναπτύξεις των NSCs δεν θέτουν απαίτηση για την απόκτηση κάποιου ιστοτόπου και για ελάχιστο σχεδιασμό (προγραμματισμό) RF, ενώ μπορούν να χρησιμοποιούν υπάρχουσα ευρυζωνική οπισθοζεύξη (ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital Subscriber Line- DSL) /

²⁶ FCC- Federal Communication Commission: Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών των ΗΠΑ.

²⁷ Η Αδειοδοτούμενη Μεριζόμενη Πρόσβαση (Licensed Shared Access - LSA) και η Εξουσιοδοτούμενη Μεριζόμενη Πρόσβαση (Authorised Shared Access - ASA) είναι βασικές έννοιες οι οποίες επιτρέπουν τη χρήση φάσματος που έχει αδειοδοτηθεί για διεθνείς κινητές επικοινωνίες, από περισσότερες από μία οντότητες-«παικτές» της αγοράς. Θεωρητικά αυτό θα μπορούσε να αυξήσει τη χρήση του φάσματος επιτρέποντας «μεριζόμενη πρόσβαση» όπου και όταν ο βασικός αδειοδοτημένος κάτοχος των δικαιωμάτων χρήσης του φάσματος δεν χρησιμοποιεί τις συχνότητες που του έχουν εκχωρηθεί. Καθώς αυξάνουν οι απαιτήσεις για διαθεσιμότητα φάσματος, ρυθμιστικές στρατηγικές όπως οι παραπάνω LSA και ASA συγκεντρώνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και συνιστούν αντικείμενο ειδικών, κατά περίπτωση, μελετών.

²⁸ Στη δικτύωση υπολογιστών, ένα ετερογενές δίκτυο είναι ένα δίκτυο που συνδέει υπολογιστές και άλλες συσκευές όπου τα λειτουργικά συστήματα και τα πρωτόκολλα έχουν σημαντικές διαφορές. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Heterogeneous_network.

²⁹ Το δίκτυο μικροκυψέλης γειτονιάς (Neighborhood Small Cell - NSC), το οποίο χρησιμοποιεί εσωτερικούς μικρούς σταθμούς βάσης (Small Base Stations - SBSs) για την εξυπηρέτηση τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών χρηστών, θεωρείται ως μία οικονομικά αποδοτική λύση για την αντιμετώπιση απαιτήσεων της αυξανόμενης ασύρματης κίνησης.

καλωδιακή) για τη σύνδεση των κυψελών στο δίκτυο πυρήνα. Για εύκολη ανάπτυξη που βασίζεται σε βυσμάτωση και λειτουργία (plug and play), το NSC χρησιμοποιεί τις ιδέες που βρίσκονται πίσω από το δίκτυο SON (Self-Organizing Network)³⁰.

Ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες, όπως η MIMO [99], οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται σε εξωτερικά περιβάλλοντα σε κυψελοειδή συστήματα, μπορούν επίσης να τύχουν εφαρμογής και σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Αυτό σημαίνει ότι θα επηρεαστούν οι σχετικές επιδόσεις, λόγω της απόστασης μεταξύ των στοιχείων των κεραιών. Αυτή η απόσταση θα επηρεάσει την αμοιβαία συσχέτιση ανάμεσα στη ραδιοκαναλική διάλειψη (fading) πάνω στα σήματα διαφορετικών κεραιών, είτε στους σταθμούς βάσης είτε στους κινητούς σταθμούς. Στην περίπτωση των μακρο-ραδιοσταθμών βάσης, οι αποστάσεις αυτές είναι τυπικά της τάξης των 10λ. Για εσωτερικά περιβάλλοντα, ένας επαρκής διαχωρισμός είναι της τάξεως των 0,5λ. Ως εκ τούτου θα χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός κεραιών στους ραδιοσταθμούς βάσης, επιτρέποντας τη βελτίωση των ρυθμών δεδομένων καθώς και της χωρητικότητας του συστήματος.

Η χαμηλή κινητικότητα στις μικρές κυψέλες επιτρέπει υψηλότερη ακρίβεια και ενημέρωση για την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού. Αυτό το σενάριο επίσης επιτρέπει βελτιώσεις στους ρυθμούς δεδομένων και στη χωρητικότητα. Ωστόσο, υπάρχουν επιπλέον πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη ενώ απαιτούνται περισσότερες μελέτες και έρευνα για την αντιμετώπιση και την υπέρβαση των συναφών προβλημάτων. Χαρακτηριστικά προβλήματα μπορούν π.χ. να συνίστανται στο γεγονός ότι οι δέκτες στα τερματικά δεν θα είναι σε θέση να λειτουργούν χωρίς μακρο-κάλυψη καθόλη τη διάρκεια του χρόνου (λειτουργίας) όπως επίσης και στο γεγονός ότι τα «κληροδοτημένα» τερματικά (legacy terminals) δεν θα είναι ικανά για να επιτυγχάνουν πρόσβαση στα νέα συστήματα 5G [38].

✓ Υψηλότερη Επάρκεια Φάσματος και Παρεμβολές.

Τα συστήματα 5G θα πρέπει να είναι ικανά ώστε να ανταπεξέρχονται σε παρεμβολές που παράγονται από απογραμμάτιστες αναπτύξεις (δικτύου), ακόμα και κάτω από δυσμενή σενάρια, και θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις αναμενόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Οι περιπτώσεις εφαρμογών CoMP³¹ και Massive MIMO³² θα είναι ουσιώδεις στη βελτίωση του επιτευκτέου SINR³³ (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) στο σύστημα. Με επαρκείς τιμές

³⁰ Self-Organizing Network (SON): Ένα αυτό-οργανωμένο δίκτυο είναι μία τεχνολογία αυτοματισμού που έχει σχεδιαστεί για να καθιστά τον σχεδιασμό, τη διαμόρφωση, τη διαχείριση, τη βελτιστοποίηση και την επούλωση των κινητών δικτύων ραδιοπρόσβασης, απλούστερη και ταχύτερη. Επίσης οι σχετικές ιδιότητες αναφέρονται χαρακτηριστικά και ως “self-x properties” και περιλαμβάνουν τεχνικές αυτοματοποίησης της λειτουργίας δικτύου, με αυτόματη ρύθμιση των διαφορετικών παραμέτρων του δικτύου. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Self-organizing_network.

³¹ Coordinated Multipoint (CoMP): Η Συντονισμένη Πολυσημειακή βασίζεται σε εκπομπή και/ή λήψη σε πολλαπλούς διαχωρισμένους σταθμοτόπους με δυναμικό συντονισμό μεταξύ τους, ώστε να καθίσταται προδραστικά εφικτή η διαχείριση των παρεμβολών για τους χρήστες, με ιδιαίτερη έμφαση στους χρήστες στις άκρες των κυψελών.

³² Multiple Input Multiple Output - MIMO: Η Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος είναι μια μέθοδος για τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας μίας ραδιοζεύξης, χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές μετάδοσης και λήψης για την εκμετάλλευση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>. Η μέθοδος μαζικής MIMO (massive MIMO) είναι ένα σύνολο τεχνολογιών MIMO για ασύρματη επικοινωνία πολλαπλής διαδρομής, όπου πολλαπλοί χρήστες ή τερματικά επικοινωνούν μεταξύ τους, με το καθένα να συνδέεται σε μία ή περισσότερες κεραιές. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες επίσης βλέπε, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-user_MIMO.

³³ Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR): Ο λόγος σήματος προς παρεμβολές-θορύβου είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται στην μηχανική και τις επιστήμες το οποίο συγκρίνει το επίπεδο του

για το SINR, θα είναι δυνατή η βελτίωση της συνολικής επάρκειας φάσματος και η διατήρηση της συνέπειας στην ποιότητα των υπηρεσιών (QoS).

CoMP (Coordinated Multipoint)

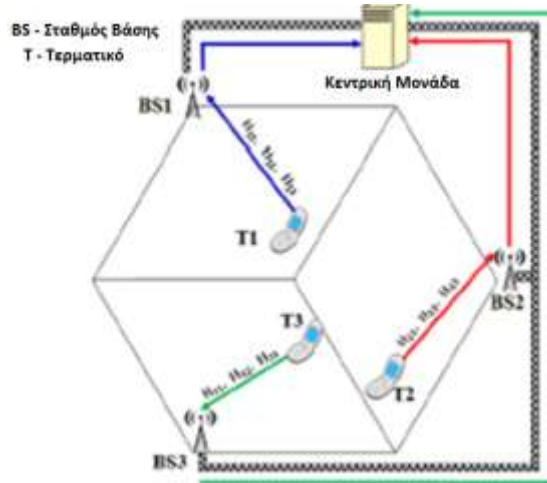
Η CoMP χρησιμοποιείται για να αντιμετωπιστούν παρεμβολές μεταξύ των κυψελών και μεταξύ των τομέων ώστε να βελτιωθεί η φασματική επάρκεια και για να επιτευχθούν ρυθμοί δεδομένων χρηστών πέρα από τις δυνατότητες που δίνει η αποκλειστική χρήση της MIMO, ιδιαίτερα στα άκρα των κυψελών [92]. Αυτό επιτυγχάνεται και με τη συσχέτιση σταθμών βάσεων για λήψη και μετάδοση.

Οι τεχνολογίες 3G και 4G επαναχρησιμοποιούν πλήρως τις συχνότητες, γεγονός που οδηγεί σε παρεμβολές μεταξύ των κυψελών. Κάνοντας χρήση της κατάτμησης είναι επίσης πιθανή η κατάληξη της χρήσης των ίδιων φασματικών πηγών. Η παρέμβαση αυτή μπορεί να καταστεί υπερβολικά μεγάλη, ειδικά για τα τερματικά στα άκρα, ανάμεσα σε τομείς (intra-site interference - παρεμβολή ενδοσταθμοτόπων) και ανάμεσα σε κυψέλες (inter-site interference - παρεμβολή μεταξύ των σταθμοτόπων).

Ένας σταθμός βάσης που διαχειρίζεται πολλαπλούς τομείς μπορεί να έχει μέρος της υποδομής του κατανεμημένο (π.χ. DAS) και συνδεδεμένο μέσω οπτικών ινών ή μέσω από άκρο-σε-άκρο ασύρματης σύνδεσης. Τομείς στα πλαίσια μιας κυψέλης μπορούν να συνεργαστούν σε ενδο-τοπικό CoMP ενώ οι σταθμοί βάσης μπορούν να συνεργαστούν σε δια-τοπικό CoMP. Η περίπτωση CoMP χρειάζεται για να ανταλλάσσει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των καναλιών και/ή για να προγραμματίζει χρονοπρόγραμμα αποφάσεων, μεταξύ των σταθμών βάσης. Επιπλέον, απαιτείται αυστηρός χρόνος συγχρονισμού μεταξύ των σταθμών βάσης και γρήγορη ανταλλαγή πληροφοριών, ώστε τα δεδομένα να καθίστανται διαθέσιμα σε όλους τους συνεργαζόμενους σταθμούς βάσης με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση. Η επεξεργασία των πληροφοριών ελέγχου γίνεται με προσαρμοστικό τρόπο για αποκεντρωμένη ή κεντροποιημένη συνεργασία.

Η **Εικόνα 9** απεικονίζει μια κεντροποιημένη έκδοση του CoMP. Κάθε τερματικό συσχετίζεται με έναν μεμονωμένο σταθμό βάσης (BS) ως μια «άγκυρα» για σκοπούς συντονισμού. Τα τερματικά πρέπει να εκτελούν εκτιμήσεις καναλιών (Hij) και μετά να τροφοδοτούν αυτές τις πληροφορίες πίσω προς το σταθμό βάσης «άγκυρα». Από τη στιγμή συγκέντρωσης της πληροφορίας, κάθε σταθμός βάσης την προωθεί προς την κεντρική μονάδα η οποία είναι υπεύθυνη για να αποφασίζει το χρονοπρογραμματισμό και τις παραμέτρους μετάδοσης. Τελικά, η νέα υπολογισθείσα πληροφορία αποστέλλεται πίσω, προς το πλήρες σύνολο των συμμετεχόντων σταθμών βάσης ([38], [102]).

επιθυμητού σήματος με το επίπεδο του παρασκηνιακού θορύβου για να δώσει θεωρητικά ανώτερα όρια στην χωρητικότητα καναλιού σε ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, όπως τα δίκτυα.

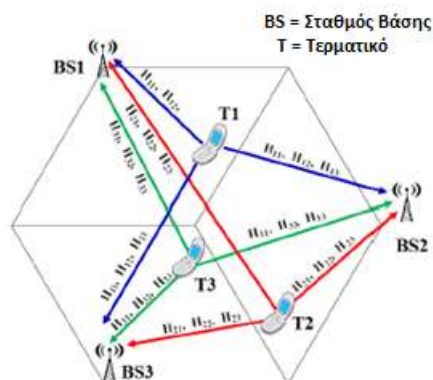


Εικόνα 9: Κεντροποιημένη Αρχιτεκτονική CoMP.

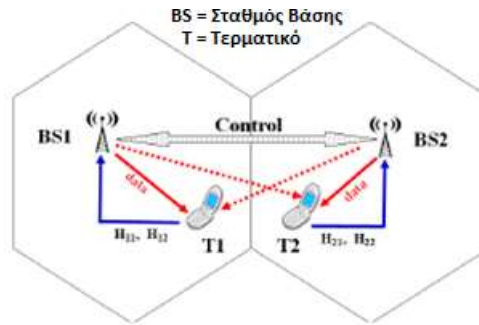
Σε μία μορφή κατανεμημένης προσέγγισης (Εικόνα 10), οι καναλικές πληροφορίες (H_{ij}) που συγκεντρώνονται από τα τερματικά θα καθίστανται διαθέσιμες σε κάθε συνεργαζόμενο σταθμό βάσης. Κάθε BS θα τρέχει τον ίδιο χρονοπρογραμματισμό (scheduler), επομένως δεν θα είναι πλέον απαραίτητες οι ζεύξεις μεταξύ BS. Οι κόμβοι θα παράγουν τις ίδιες αποφάσεις εξόδου και συνεπώς θα λαμβάνονται οι ίδιες παράμετροι μετάδοσης, ενώ τα ίδια τερματικά θα επιλέγονται σε ολόκληρη τη ομάδα σταθμών βάσης.

Για την παρουσίαση των διατάξεων συντονισμού (coordination schemes) που προκύπτουν από την επεξεργασία μεριζόμενης καναλικής εκτίμησης, προκύπτουν δύο εναλλακτικές:

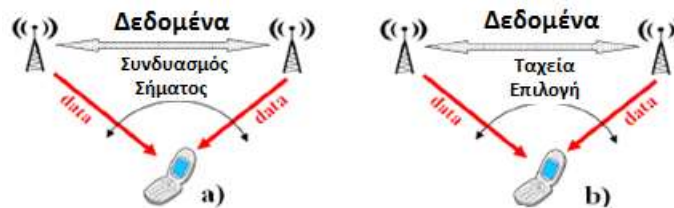
1. **Συντονισμένος χρονοπρογραμματισμός (coordinated scheduling):** Είναι μία απλή προσέγγιση όπου τα δεδομένα των χρηστών μεταδίδονται μόνο από έναν μεμονωμένο σταθμό βάσης κάθε φορά (Εικόνα 11). Αυτός ο σταθμός βάσης μπορεί να επιλέγεται δυναμικά, ακόμα και όταν διαφορετικοί σταθμοί βάσης μοιράζονται πληροφορίες ελέγχου.
2. **Τεχνική συνεργατικής επεξεργασίας (joint processing technique):** Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται πολλαπλοί σταθμοί βάσης για την μετάδοση δεδομένων χρηστών σε ένα τερματικό την ίδια στιγμή (Εικόνα 12a) ή μία παραλλαγή που χρησιμοποιεί μία προσέγγιση ταχείας επιλογής βάσης σταθμού και μόνο ένας από αυτούς μεταδίδει δεδομένα τη φορά (Εικόνα 12b).



Εικόνα 10: Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική CoMP.



Εικόνα 11: Προσέγγιση Συντονισμένου Χρονοπρογραμματισμού.



Εικόνα 12: Τεχνικές Συνεργατικής Επεξεργασίας:

a) Συνεργατική Μετάδοση, b) Δυναμική Επιλογή Κυψέλης.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που μπορούν να εκτελούν προσαρμογή ζεύξης που βασίζεται σε προβλέψιμες τιμές του SINR. Η πρόβλεψη ενεργοποιείται με ανταλλαγή πληροφοριών εκχώρησης πόρων σε μία συστάδα (cluster) συνεργαζόμενων κυψελών που εισάγουν μέτρια κίνηση οπισθοζεύξης. Άλλες μέθοδοι ενδέχεται να απαιτούν έναν πολύ υψηλότερο δυφιακό ρυθμό (bit rate) για ανταλλαγή πληροφοριών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η περίπτωση χρήσης CoMP δημιουργεί φόρτο στη ραδιοδιεπαφή (air interface) και πάνω στην οπισθοζεύξη. Στην πράξη, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός σταθμών βάσης (BSs) μπορεί να συνεργαστεί, ώστε να διατηρείται διαχειρίσιμο το συνολικό επίβαρο (overhead). Η ενοποίηση ενός μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών σε CoMP αποτελεί μια νέα πρόκληση, αφού οι μικρές κυψέλες έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά [103].

Το CoMP μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη. Η υλοποίηση CoMP θέτει διαφορετικές απαιτήσεις στη διεκπεραιωτικότητα της οπισθοζεύξης και στην καθυστέρηση, καθώς ενδεχόμενη ακατάλληλη καθυστέρηση θα μπορούσε να προκαλέσει το να καταστούν παρωχημένες οι προκύπτουσες καναλικές πληροφορίες. Πρόσθετες απαιτήσεις περιλαμβάνουν: υψηλότερη πολυπλοκότητα, αυξημένο συγχρονισμό μεταξύ συνεργαζόμενων σταθμών βάσης που εντοπίζονται τοποθετημένοι σε μία μέγιστη απόσταση, καναλική εκτίμηση πολλαπλών κυψελών, περισσότερο επίβαρο. Ωστόσο, καλύτερες λύσεις συγκριτικά με τις τρέχουσες χρειάζονται για όλες αυτές τις πτυχές πριν από την ενοποίηση του CoMP σε κινητά δίκτυα της επόμενης γενιάς.

Η μετάδοση και λήψη CoMP φαίνονται ως μία πολλά υποσχόμενη ομάδα τεχνικών, οι οποίες όμως απαιτούν περαιτέρω έρευνα μιας και δείχνουν ότι έχουν μεγάλες προοπτικές αλλά με πολλά θέματα που παραμένουν ακόμα «ανοικτά» [38].

Massive MIMO

Η τεχνική massive MIMO – ή MIMO Μεγάλης Κλίμακας – είναι μία μορφή MIMO πολλών χρηστών η οποία χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό κεραιών ανά σταθμότοπο (site) για την πολυπλεξία μηνυμάτων ταυτόχρονα για διάφορες αυτόνομες συσκευές σε κάθε πόρο χρόνου-συχνότητας. Ως ένα «συμπλήρωμα» της MIMO, είναι δυνατόν ώστε να εστιάζει την

εκπεμπόμενη ενέργεια προς σκοπούμενες κατευθύνσεις χρησιμοποιώντας στενοζωνικό σχηματισμό δέσμης (narrowband beamforming) με στόχο τον περιορισμό ενδο-κυψελικών (intra-cell) παρεμβολών και διακυψελικών (inter-cell) παρεμβολών, παρέχοντας ώθηση των συστημάτων προς ένα περιβάλλον περιορισμένου θορύβου ([114], [115]).

Το CSI³⁴ (Channel-State Information - Πληροφορίες Καναλικής Κατάστασης) παίζει έναν σημαντικό ρόλο σε ένα σύστημα πολλών χρηστών MIMO ώστε να μπορούν να συγκεντρωθούν οι καναλικές πληροφορίες της πρόσθιας (forward) ζεύξης και της ανάστροφης (reverse) ζεύξης. Έχει ανακαλυφθεί [104] ότι ακόμα και σε μία εκτίμηση ενός πολύ θορυβώδους καναλιού, περισσότερες κεραιές στο BS παρέχουν μία θετική συνεισφορά. Στην ακραία περίπτωση της θεώρησης ενός άπειρου αριθμού κεραιών, τα αποτελέσματα της γρήγορης διάλειτουργίας και του ασυσχέτιστου θορύβου, τείνουν στο μηδέν. Εξάλλου, είναι πάντα πιθανή η ανάκτηση από έναν χαμηλό SNR προσθέτοντας έναν επαρκή αριθμό κεραιών.

Η διάθεση ενός μεγάλου αριθμού κεραιών επίσης απαιτεί περισσότερες πιλοτικές δράσεις (pilots) για καναλικές εκτιμήσεις και αυτό σημαίνει λιγότερους πόρους για δεδομένα των χρηστών. Ταυτόχρονα, αυτός ο μεγάλος αριθμός πιλότων επιδρά στη φασματική επάρκεια. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης, γίνεται επανάχρηση ορθογωνικών πιλοτικών ακολουθιών (orthogonal pilot sequences). Αυτή η περίπτωση είναι γνωστική ως « πιλοτική μόλυνση»³⁵ (“pilot contamination”) ([110] - [113]).

Έτσι, για παράδειγμα, όταν ένας BS λαμβάνει τις CSI που συσχετίζονται με τα δικά του τερματικά, μπορεί ακούσια να μάθει για τις CSI των τερματικών που ανήκουν σε άλλες κυψέλες, αυτές με τις οποίες μοιράζεται την ίδια πιλοτική ακολουθία. Τα πιλοτικά σήματα που λαμβάνονται από έναν BS έχουν υποστεί μόλυνση από πιλότους που εκπέμπονται από τερματικά σε άλλες κυψέλες. Ερευνητικές δράσεις τελούν υπό εξέλιξη για την αντιμετώπιση τω εν λόγω προβλήματος και για την αναζήτηση νέων διατάξεων για αποτελεσματική απόκτηση CSI, ακόμα και όταν ο χρήστης βρίσκεται σε κίνηση ([104], [110]).

Η τεχνική massive MIMO είναι ιδανική για υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων αφού ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων κεραιών μπορεί να τοποθετηθεί εντός πρακτικών παραγόντων μορφής (form factors). Η αύξηση του αριθμού των κεραιών αυξάνει την πολυπλοκότητα και τα κόστη, επομένως αυτή η επιλογή θα πρέπει να αναπτύσσεται βαθμιαία αν και γενικά το θέμα είναι υπό έρευνα. Θα απαιτηθούν νέα μοντέλα κεραιών σε χαμηλότερες συχνότητες.

✓ **Αυξημένη Ασυμμετρία**

Η αυξημένη ασυμμετρία που προτείνεται από την αυξανόμενη κίνηση βίντεο, καθιστά σαφή την καλώς γνωστή έλλειψη ευελιξίας της Συχνοδιακριτικής Αμφίδρομης Επικοινωνίας

³⁴ Channel State Information (CSI): Πληροφορίες Καναλικής Κατάστασης. Στις ασύρματες επικοινωνίες, ο όρος CSI αναφέρεται σε γνωστές καναλικές ιδιότητες μίας ζεύξης επικοινωνίας. Αυτές οι πληροφορίες περιγράφουν το πώς μεταδίδεται ένα σήμα από τον πομπό προς το δέκτη και αναπαριστούν το συνδυαστικό αποτέλεσμα (π.χ., σκέδαση, διάλειτουργία και πτώση ισχύος με την απόσταση). Η μέθοδος γενικά καλείται ως «καναλική εκτίμηση» (“channel estimation”).

Η CSI καθιστά εφικτή την προσαρμογή εκπομπών σε τρέχουσες καναλικές συνθήκες, το οποίο γεγονός είναι κρίσιμο για την επίτευξη αξιόπιστων επικοινωνιών με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε συστήματα πολλαπλών κεραιών.

³⁵ Η περίπτωση «πιλοτικής μόλυνσης» (pilot contamination) συμβαίνει όταν δύο τερματικά χρησιμοποιούν την ίδια πιλοτική ακολουθία (που επίσης είναι γνωστή και ως το σήμα αναφοράς (reference signal)). Μπορεί να καταστρέφεται χρησιμοποιώντας διαφορετικούς πιλότους σε παρακείμενες κυψέλες. Για παράδειγμα, μέσω της διάθεσης ενός μεγάλου αριθμού πιλοτικών ακολουθιών και μέσω τυχαίας μεταγωγής μεταξύ αυτών.

(Frequency-Division Duplex - FDD³⁶) αφού έχει περισσότερες δυσκολίες στην αντιμετώπιση θεμάτων ασυμμετρίας.

Η ασυμμετρική συνάρθρωση φέρουσας (CA) FDD έχει θεωρηθεί ως λύση. Η συνάρθρωση φέρουσας (CA) αποτελεί μέρος του LTE-A και επιτρέπει τον συνδυασμό έως και πέντε καναλιών, καθένα των 20 MHz. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της FDD, η ιδέα είναι η συνάρθρωση περισσότερων ζωνών στην κατερχόμενη ζεύξης από ό,τι στην ανερχόμενη ζεύξη. Για σιγουριά, η TDD³⁷ είναι και αυτή υπό θεώρηση ως μία επιλογή, λόγω της ευελιξίας της και του γεγονότος ότι και αυτή μπορεί επίσης να υποστηρίξει CA.

1.8.2. Αρχιτεκτονική

✓ Δίκτυο Πρόσβασης

Το δίκτυο 5G θα λειτουργεί σε ένα υψηλά ετερογενές περιβάλλον στο οποίο θα συνυπάρχουν πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης. Μία τεχνολογία είναι η επικοινωνία D2D (Device-to-Device) η οποία επιτρέπει σε κοντινές συσκευές να εγκαθιστούν κατά περίπτωση τοπικές ζεύξεις, ώστε η κίνηση να κατευθύνεται απευθείας μεταξύ τους αντί να μεταφέρεται μέσω του σταθμού βάσης. Η επικοινωνία D2D μειώνει την καθυστέρηση και την κατανάλωση ισχύος, αυξάνει τους ρυθμούς δεδομένων και δημιουργεί υπηρεσίες βασισμένες στην εγγύτητα (όπως π.χ. παιχνίδι εγγύτητας μεταξύ πολλαπλών χρηστών).

Η επικοινωνία D2D επίσης δημιουργεί τη δυνατότητα μετατροπής μίας τερματικής συσκευής σε «ενδιάμεσο»-«μεσολαβητή» για άλλη κοντινή συσκευή, με σκοπό να καταστήσει εφικτή την πρόσβαση στο σταθμό βάσης. Τούτο αναφέρεται ως αναμεταδότης D2D για κίνηση σταθμού βάσης. Έτσι η συσκευή γίνεται αναμεταδότης D2D για την αποσυμφόρηση της κίνησης. Γεννιούνται βέβαια νέα προβλήματα προς επίλυση, όπως είναι η διαδικασία αναζήτησης υποψήφιων αναμεταδοτών, καιροσκοπική επιλογή αναμεταδότη, διαχείριση παρεμβολών, ελαχιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης και ανάπτυξη πρωτοκόλλου.

Υπάρχει κλίμακα επιλογών σχετικά με τις **τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RAT)** που θα χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα 5G. Μία πιθανότητα είναι για μία νέα μοναδική ενοποιημένη RAT που θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί και να ρυθμιστεί για διαφορετικές συχνότητες και περιπτώσεις χρήσεων. Η θετική άποψη αυτής της εναλλακτικής είναι ότι οι πάροχοι δικτύου δεν θα χρειάζονται να διαχειρίζονται πολλαπλά δίκτυα πρόσβασης, αν και πρέπει να σχεδιαστεί

³⁶ Frequency-Division Duplex (FDD): Η Συχνοδιαιρετική Αμφίδρομη Επικοινωνία είναι μία μέθοδος για την εγκατάσταση μίας πλήρως αμφίδρομης ζεύξης επικοινωνίας που χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές ραδιοσυχνότητες για την λειτουργία του πομπού και του δέκτη. Η λειτουργία FDD κανονικά εκχωρεί στον πομπό και στο δέκτη διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας. Μία συχνότητα χρησιμοποιείται για την επικοινωνία κατά τη μία κατεύθυνση, ενώ η άλλη συχνότητα απαιτείται για την επικοινωνία στην αντίθετη κατεύθυνση. Οι συχνότητες κατεύθυνσης εκπομπής και λήψης διαχωρίζονται μέσω μιας καθορισμένης μετατόπισης συχνότητας (frequency offset).

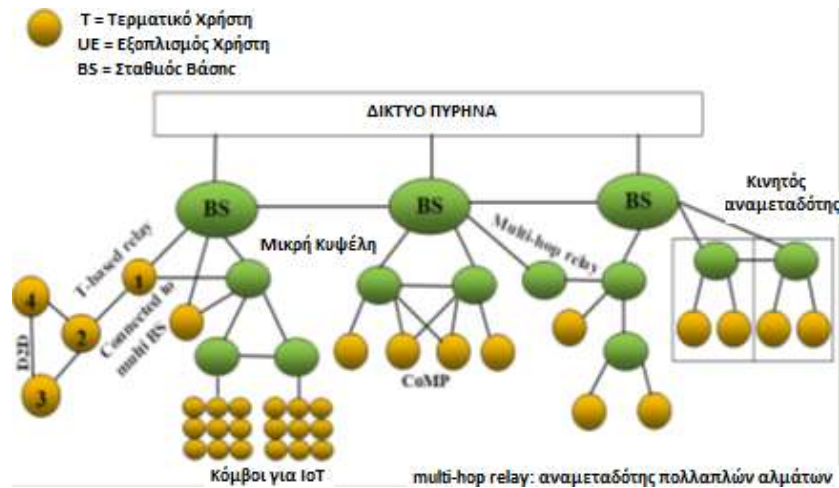
³⁷ Time-Division Duplex (TDD): Η Χρονοδιαιρετική Αμφίδρομη Επικοινωνία συνεπάγεται ότι η ανερχόμενη ζεύξη (uplink - UL) και η κατερχόμενη ζεύξη (downlink - DL) λειτουργούν σε διαφορετικές, μη επικαλυπτόμενες χρονοθυρίδες. Η TDD αναφέρεται σε αμφίδρομες ζεύξεις επικοινωνίας όπου η ανερχόμενη ζεύξη διαχωρίζεται από την κατερχόμενη ζεύξη μέσω της καταχώρισης διαφορετικών χρονοθυρίδων στην ίδια ζώνη συχνότητας. Είναι μία διάταξη εκπομπής που επιτρέπει ασύμμετρη ροή για τη μετάδοση δεδομένων UL και DL. Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (time division multiplexing) διαχωρίζει τα σήματα ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης προσαρμόζοντας πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία σε μία ημιαμφίδρομη ζεύξη επικοινωνίας. Αυτή η μέθοδος συνεπάγεται αρκετά πλεονεκτήματα στην περίπτωση όπου υπάρχει μια ασυμμετρία μεταξύ των ρυθμών δεδομένων των UL και DL. Η TDD διαιρεί ένα ρεύμα δεδομένων σε πλαίσια και εκχωρεί διαφορετικές χρονοθυρίδες για την προώθηση και την αναστροφή εκπομπών, συνεπώς επιτρέποντας και τους δύο τύπους εκπομπής να μερίζονται το ίδιο μέσο εκπομπής.

μία αρχική φάση μετάβασης προς τη νέα RAT. Αντιθέτως, η υποστήριξη πολλαπλών RATs με ενδεχομένως διαφορετικές ραδιοδιεπαφές, μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται ενεργώντας ως μία ενιαία μονάδα [105].

Για την παροχή δικτυακών λειτουργιών εφαρμογών με γνώση της πρόσβασης (access agnostic), μπορούν να ληφθούν υπόψη άλλες RATs, συμπεριλαμβανομένης και της περίπτωσης WiFi, του σταθερού δικτύου και της εξέλιξης τρέχοντων εναλλακτικών των δικτύων 4G. Το τελευταίο θα παρέχει οπισθόδρομη συμβατότητα για συσκευές που δεν μπορούν να χρησιμοποιούν τις νέες RATs, διευκολύνοντας τη μετάβαση προς τα δίκτυα 5G.

Μία εναλλακτική που μπορεί να ληφθεί υπόψη είναι η ιδέα του δικτύου ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται σε υποδομές νέφους (**Cloud Radio Access Network - C-RAN³⁸**), το οποίο υιοθετεί μία κεντροκοποιημένη αρχιτεκτονική που επιτρέπει τη συνάθροιση φέρουσας μεταξύ φερουσών μακρο-κυψελών και μικρών κυψελών. Έτσι είναι δυνατή η συνδεσιμότητα και η κινητικότητα στα πλαίσια της κάλυψης μέσω των μακρο-κυψελών και η επίτευξη υψηλότερης διεκπεραιωτικότητας και χωρητικότητας σε μικρές κυψέλες που αποκαλούνται ως “add-ons”. Αυτή η προηγμένη αρχιτεκτονική C-RAN διαχειρίζεται συνάθροιση φέρουσας (CA) και μετταπομπές (Handoffs - HOs) σε κεντροκοποιημένες μονάδες σταθμών βάσης (BBUs), μειώνοντας έτσι δραστικά την κίνηση σηματοδοσίας στο δίκτυο πυρήνα [106].

Νέες επικοινωνιακές διατάξεις όπως οι M2M και D2D θα επιτρέπουν διαφορετικά είδη συνδέσεων: τερματικό προς τερματικό, μικρή κυψέλη προς μικρή κυψέλη, μικρή κυψέλη προς σταθμό βάσης, κόμβο αναμετάδοσης προς σταθμό βάσης, κόμβο αναμετάδοσης προς κόμβο αναμετάδοσης. Πολλαπλές συνδέσεις και κινητοί αναμεταδότες θα είναι επίσης εφικτοί (**Εικόνα 13**). Η αναμετάδοση μπορεί να αλλάξει δυναμικά την τοπολογία των κυψελωιδών συστημάτων και επίσης να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος. Μία δομή πολλαπλών αλμάτων³⁹ (multi-hop) [116] μπορεί επαρκώς να υποστηρίξει την πρόσβαση των M2M τερματικών.



Εικόνα 13: Δίκτυο Πρόσβασης για Συστήματα 5G.

³⁸ C-RAN: Είναι μία κεντροκοποιημένη αρχιτεκτονική, βασισμένη σε υπολογιστική νέφους για δίκτυα ραδιοπρόσβασης που υποστηρίζουν 2G, 3G και 4G και μελλοντικά ασύρματα πρότυπα επικοινωνίας.

³⁹ Η δρομολόγηση μέσω πολλαπλών αλμάτων είναι ένας τύπος επικοινωνίας σε ραδιοδίκτυα όπου η περιοχή κάλυψης του δικτύου είναι μεγαλύτερη από τη ραδιοκάλυψη απλών κόμβων. Συνεπώς, για να καταστεί εφικτή η πρόσβαση σε έναν προορισμό ένας κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει άλλους κόμβους ως αναμεταδότες. Βλέπε επίσης, π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-hop_routing

Ένας τρόπος λειτουργίας βασιζόμενος στον εξοπλισμό χρήστη (User Equipment - UE) μπορεί να δομήσει νέες υπηρεσίες M2M επιτρέποντας στον εξοπλισμό του χρήστη να είναι ένας κεντρικός κόμβος πρόσβασης στο δίκτυο πυρήνα στα δίκτυα IoT (Διαδίκτυο των Πραγμάτων) [107]. Η διατεματική (από άκρο σε άκρο) καθυστέρηση είναι αποφασιστικής σημασίας για τη δημιουργία νέων εφαρμογών πραγματικού χρόνου όπως είναι η ασφάλεια και η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality - AR) και η εικονική (Virtual Reality - VR) πραγματικότητα. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν καινοτομίες στη ραδιοδιεπαφή, στο υλισμικό (HW), στη στοίβα πρωτοκόλλων, στο δικτυακό κορμό, στην οπισθοζεύξη και στη δικτυακή αρχιτεκτονική.

✓ Δίκτυο Πυρήνα και Οπισθοζεύξη

Για τις εφαρμογές ανάπτυξης των τελικών χρηστών και την χωρική δικτυακή πύκνωση, οι τεχνικές SON (Self-Organized Networks) θα επιτρέψουν τη μείωση ή ακόμα την εξάλειψη του «φόρτου» από τον προγραμματισμό/σχεδίαση RF. Τα 3GPP πρότυπα ήδη προσφέρουν ένα πλαίσιο για SON για την υποστήριξη της αυτόματης διάρθρωσης και της βελτιστοποίησης δικτύου.

Η αυτο-διάρθρωση⁴⁰ (self-configuration) θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί αρχικά με τη χρήση της ακρόασης δικτύου και της ανατροφοδότησης τερματικών για την αναζήτηση γειτονικών κυψελών που θα βοηθήσουν αργότερα με μία συντονισμένη επιλογή λειτουργικών παραμέτρων μεταξύ γειτόνων. Η διαχείριση της κινητικότητας θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί μέσω βελτιστοποίησης κατά SON, αντιμετωπίζοντας περισσότερες απαιτήσεις μεταπομπής. Το SON θα μπορούσε ακόμα να εξισορροπήσει το φορτίο στην οπισθοζεύξη, αφού η οπισθοζεύξη μπορεί να υπόκειται σε μερισμό και με άλλες συσκευές (π.χ. σημεία πρόσβασης (APs) WiFi). Η ποιότητα των υπηρεσιών μπορεί να διατηρηθεί μέσω δυναμικής εξισορρόπησης φορτίου βασισμένη στη διαθεσιμότητα της ευρυζωνικότητας της οπισθοζεύξεως ([98]).

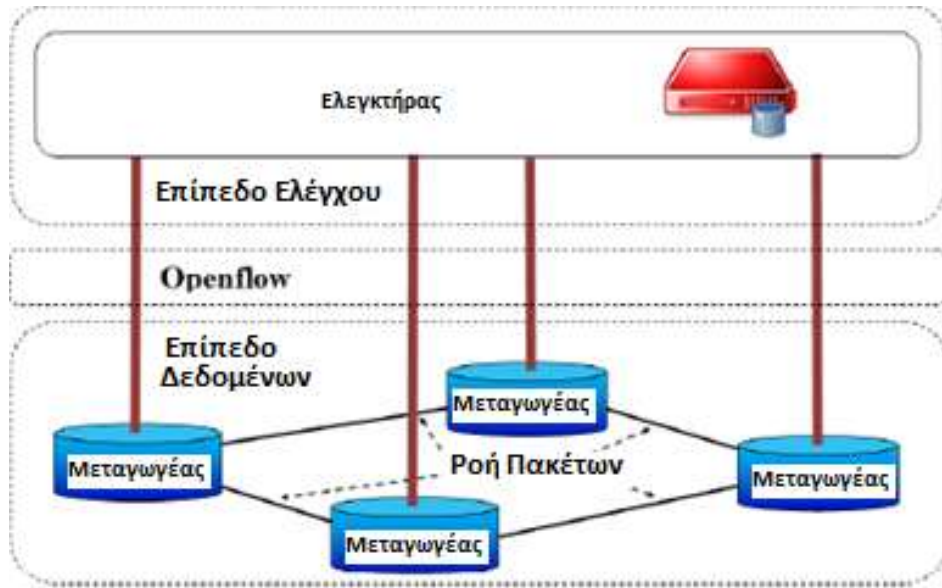
Γενικά οι τεχνικές και τα συστατικά που χρησιμοποιούνταν για την αύξηση της χωρητικότητας δεν είναι πια χρήσιμα, εκτός και εάν αυτή συμπληρώνεται από βελτιώσεις της οπισθοζεύξης που συνδέει έναν BS στο δίκτυο πυρήνα. Η οπισθοζεύξη μπορεί να είναι ασύρματη ή μπορεί να είναι σύνδεση υψηλής απόδοσης οπτικών ινών. Μία ασύρματη οπισθοζεύξη μπορεί να παρέχει μία βιώσιμη λύση, συνδέοντας τους κόμβους των άκρων (μικρές κυψέλες) σε κόμβους συναθροιστή (aggregator nodes) (που αποκαλούνται ως «ζεύξεις σηματοτροφοδότη» - “feeder links”) και μετά σε κόμβους πυλών (που αποκαλούνται ως «ζεύξεις συνάθροισης» - “aggregation links”) οι οποίοι έχουν οπισθοζεύξη οπτικών ινών με το δίκτυο πυρήνα [98]).

Από τη μεριά του δικτύου πυρήνα, οι προηγμένες τεχνολογίες των τελευταίων ετών (π.χ. SDN, NFV, μεγάλα δεδομένα (big data)) θα αλλάξουν τον τρόπο κατασκευής και διαχείρισης των δικτύων.

Η ιδέα του NFV (Network Functions Virtualization) είναι βασισμένη στην ιδέα της χρήσης εικονικοποιημένης κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) και άλλων υπολογιστικών τεχνολογιών νέφους, με σκοπό τη μεταφορά των δικτυακών λειτουργιών από υλισμικό που είναι αποκλειστικά διαθέσιμο για αυτές, σε εικονικές μηχανές που λειτουργούν πάνω σε υπολογιστές γενικού σκοπού. Το NFV ακόμα θεωρείται ως ένα αναδυόμενο παράδειγμα [108].

⁴⁰ Η αυτο-διάρθρωση είναι μία διεργασία μέσω της οποίας συστήματα υπολογιστών ή δικτύου, προσαρμόζουν με αυτόματο τρόπο τη διάρθρωση των συστατικών/δομικών στοιχείων τους, χωρίς άμεση ανθρώπινη παρέμβαση.

Το SDN (Software Defined Network) είναι μια νέα αρχιτεκτονική η οποία αποσυνδέει τα επίπεδα ελέγχου και μεταγωγής [109]). Οι μεταγωγείς πρέπει να είναι αυστηρά επαρκείς στη λειτουργία τους και πρέπει να μειώνουν την ευφυΐα τους σε ένα ελάχιστο επίπεδο. Η ευφυΐα του επιπέδου ελέγχου μεταφέρεται σε έναν ελεγκτήρα εξυπηρετητή (server controller) – βλέπε **Εικόνα 14** – ο οποίος εκτελεί δομοστοιχεία λογισμικού (software modules) τα οποία ορίζουν τη λειτουργικότητα των μεταγωγέων και δημιουργούν κανόνες που πρέπει να εγκατασταθούν στους μεταγωγείς. Ο ελεγκτήρας επικοινωνεί με τους μεταγωγείς μέσω πρωτοκόλλων (π.χ. OpenFlow⁴¹). Από τη μεριά του μεταγωγέα το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει τη χειραγώγηση του πίνακα ροής του μεταγωγέα.



Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική SDN.

Οι NFV και SDN αποτελούν δύο ανεξάρτητες αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις που αλληλοσυμπληρώνονται ώστε να δημιουργήσουν μία ολοκληρωμένη εικονικοποιημένη λύση αλλά το NFV δεν απαιτεί την εφαρμογή του SDN για να αποκομίσει τα οφέλη του.

Οι αλλαγές αυτές στην αρχιτεκτονική θα επιτρέψουν την ανάπτυξη μίας αρχιτεκτονικής με υψηλή ευελιξία η οποία θα επιτρέπει στους παρόχους την ανάπτυξη και την εισαγωγή νέων υπηρεσιών στο δίκτυο σε ένα αυξανόμενο ρυθμό καινοτομιών. Θα μπορεί να είναι επίσης εφικτή η επίτευξη μειώσεων OPEX⁴² και CAPEX⁴³. Η αρχιτεκτονική 5G μπορεί να εφαρμοστεί ως μία αυτόχθονη (native) αρχιτεκτονική SDN/NFV στοχεύοντας στην εικονικοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων λειτουργιών, συμπεριλαμβανομένων λειτουργιών που σχετίζονται με

⁴¹ Το OpenFlow είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που παρέχει πρόσβαση στο επίπεδο προώθησης ενός διακόπτη δικτύου ή ενός δρομολογητή μέσω του δικτύου. Βλέπε επίσης: <https://opennetworking.org/sdn-resources/customer-case-studies/openflow/>

⁴² Operating Expenditures (OPEX): Τα λειτουργικά έξοδα, οι λειτουργικές δαπάνες, τα λειτουργικά έξοδα, οι λειτουργικές δαπάνες ή το opeX είναι ένα συνεχές κόστος για τη λειτουργία ενός προϊόντος, μιας επιχείρησης ή ενός συστήματος. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Operating_expense.

⁴³ Capital Expenditures (CAPEX): Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες ή τα έξοδα κεφαλαίου είναι τα χρήματα που ένας οργανισμός ή μια εταιρική οντότητα ξοδεύει για να αγοράσει, να συντηρήσει ή να βελτιώσει τα πάγια περιουσιακά του στοιχεία, όπως κτίρια, οχήματα, εξοπλισμός ή γη. Για περισσότερες σχετικές με το αντικείμενο πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Capital_expenditure.

συσκευές από την κινητή και σταθερή υποδομή, δικτυακές λειτουργίες και λειτουργίες διαχείρισης.

✓ **Ασφάλεια**

Η ασφάλεια είναι μία θεμελιώδης απαίτηση που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής από τη στιγμή που έγινε η σύλληψη της ιδέας των συστημάτων 5G. Η αρχιτεκτονική που σχετίζεται με την ασφάλεια πρέπει να κατευθυνθεί προς την παροχή επιλογών πέραν της ασφάλειας από κόμβο προς κόμβο και της ασφάλειας από άκρο σε άκρο που είναι διαθέσιμη στα σημερινά συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Αφού το 5G θα υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που απαιτούν πολλαπλά σενάρια επικοινωνιών (όπως π.χ. βασιζόμενα στον άνθρωπο ή βασιζόμενα σε μηχανή), τα νέα αυτά συστήματα θα πρέπει να χειρίζονται εξαιρετικά ευαίσθητα δεδομένα που απαιτούν ασφάλεια από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, χρήση, μετατροπή, επιθεώρηση, επίθεση, κ.α.

Επομένως τα συστήματα 5G μπορούν να χρησιμοποιήσουν τεχνολογίες παλαιών κυψελωτών συστημάτων με μερικές βελτιώσεις αλλά και κάποιες κεντρικές ιδέες αυτών που έχουν να κάνουν με παρεμβολές, προγραμματισμό RF και περιορισμούς χωρητικότητας.

Νέες τεχνολογίες όπως είναι οι CoMP, massive MIMO, SDN, NFV εξακολουθούν να τελούν υπό δυναμική ανάπτυξη, σε συνδυασμό με άλλες, όπως η χρήση συχνοτήτων mmWave, πρέπει να υπερνικήσουν προκλήσεις και περιορισμούς και να βρουν την θέση τους στα μελλοντικά πρότυπα των δικτύων 5G ή/και πέρα από το 5G [38].

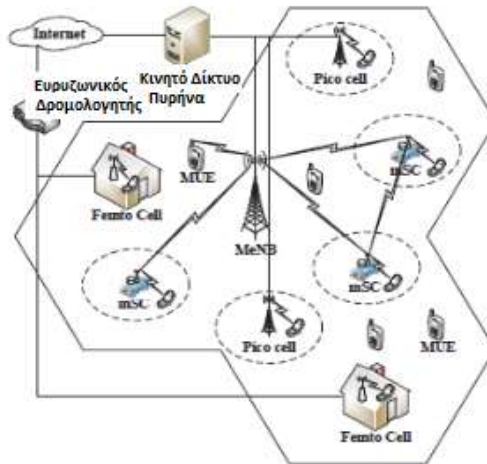
2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

2.1. Moving Small Cells (mSCs)

Με στόχο την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων κίνησης των μετακινούμενων χρηστών, τα Ετερογενή Δίκτυα (HetNets) [121] νέας γενιάς εξετάζουν την ανάπτυξη των μετακινούμενων μικρών κυψελών (moving Small Cells - mSCs) ([39], [122]). Μία mSC αποτελεί ένα δίκτυο προσανατολισμένο στον χρήστη που εγκαθιδρύει επικοινωνία μεταξύ χρηστών και παρέχει δικτυακές υπηρεσίες εν κινήσει ([8], [9]). Οι mSCs χρησιμοποιούν ασύρματες οπισθοζεύξεις σε αντίθεση με άλλους σταθερούς κόμβους χαμηλής ισχύος (Low Power Nodes - LPNs) όπως οι femto- και pico-κυψέλες, που είναι δαπανηρές αφού χρησιμοποιούνται καλωδιώσεις για τη σύνδεση με το κύριο δίκτυο. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά τις mSCs ως μια επιλογή διαφοροποιημένη και πιο αποδοτική σε σχέση με τους σταθερούς LPNs. Επιπλέον, σε ένα περιβάλλον εφαρμογών όπου δεν υπάρχει δικτυακή κάλυψη και όπου ενδέχεται να έχει υποστεί βλάβη – εν μέρει ή εν όλω – η αντίστοιχη υποκείμενη δικτυακή υποδομή, οι mSCs μπορούν να παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες σε χρήστες εκτός κάλυψης και να επιτρέπουν σύνδεση με γειτονικές κινούμενες μικρές κυψέλες που λειτουργούν ως αναμεταδότης (relay), επιτρέποντας τη σύνδεση με το δίκτυο πυρήνα (core network). Επιπλέον, οι σταθεροί κόμβοι επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα που χρησιμοποιεί το **Macro-eNB**⁴⁴ (**MeNB**), γεγονός, που αν δεν τύχει έξυπνης διαχείρισης, θα έχει δυσμενή επίδραση στη συνολική απόδοση του δικτύου, λόγω παρεμβολών ([5], [123]).

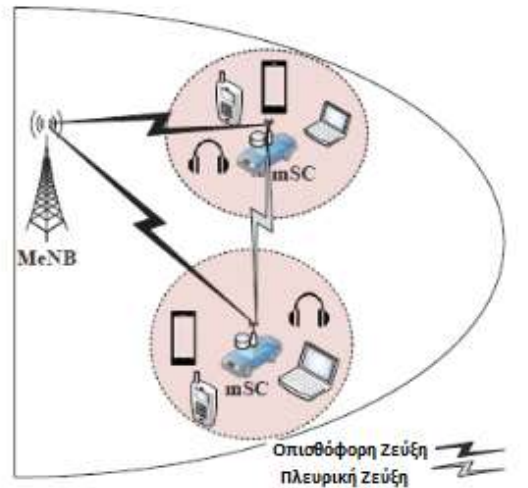
Οι mSCs σε συμβατικά Ετερογενή Δίκτυα

Η mSC μπορεί να οριστεί ως μια κινητή μικρή κυψέλη, που έχει την ικανότητα να παρέχει δικτυακές υπηρεσίες εν κινήσει. Η **Εικόνα 15** απεικονίζει ένα ετερογενές δίκτυο με σταθερούς κόμβους LPNs και mSCs.



Εικόνα 15: Συμβατικό Ετερογενές Δίκτυο με μερικές femto-, pico- και mSCs.

⁴⁴ Macro-eNB (M-eNB): Είναι ο σταθμός βάσης μακρο-κυψελών που αναφέρεται και ως eNB (συντόμηση για εξελιγμένο κόμβο B - evolved node B) στο πλαίσιο των εφαρμογών σε περιβάλλον LTE. Το M-eNB αποτελεί ένα βασικό στοιχείο προκειμένου να διασφαλιστεί η παροχή πανταχού παρούσας κάλυψης για κινητικότητα σε αστικό περιβάλλον καθώς και σε μεγάλη εμβέλεια σε απομακρυσμένες περιοχές.



Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική μίας mSC.

Ετερογενές Δίκτυο (HetNet) βασισμένο σε Μετακινούμενες Μικρές Κυψέλες (mSC)

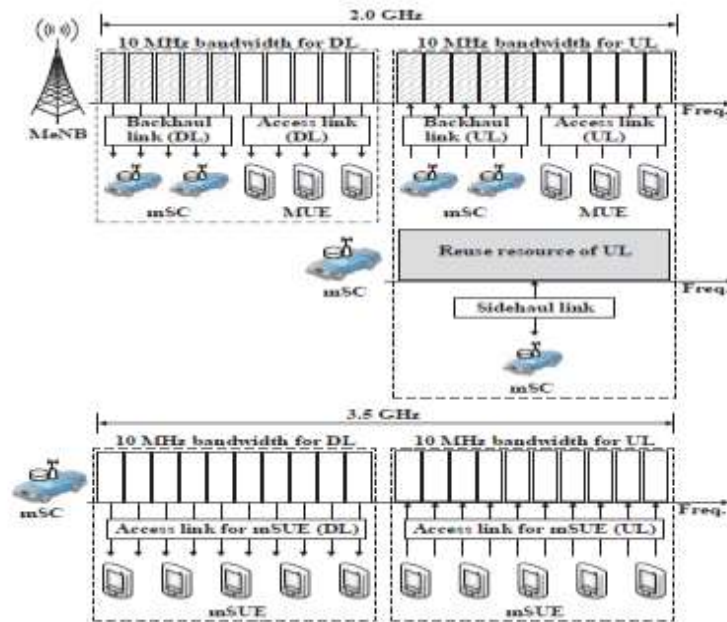
Τα mSCs χρησιμοποιούν ασύρματες καλωδιώσεις οπισθοζεύξης και πλευρικής ζεύξης για να επικοινωνούν με τις μακρο-κυψέλες (MeNB) και τις γειτονικές mSCs, αντίστοιχα (βλέπε **Εικόνα 16**). Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει τη δυνατότητα στις mSCs να μετακινούνται ελεύθερα και να παρέχουν αξιόπιστες δικτυακές υπηρεσίες στον συνδεδεμένο εξοπλισμό χρηστών (User Equipment's - UEs).

Σε κανονικό δικτυακό τρόπο λειτουργίας, οι mSCs μοιράζονται στην οπισθοζεύξη τους τους υφιστάμενους πόρους κατερχόμενης ζεύξης (downlink resources) του MeNB. Παρομοίως, οι mSCs για την επικοινωνία πλευρικής ζεύξης επαναχρησιμοποιούν τους πόρους ανερχόμενης ζεύξης (uplink resources) του MeNB. Οι φέρουσες συχνότητες και των δύο, της οπισθοζεύξης (MeNB downlink) και της πλευρικής (MeNB downlink) καθορίζονται στα 2 GHz. Η ζεύξη πρόσβασης μεταξύ της mSC και των συνδεδεμένων σε αυτήν εξοπλισμών χρηστών (UEs) χρησιμοποιεί έναν αφιερωμένο ραδιοπόρο στη ζώνη των 3.5 GHz [122].

Ως εκ τούτου, η απόδοση της κατερχόμενης και της ανερχόμενης ζεύξης των εξοπλισμών των χρηστών που συνδέονται απευθείας με το eNB (γνωστά ως macro UES ή MUEs) επηρεάζεται από τον αριθμό των mSCs μέσα στο δίκτυο [124].

Έχει αποδειχθεί ([9], [11]) ότι η οπισθοζεύξη μεταξύ eNB και mSC λειτουργεί ως σημείο «συμφόρησης» (“bottleneck”) και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των mSCs. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη χωρητικότητα της οπισθοζεύξης (π.χ. 10 GHz) η οποία μοιράζεται μεταξύ των MUEs και των mSCs κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης.

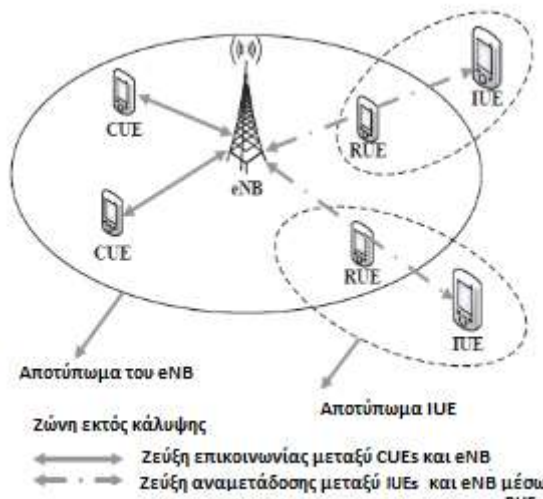
Στην **Εικόνα 17** φαίνεται η κατανομή πόρων μετακινούμενων μικρών κυψελών σε συμβατικό ετερογενές δίκτυο [39].



Εικόνα 17: Κατανομή Πόρων σε Συμβατικό Δίκτυο Μετακινούμενων Μικρών Κυψελών [39].

PS-D2D: Δίκτυο Δημόσιας Ασφάλειας βασισμένο σε Απευθείας Επικοινωνία των Συσκευών

Ο στόχος των δικτύων PS-D2D είναι η παροχή δικτυακών υπηρεσιών σε απομακρυσμένο εξοπλισμό χρηστών (Isolated User Equipments - IUEs) σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης [125]. Μια απλοποιημένη περίπτωση επικοινωνιών τύπου PS-D2D απεικονίζεται στην **Εικόνα 18**, όπου ο εξοπλισμός των χρηστών που βρίσκεται εντός της δικτυακής κάλυψης παρέχει τις βασικές δικτυακές υπηρεσίες στον εξοπλισμό των χρηστών που βρίσκεται εκτός δικτυακής κάλυψης, αναμεταδίδοντας τα δεδομένα τους προς το eNB [126].



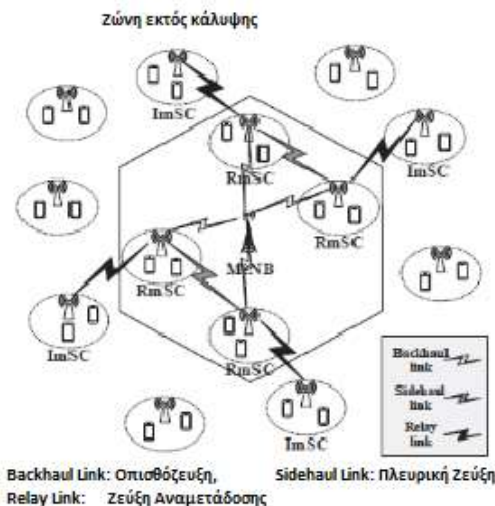
Εικόνα 18: Συμβατικές Επικοινωνίες PS-D2D.

Στην επικοινωνία PS-D2D, το σημαντικό μέρος για έναν απομακρυσμένο εξοπλισμό χρήστη ώστε να εγκαταστήσει επικοινωνία μεταξύ αυτού και ενός eNB είναι η ανακάλυψη, ο συγχρονισμός και η επιλογή ενός εξοπλισμού χρήστη για αναμετάδοση (Relay User Equipment - RUE) που βρίσκεται εντός της δικτυακής κάλυψης. Η ανακάλυψη και ο συγχρονισμός είναι

αυτόνομο έργο του ίδιου του απομακρυσμένου εξοπλισμού αφού δεν υπάρχει κεντρική οντότητα για το ρόλο αυτό με αποτέλεσμα την κατανάλωση υψηλής ενέργειας από την μεριά των χρηστών ([12], [13]). Η επιλογή του αναμεταδότη είναι ύψιστης σημασίας διαδικασία, γιατί οι χρήστες που βρίσκονται εντός και εκτός κάλυψης έχουν περιορισμένη ενέργεια και δυνατότητες επεξεργασίας ([14], [15]). Άλλα θέματα είναι η αξιοπιστία των RUEs (όσο αφορά στη διαθεσιμότητα και στην ασφάλεια ημερομηνίας) και η δυνατότητα διαχείρισης της κίνησης. Αφότου οι RUEs έχουν περιορισμένη ισχύ επεξεργασίας, πιθανόν να μην είναι ικανοί για να διαχειριστούν ταυτόχρονα πολλαπλούς απομακρυσμένους εξοπλισμούς χρηστών ή έναν IUE με ριπαία κίνηση (bursty traffic).

2.1.1. Σενάριο: Μετακινούμενες Μικρές Κυψέλες σε Δίκτυα Δημόσιας Ασφάλειας (mSC based PS network)

Ένα δίκτυο μετακινούμενων μικρών κυψελών (mSCs) μπορεί εύκολα να επικοινωνήσει με τις γειτονικές μετακινούμενες μικρές κυψέλες mSCs μέσω πλευρικής ζεύξης. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για τη σύνδεση των απομακρυσμένων μετακινούμενων μικρών κυψελών ImSCs (Isolated moving Small Cell) με τις mSCs που βρίσκονται εντός της δικτυακής κάλυψης και που θα λειτουργήσουν ως αναμεταδότες mSC (RmSC) από και προς το eNB⁴⁵. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 19** από τη στιγμή που μία ImSC⁴⁶ συνδεθεί με μία RmSC⁴⁷ μπορεί από εκεί και πέρα να παρέχει αξιόπιστες δικτυακές υπηρεσίες στους πολλαπλά συνδεδεμένους IUEs⁴⁸ [39].



Εικόνα 19: Προτεινόμενο Δίκτυο Δημόσιας Ασφάλειας με Μετακινούμενες Μικρές Κυψέλες.

Σε δίκτυα δημόσιας ασφάλειας βασισμένα σε μετακινούμενες μικρές κυψέλες, σε αντίθεση με τα PS-D2D⁴⁹, οι ImSCs έχουν αποθηκευτικούς χώρους μεγάλων δυνατοτήτων και υψηλή επεξεργαστική ισχύ. Επομένως, οι ImSCs είναι ικανές να μεταφέρουν τα απαραίτητα πληροφοριακά σήματα με υψηλή ισχύ εκπομπής και μπορούν να χειριστούν ταυτόχρονα πολλαπλές συνδέσεις IUEs-προς-ImSCs με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την κίνηση.

Αντίθετα με τον κανονικό τρόπο λειτουργίας όπου οι mSCs επαναχρησιμοποιούν τους πόρους ανερχόμενης ζεύξης των μακρο-κυψελών για επικοινωνία πλευρικής ζεύξης, οι **ImSCs στο**

⁴⁵ eNB: evolved NodeB – εξελιγμένος ΚόμβοςB

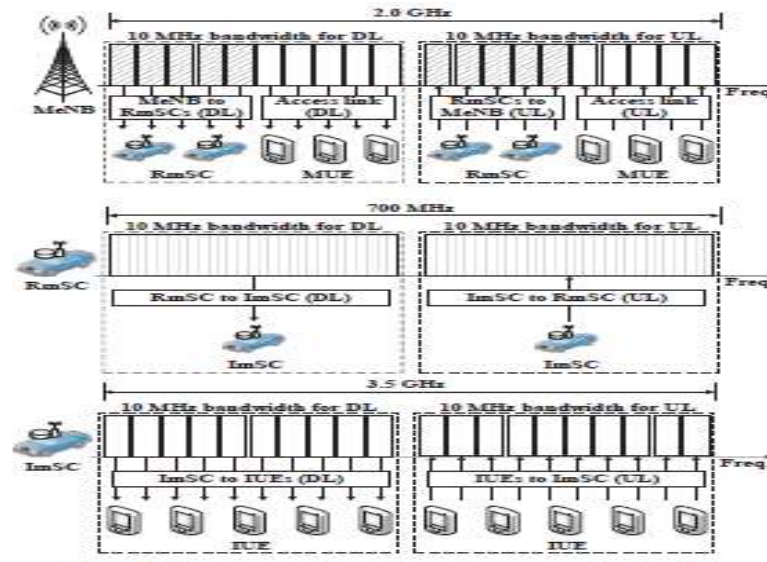
⁴⁶ ImSC: isolated mSCs – απομονωμένες mSCs

⁴⁷ RmSC: Relay mSC – mSC που λειτουργεί ως αναμεταδότης

⁴⁸ UEs: isolated UEs – απομονωμένοι εξοπλισμοί χρηστών

⁴⁹ PS-D2D: απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε δίκτυα δημόσιας ασφάλειας (PS)

προτεινόμενο σενάριο χρησιμοποιούν τη ζώνη 700 MHz που διατίθεται για τη δημόσια ασφάλεια, στις συνδέσεις *ImSC-προς-RmSC*. Αυτό συμβαίνει γιατί η πλευρική ζεύξη των mSCs σε κανονική λειτουργία επηρεάζεται σημαντικά από τις εκπομπές ανερχόμενης ζεύξης των εξοπλισμών των χρηστών που είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τις μακρο-κυψέλες (MUEs) [39]. Παρόμοια με τον κανονικό τρόπο λειτουργίας, οι ImSCs στις δικές τους ζεύξεις πρόσβασης (*ImSCs-προς-UEs*) χρησιμοποιούν τη ζώνη των 3.5 GHz [39]. Η **Εικόνα 20** απεικονίζει την κατανομή πόρων των RmSCs, ImSCs και IUEs για τον τρόπο λειτουργίας δημόσιας ασφάλειας.



Εικόνα 20: Κατανομή Πόρων των RmSCs, ImSCs και IUEs για τη Λειτουργία Δημόσιας Ασφάλειας [39].

Στο παρόν σενάριο οι ImSCs πρώτα ανακαλύπτουν τις διαθέσιμες RmSCs με βάση τα ληφθέντα σήματα ανακάλυψης (discovery signals) που εκπέμπονται από τις γειτονικές RmSCs. Εδώ τίθεται η υπόθεση [39] ότι πριν την εκπομπή οποιαδήποτε σήματος ανακάλυψης, οι RmSCs έχουν ήδη εγκαθιδρύσει μία αξιόπιστη σύνδεση με τους αντίστοιχούς τους MeNBs. Μετά το στάδιο της ανακάλυψης, η ImSC επιλέγει την κατάλληλη RmSC μεταξύ των ανακαλυφθεισών RmSCs, βάσει της μεταξύ τους απόστασης. Με άλλα λόγια, μία ImSC επιλέγει την κοντινότερη διαθέσιμη RmSC. Αμέσως μετά η ImSC εγκαθιδρύει μία απευθείας ασφαλή σύνδεση *ImSC-προς-RmSC*. Τέλος η ImSC προωθεί τα δεδομένα των συνδεδεμένων σε αυτήν IUEs προς την RmSC, η οποία με τη σειρά της πραγματοποιεί περαιτέρω προώθηση προς τον MeNB.

Συμπέρασμα:

Το σενάριο αυτό [39] παρουσιάζει μία καινοτόμο χρήση των μετακινούμενων μικρών κυψελών σε ένα δίκτυο δημόσιας ασφάλειας, στην περίπτωση που η δικτυακή υποδομή είναι ολοκληρωτικά ή μερικώς κατεστραμμένη και δεν υπάρχει δικτυακή κάλυψη. Οι mSCs μπορούν να παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες σε απομακρυσμένο εξοπλισμό χρηστών (IUEs) εγκαθιδρύοντας μία σύνδεση με τη γειτονική της mSC η οποία βρίσκεται εντός της δικτυακής κάλυψης και η οποία θα λειτουργεί ως αναμεταδότης και θα συνδέσει αμφότερες στον MeNB. Η απόδοση ενός τέτοιου δικτύου επηρεάζεται σημαντικά από τη χωρητικότητα των συνδέσεων *ImSC-προς-RmSC* και *RmSC-προς-MeNB*.

2.2. Mobile Edge Computing (MEC)

Η Υπολογιστική στα Άκρα του Κινητού Δικτύου (Mobile Edge Computing⁵⁰ - MEC) είναι μία νέα τεχνολογία, υποκείμενη σε τυποποίηση από μία Ομάδα Βιομηχανικών Προδιαγραφών του ETSI (European Telecommunications Standard Institute – Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων⁵¹). Η τεχνολογία MEC παρέχει ένα περιβάλλον υπηρεσιών τεχνολογίας των πληροφοριών (IT) και υπολογιστικές δυνατότητες νέφους στα άκρα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, στο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (RAN) και πλησίον των συνδρομητών. Κύριος στόχος είναι η μείωση της λανθάνουσας καθυστέρησης, η εξασφάλιση αποδοτικής δικτυακής λειτουργίας και παράδοσης υπηρεσιών καθώς και η βελτιωμένη εμπειρία χρήστη. Η MEC ουσιαστικά αποτελεί μία φυσική ανάπτυξη στη εξέλιξη των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας και στη σύγκλιση μεταξύ της τεχνολογίας των πληροφοριών και της τηλεπικοινωνιακής δικτύωσης.

Επί τη βάσει μίας εικονικοποιημένης πλατφόρμας, η MEC έχει αναγνωριστεί από τον φορέα 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) ως μία από τις βασικές αναδυόμενες τεχνολογίες των δικτύων 5G, από κοινού με την Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (NFV - Network Functions Virtualization) και τη Δικτύωση που ορίζεται από το Λογισμικό (SDN – Software Defined Networking) [1].

Τα δίκτυα 5G θα αναμοχλεύσουν περισσότερες προγραμματιστικές προσεγγίσεις στο λογισμικό δικτύωσης και θα χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό τεχνολογίες εικονικοποίησης IT στα πλαίσια των τηλεπικοινωνιακών υποδομών, των λειτουργιών και των εφαρμογών. Η MEC συνεπώς αντιπροσωπεύει μία βασική τεχνολογία και μία αρχιτεκτονική ιδέα που υποστηρίζει την εξέλιξη του 5G, αφού βοηθά στην πρόοδο του μετασχηματισμού του ευρυζωνικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας σε έναν «προγραμματίσιμο» κόσμο και συνεισφέρει στην ικανοποίηση των απαιτητικών προδιαγραφών του 5G, όπως είναι η διεκπεραιωτικότητα (throughput), η λανθάνουσα καθυστέρηση (latency), η κλιμακοθετησιμότητα (scalability) και ο αυτοματισμός (automation).

Η MEC βασίζεται σε μία εικονικοποιημένη πλατφόρμα με μία προσέγγιση συμπληρωματική στο NFV. Στην πραγματικότητα, ενώ η NFV εστιάζεται σε δικτυακές λειτουργίες, το πλαίσιο της MEC επιτρέπει την εκτέλεση εφαρμογών στα άκρα του δικτύου. Η υποδομή που φιλοξενεί την MEC και την NFV ή τις δικτυακές λειτουργίες είναι σχεδόν όμοια. Συνεπώς με στόχο το μεγαλύτερο δυνατό όφελος των παρόχων από τις δικτυακές τους επενδύσεις, είναι χρήσιμη η επαναχρησιμοποίηση της υποδομής και της διαχείρισης της υποδομής της NFV κατά το μέγιστο δυνατό, φιλοξενώντας στην ίδια πλατφόρμα εφαρμογές MEC και VNF [118].

⁵⁰ Ο όρος “Mobile Edge Computing” εφεξής συναντάται και ως “Multi-access Edge Computing” («Πολλαπλής Πρόσβασης Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου»).

⁵¹ Βλέπε επίσης: <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

Η τεχνολογία 5G συνδέει κάθε είδους συσκευές όπως έξυπνα τηλέφωνα, συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), αυτοκίνητα, μέχρι και δημοφιλείς εφαρμογές. Η ιδέα της παροχής χωρητικότητας για φορητές συσκευές και της συνδεσιμότητας για αισθητήρες του Διαδικτύου των Πραγμάτων θα παίξει σπουδαίο ρόλο στην χρήση των μικρών κυψελών στα δίκτυα 5G.

Η ικανότητα παράδοσης πολλών gigabit ανά δευτερόλεπτο (gbrps) καθιστά τις μικρές κυψέλες 5G ικανές ώστε να υποβαθμίσουν τα προβλήματα λόγω δικτυακής πυκνότητας (densification). Στην εποχή του 5G, οι μικρές κυψέλες θα επιτρέψουν το δίκτυο να επεκτείνει τη περιοχή κάλυψης, να μειώσει την καθυστέρηση και να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες ενώ διατηρεί την απόδοση σε υψηλά επίπεδα.



Εικόνα 21: Περιπτώσεις Χρήσεων Μικρών Κυψελών στα Δίκτυα 5G [127].

Οι μικρές κυψέλες των δικτύων 5G θα παίξουν σημαντικό ρόλο σε πολλές περιπτώσεις χρήσεων, όπως για παράδειγμα σε μεγάλα γήπεδα, στάδια, συναυλιακούς χώρους και γενικά μεγάλους χώρους συγκεντρώσεων όπου χιλιάδες χρήστες χρειάζονται να συνδεθούν εντός μιας περικλειστής περιοχής. Με σκοπό τη διασφάλιση της επιτυχούς δικτυακής κάλυψης όλων των χρηστών με καλή διεκπεραιωτικότητα-απόδοση, οι μικρές κυψέλες 5G μπορούν να τοποθετηθούν στις εγκαταστάσεις αυτές και στις περικείμενες περιοχές προκειμένου να παρέχεται επιπλέον χωρητικότητα και για να αποφεύγεται η δικτυακή εξάντληση ([42], [127]).

Άλλη μία περίπτωση χρήσης είναι η κυψελοειδής επικοινωνία οχήματος προς οτιδήποτε (cellular vehicle-to-everything (C-V2X)), η επικοινωνία δηλαδή μεταξύ οχημάτων και ανάμεσα στα οχήματα και τις υποδομές ([128] - [132]). Οι δυνατότητες αυτές είναι απαραίτητες για τη λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων. Οι μικρές κυψέλες 5G μπορούν να «χτίσουν» την υποδομή που μπορεί να στηρίξει ισχυρές επικοινωνίες απαραίτητες για την εφαρμογή αυτή όπου ανθρώπινες ζωές μπορεί να διακυβεύονται.

Στις έξυπνες πόλεις, οι μικρές κυψέλες 5G μπορούν να προσαρμοστούν σε θέσεις κυκλοφορίας ή θέσεις φωτισμού ώστε να υπάρχει καλύτερη κάλυψη σε μητροπολιτικές περιοχές για την εξασφάλιση της δικτυακής κάλυψης με την απαραίτητη απόδοση ([133]-[135]).

Οι μικρές κυψέλες 5G μπορούν να υποστηρίξουν οικιακές ή επιχειρηματικές δικτυακές ανάγκες. Η τοποθέτηση μικρών κυψελών 5G κοντά σε αστικά κτίρια ή κατοικίες ενισχύει την απόδοση παρά την ενδεχόμενη περιορισμένη δικτυακή κάλυψη. Ιδιωτικά δίκτυα 5G εγκαθίστανται σε πολλές επιχειρήσεις για να παρέχουν καθολική κάλυψη για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και άλλες βιομηχανικές πρωτοβουλίες της Βιομηχανικής Επανάστασης 4.0 ([42], [136], [137]).

3.1. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet Of Things - IoT)

Στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων⁵² η σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών και αισθητήρων δημιουργεί την πρωτοφανή ανάγκη για χαμηλής ισχύος ασύρματες δικτυακές λύσεις ([138] - [144]). Με τον όρο «πράγματα-αντικείμενα» ή “objects” νοείται οποιαδήποτε συσκευή ανεξαρτήτου μεγέθους που διαθέτει κάρτα δικτύου και έχει δυνατότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Οι μικρές κυψέλες βοηθούν στη βελτιωμένη συνδεσιμότητα στα άκρα των υπάρχοντων macro-δικτύων, ιδιαίτερα σε αστικές και αγροτικές περιοχές. Με την αυξανόμενη υιοθέτηση των IoT μηχανών και αισθητήρων, οι τεχνολογίες των μικρών κυψελών έχουν την ικανότητα να αυξήσουν τη δικτυακή διείσδυση χωρίς «συμβιβαστικές» ταχύτητες δεδομένων ή «υπερβάλλουσα» χρήση ενέργειας για υπάρχουσες και/ή νέες συσκευές και εξοπλισμό.

Μια μεγάλη πρόκληση για τα αναδυόμενα IoT δίκτυα είναι η ταχύτητα των δεδομένων και η λανθάνουσα καθυστέρηση [145]. Ενώ πολλά αναδυόμενα χαμηλής ισχύος δίκτυα ευρείας περιοχής (**Low-Power Wide Area Networks - LPWANs**⁵³) έχουν πετύχει τη μεγιστοποίηση της ζωής των μπαταριών για αισθητήρες και μηχανές, τα περισσότερα παραμένουν περιορισμένα όσον αφορά στο μέγεθος πακέτου δεδομένων και μεταδόσεις ανά ημέρα.

Τα κυψελοειδή δίκτυα είναι ευρέως διαδεδομένα κι αυτό συνιστά όφελος για τους παρόχους, τους διαχειριστές IoT και τους τελικούς χρήστες, προκειμένου να παρέχεται αξιοπιστία με σχετικά χαμηλό κόστος. Με την αυξανόμενη εφαρμογή των μικρών κυψελών οι πάροχοι θα είναι ικανοί [146] ώστε να:

- ✓ Πετύχουν δικτυακή διείσδυση σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε κλειστούς χώρους σε αστικά περιβάλλοντα.
- ✓ Παρέχουν συνδέσεις υψηλής ευρυζωνικότητας πάνω από LTE δίκτυα.
- ✓ Υπερνικούν προβλήματα καθυστέρησης με αναδυόμενες 5G προδιαγραφές (<1ms).
- ✓ Υποστηρίζουν καταναλωτικές, εμπορικές και βιομηχανικές συμβουλές διατιθέμενες από μια συγκεκριμένης μορφής δικτυακή αρχιτεκτονική.

Οι απαιτήσεις σε επικοινωνία, επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων λόγω του μεγάλου αριθμού (της τάξης των εκατομμυρίων) συσκευών/εξοπλισμών που βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας, αυξάνονται εκθετικά. Σε περιπτώσεις χρήσεων όπως μεγάλης κλίμακας αυτοματισμούς κτιρίων, αυτο-οδηγούμενα οχήματα και συσκευές έξυπνου σπιτιού (smart-home), οι ανάγκες ευρυζωνικότητας συσκευής προς συσκευή (Machine-to-Machine - M2M) πλησιάζουν σε πρωτόγνωρα επίπεδα.

Σύνθετες συστοιχίες αισθητήρων μπορούν να δημιουργήσουν terabytes δεδομένων σε διάρκεια λεπτών ή ωρών και πολύ συχνά τα εν λόγω δεδομένα χρειάζεται να ανταλλάσσονται μεταξύ διαφορετικών συσκευών σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία ή ακόμα προς δορυφορικές

⁵² Το Internet of Things (IoT) είναι μια έννοια της πληροφορικής που περιγράφει ένα μέλλον όπου όλα τα αντικείμενα που χρησιμοποιούμε καθημερινά θα είναι συνδεδεμένα στο Internet και θα είναι σε θέση να προσδιορίσουν τον εαυτό τους σε άλλες συσκευές. Ο όρος αυτός ταυτίζεται με τις ραδιοσυχνότητες (RFID) ως μέθοδο επικοινωνίας, αν και μπορεί επίσης να περιλαμβάνει άλλες τεχνολογίες αισθητήρων, ασύρματων τεχνολογιών ή των κωδικών QR. Στη βιβλιογραφία η απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών ονομάζεται ως επικοινωνία «Συσκευής-με- Συσκευή», Machine-to-Machine (M2M), Device-to-Device (D2D).

⁵³ LPWANs: Ασύρματα ευρείας περιοχής δίκτυα επικοινωνιών, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης που είναι σχεδιασμένα για χαμηλό ρυθμό μετάδοσης μεταξύ συνδεδεμένων συσκευών, όπως οι αισθητήρες που λειτουργούν με μπαταρία.

τοποθεσίες, προς το υπολογιστικό νέφος⁵⁴ ή προς απομακρυσμένους εξυπηρετητές. Για διευκόλυνση τέτοιων δράσεων, οι πάροχοι χρειάζονται αξιόπιστες συνδέσεις με μεγάλη ακεραιότητα σήματος, σημαντική ευρυζωνικότητα και χαμηλή καθυστέρηση. Όλα αυτά μπορούν να τα παρέχουν οι μικρές κυψέλες σε μεγαλύτερα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [119].

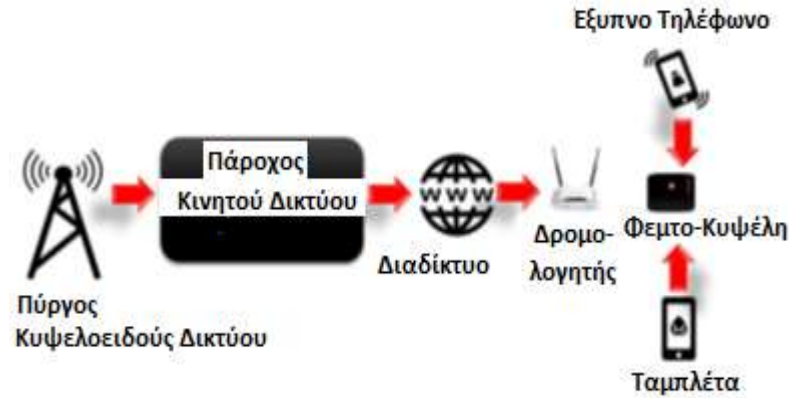
Μοντελοποίηση κίνησης και ανάπτυξης στα δίκτυα μικροκυψελών του επερχόμενου 5G/IoT

Οι φεμτο-μικροκυψέλες (femto cells) συνδέουν στο δίκτυο φορητές συσκευές μέσω ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών ([57], [147] - [150], [154], [156], [157]). Ουσιαστικά συνιστούν έναν μακρο-κυψελοειδή σταθμό βάσης (Macrocellular Base Station - MBS) χαμηλού κόστους, ο οποίος παρέχει διεπαφή ραδιοπρόσβασης στον εξοπλισμό χρήστη [58]. Πρόκειται ουσιαστικά για μία λύση αποφόρτισης των υπερφορτωμένων μακροκυψελών και επέκτασης της περιοχής κάλυψης. Κατά βάση είναι σχεδιασμένες και χρησιμοποιούνται για την επέκταση της κάλυψης εσωτερικών χώρων (σπιτιών ή μικρών επιχειρήσεων) όπου ενδέχεται να υπάρχει έλλειψη δικτύου κινητής τηλεφωνίας ή όπου είναι επιθυμητή η βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών. Αυτές οι λύσεις προσφέρουν πλεονεκτήματα για τους παρόχους αλλά και για τους χρήστες. Οι πάροχοι δικτύων και υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας επιτυγχάνουν την επεκτασιμότητα της κάλυψης και της χωρητικότητας. Η περιοχή κάλυψης επεκτείνεται γιατί η απώλεια του σήματος μειώνεται μεταξύ των κτιρίων. Η χωρητικότητα επίσης επεκτείνεται λόγω της μείωσης του συνολικού αριθμού των εξοπλισμών των χρηστών που χρησιμοποιούν το βασικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Οι UEs χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο αντί να χρησιμοποιούν ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Από την άλλη μεριά, οι πελάτες λαμβάνουν καλύτερη υπηρεσία, βελτιωμένη κάλυψη και ισχυρότερο σήμα γιατί βρίσκονται εγγύτερα στο σταθμό βάσης. Επιπλέον, η χρήση των φεμτο-κυψελών οδηγεί στην επέκταση της ζωής της μπαταρίας λόγω της εγγύτητας των χρηστών σε αυτές [57].

Μία τυπική δομή φεμτο-κυψελών αποτελείται από πέντε μέρη: DSL ή καλωδιακό δρομολογητή, τη συσκευή φεμτο-κυψελών, τον πύργο κινητής τηλεφωνίας (μακρο-κυψέλη), το δίκτυο του παρόχου κινητής τηλεφωνίας και ISP διαδικτυακό σύνδεσμο [57] όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 22**. Οι φέμτο-κυψέλες δεν απαιτούν κεντρικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αφότου περιέχουν Ελεγκτήρα Ραδιοδικτύου⁵⁵ (Radio Network Controller - RNC) και όλα τα άλλα δικτυακά στοιχεία. Λειτουργεί ως ένα σημείο πρόσβασης Wi-Fi και χρειάζεται μία σύνδεση δεδομένων στο DSL ή διαδικτυακή σύνδεση στον δίκτυο πυρήνα του παρόχου κινητής τηλεφωνίας [57]. Αν και δεν είναι απαραίτητη η κάλυψη της περιοχής από μακρο-κυψέλες, υπάρχουν πολλά παραδείγματα εγκαταστάσεων σε περιοχές κάλυψης μακρο-κυψελών με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας και της ποιότητας της υπηρεσίας (QoS) σε μέρη με αυξημένη ζήτηση ή σε μέρη με μικρή κάλυψη στο εσωτερικό των κτιρίων. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές για την παροχή κινητής τηλεφωνίας όπου δεν υπάρχει κάλυψη από μακρο-κυψέλες.

⁵⁴ Η έννοια της υπολογιστικής νέφους (Cloud Computing) εισάγει ένα νέο μοντέλο όπου όλοι οι υπολογιστικοί πόροι που χρειάζονται οι χρήστες είναι διαθέσιμοι στο Διαδίκτυο χωρίς να απαιτείται η φυσική παρουσία στο χώρο του χρήστη. Στο σύνολο των υπολογιστικών πόρων, πέρα από εφαρμογές και υπηρεσίες, περιλαμβάνεται και υποδομή υλισμικού (εξυπηρετητές, δίκτυο, αποθηκευτικές δυνατότητες) και πλατφόρμες ανάπτυξης εφαρμογών.

⁵⁵ Ο Radio Network Controller είναι ένα κυρίαρχο στοιχείο στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης του UMTS και είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των NodeBs που είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν. Ο RNC διεκπεραιώνει τη διαχείριση ραδιοπόρων, ορισμένες από τις λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας και είναι το σημείο όπου λαμβάνει χώρα (encryption) των δεδομένων πριν την αποστολή τους στο ή από δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_Network_Controller.



Εικόνα 22: Μια Τυπική Δομή Δικτύου Φεμτο-Κυψελών [53].

Αν και η τεχνολογία των φεμτο-κυψελών αρχικά σχεδιάστηκε για χρήση σε εσωτερικούς χώρους υπάρχουν και πολλές εφαρμογές αυτών σε εξωτερικούς χώρους. Μπορούν να εγκατασταθούν σε συστήματα διαμετακόμισης όπως τρένα και λεωφορεία. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας μπορούν να συνδέονται σε φεμτο-κυψέλες, αντί να συνδέονται με μακροκυψέλες ή δορυφορικά. Στις εν λόγω συνδέσεις, υπάρχει ένας πομποδέκτης συνδεδεμένος στο σημείο πρόσβασης της φεμτο-κυψέλης (Femtocell Access Point - FAP) μέσω ενσύρματης σύνδεσης και στις μακρο-κυψέλες ή σε δορυφόρο μέσω ασύρματης ζεύξης [56]. Επιπλέον, οι φεμτο-κυψέλες μπορούν να συνιστούν ιδανική λύση και για εξωτερικούς χώρους όπου η κάλυψη δεν επαρκεί και η χωρητικότητα είναι περιορισμένη, ιδιαίτερα όταν υπάρχει πολυκοσμία.

Η κεντρική ιδέα της χρήσης φεμτο-κυψελών είναι η εγγύτητα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας προς τον χρήστη, η μικρή κατανάλωση ενέργειας όπως και το μικρό κόστος. Η τεχνολογία των δικτύων φέμτο-μικροκυψελών είναι μία από τις αρκετά υποσχόμενες λύσεις για τη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας και για τη διάθεση υπηρεσιών υψηλών ρυθμών δεδομένων, προκειμένου να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών κινητής τηλεφωνίας (σε έναν συνδυαστικό πλαίσιο υπηρεσιών φωνής, βίντεο και δεδομένων). Η συνολική απόδοση των δικτύων φεμτο-μικροκυψελών δύναται να βελτιωθεί με κατάλληλη μοντελοποίηση της κίνησης και στρατηγικές ανάπτυξης.

Τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας γίνονται ολοένα και πιο σημαντικά καθώς το βασικό μέρος των IoT επικοινωνιών είναι σχεδιασμένο βάσει των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ήδη χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) σε διάφορα σενάρια και περιπτώσεις χρήσεων και θα χρησιμοποιηθούν ακόμα περισσότερο στο μέλλον εξαιτίας της ευρέως διαδεδομένης συνδεσιμότητας και κινητικότητας ([145], [146]). Για την αντιμετώπιση αυτής της εκρηκτικής ανάπτυξης της κίνησης δεδομένων, και ιδιαίτερα του βίντεο, καθώς και του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας αναζητούν νέες λύσεις για να ενισχύσουν τη χωρητικότητα και την κάλυψη όπως και την παροχή υπηρεσιών με υψηλότερα επίπεδα ποιότητας.

Μία λύση είναι η πύκνωση ενός ετερογενούς δικτύου. Ένα τέτοιο δίκτυο, είναι το δίκτυο φεμτο-μικροκυψελών στο οποίο η κάλυψη γίνεται με τη χρήση ενός φεμτο-σταθμού βάσης⁵⁶ (Femto

⁵⁶ Ένας Femto Base Station (επίσης αποκαλούμενος και ως Σταθμός Βάσης Σημείου Πρόσβασης (Access Point Base Station - APBS), είναι ένας ενδο-οικιακός σταθμός βάσης. Όπως ένας τυπικός σταθμός βάσης, συνδέει φωνή και δεδομένα κινητών τηλεφώνων στο αντίστοιχο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αλλά εξυπηρετεί μία μικρότερη περιοχή (στην περίπτωση μας την οικία). Ο FBS εξυπηρετεί τον

Base Station - FBS). Πολλοί διαχειριστές δικτύων χρησιμοποιούν FBSs σε εξωτερικά περιβάλλοντα αστικών και πυκνοκατοικημένων περιοχών μειώνοντας έτσι το πλήθος των χρησιμοποιούμενων πύργων μακρο-κυψελών που είναι και δαπανηροί. Οι φεμτο-μικροκυψέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε οχήματα δημόσιων συγκοινωνιών με σκοπό την αποσυμφόρηση των υπερφορτωμένων μακρο-κυψελικών δικτύων και τη λήψη «εν κινήσει» υπηρεσιών ήχου και εικόνας.

Επιπλέον οι φεμτο-μικροκυψέλες παρέχουν τοπική κάλυψη, που σημαίνει παροχή ισχύος όπου υπάρχει ανάγκη. Το γεγονός ότι βρίσκονται εγγύτερα στον χρήστη δημιουργεί την απαίτηση για μικρότερη ραδιοσυχνική ισχύ για παροχή υψηλής ευρυζωνικότητας.

Ένα πολύ βασικό θέμα στα δίκτυα αυτά σε σχέση με τα παραδοσιακά είναι η ασφάλεια, δεδομένου ότι είναι πιο ευάλωτα στην υποκλοπή των ανταλλασσόμενων πληροφοριών σε περίπτωση λειτουργίας «ανοιχτής πρόσβασης». Οι φεμτο-κυψέλες χρειάζονται ασφάλεια προκειμένου να προστατευτεί η ιδιωτική πληροφορία. Ο τύπος της ανταλλασσόμενης πληροφορίας στα δίκτυα των μικρών κυψελών έχει διαφορετικούς προορισμούς και υπάρχει διαφορετική προτεραιότητα αναγκών σύμφωνα με το περιεχόμενο των κοινοποιούμενων πακέτων. Το πιο κρίσιμο σημείο σε οποιαδήποτε εφαρμογή μικρών κυψελών σήμερα είναι η εξασφάλιση υποστήριξης του δικτύου για κρυπτογράφηση και αυθεντικοποίηση από άκρο σε άκρο.

Μία άλλη αρχιτεκτονική που μπορεί αποτελεσματικά να χρησιμοποιηθεί για ικανοποίηση της επαυξημένης ζήτησης για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, συνεχούς κάλυψης και αποδεκτά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών QoS, είναι ετερογενή δίκτυα στα οποία οι φεμτο-μικροκυψέλες συνήθως αναπτύσσονται με μακρο-κυψέλες.

Μία καινοτόμος λύση για την κατανάλωση ενέργειας η οποία αναμένεται να αυξηθεί παράλληλα με την αύξηση της κίνησης των δεδομένων, είναι η Simultaneous Wireless Information and Power Transfer - SWIPT ([31], [32].) Στη μέθοδο αυτή η ασύρματη μεταφορά ισχύος είναι συνυφασμένη με την ασύρματη επικοινωνία με στόχο τη συνεχή παροχή σταθερής και συνεχόμενης ενέργειας στα ενεργειακά περιορισμένα ασύρματα συστήματα. Ωστόσο, υπόκεινται σε μερισμό πόροι φάσματος συχνοτήτων επιπλέον της ταυτόχρονης μεταφοράς ισχύος και πληροφορίας, χάρη στην ανοικτή φύση των ασύρματων καναλιών μετάδοσης. Με τη σειρά του αυτό μπορεί να δημιουργήσει σοβαρή διαρροή πληροφοριών σε διάδραση φεμτο-κυψελών μακρο-κυψελών και συστημάτων SWIPT. (Υπάρχουν τεχνολογίες ασφάλειας που προτείνονται σε μελέτες όπως είναι οι [30],[31],[32] και επιλύουν τέτοιου είδους ζητήματα).

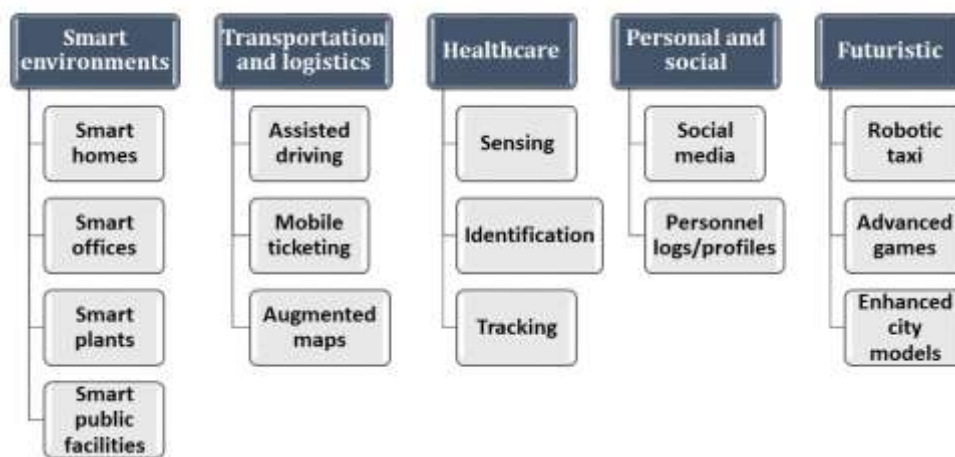
Οι Φεμτο-Κυψέλες στις Εφαρμογές ΙοΤ

Οι μελλοντικές επικοινωνίες αναμένεται να είναι ένα δίκτυο πολυπληθών συσκευών που θα αλληλεπιδρούν με πολλές εφαρμογές οι οποίες θα απαιτούν σχετικά χαμηλούς χρόνους απόκρισης. Αυτό αναφέρεται γενικότερα ως το «Διαδίκτυο των Πραγμάτων». Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι θερμοστάτες, συσκευές θέρμανσης και εξαερισμού, συστήματα παρακολούθησης κλιματιστικών καθώς και πιθανές εφαρμογές αισθητήρων για εσωτερικά τοπικά συστήματα που ενεργοποιούν λειτουργίες έξυπνων σπιτιών [29].

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων «αγγίζει» πολλές πτυχές της ζωή μας και στοχεύει ώστε να καλύψει έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στις μεταφορές, στην υγεία, στα έξυπνα περιβάλλοντα, στην προσωπική και κοινωνική ζωή κ.α., οι οποίες θα επηρεάσουν θετικά την ποιότητα της ζωής μας σε διαφορετικές τοποθεσίες όπως στο σπίτι, στα ταξίδια,

πάροχο κινητής τηλεφωνίας καθώς αποφορτίζει την κίνηση του κυψελοειδούς πύργου, ενώ οι συνδρομητές επωφελούνται από την υψηλότερη ισχύ σήματος, λόγω της γειτνιάσής τους με την εν λόγω μονάδα, ιδίως όταν το σήμα είναι ασθενές ή μη διαθέσιμο.

στον εργασιακό μας χώρο και στην υγειονομική μας περίθαλψη. Οι φεμτο-κυψέλες προτιμούνται για δίκτυα παρόχων καθώς και για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βιομηχανιών ([59], [60]). Περιγράφουν επικοινωνιακές δυνατότητες διαφόρων αντικειμένων μεταξύ τους και τη διαμόρφωση της εκλαμβανόμενης πληροφορίας. Οι περισσότερες εφαρμογές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με τον τρόπο που απεικονίζεται στην **Εικόνα 23**.



Εικόνα 23: Τομείς Εφαρμογών του ΙοΤ [53].

Οι φεμτο-κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένας μηχανισμός επικοινωνίας εφαρμογών του ΙοΤ, ειδικά στο ευφυές πλέγμα (smart grid) ([151] - [152]). Η χρήση των φεμτο-κυψελών προτείνεται επίσης για τα «πάτρια» δίκτυα (Home Area Networks - HANs) όπως επίσης και για τις εφαρμογές ΙοΤ στο χώρο της υγείας.

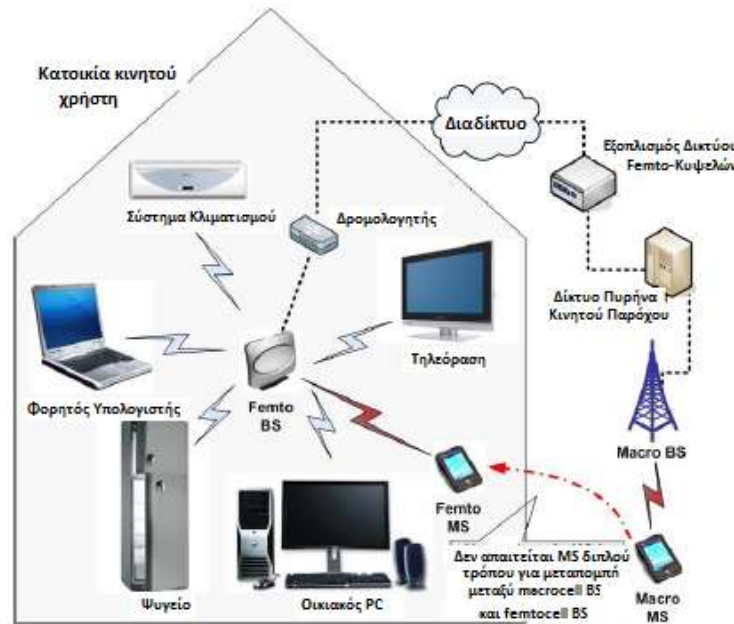
3.1.1. Περίπτωση Χρήσης: Το ΙοΤ στα Συγκοινωνιακά Μέσα και την Εφοδιαστική Αλυσίδα

Στο πεδίο των συγκοινωνιακών μέσων (transportation) και της εφοδιαστικής αλυσίδας (logistics) το ΙοΤ παίζει σημαντικό ρόλο [54]. Στο πεδίο αυτό υπάρχουν αρκετές εφαρμογές όπως είναι η (υποβοηθούμενη) οδήγηση, η επιμελητική, η αγορά εισιτηρίων μέσω κινητών συσκευών, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και οι βελτιωμένοι χάρτες. Μία σπουδαία καινοτομία συνίσταται στην ικανότητα των εταιρειών μεταφορών και επιμελητικής ώστε να ιχνηλατούν τα αγαθά τους από την αφετηρία έως και τον προορισμό και να γνωρίζουν σε πραγματικό χρόνο την τοποθεσία των αγαθών τους, ενσωματώνοντας σε αυτά ψηφιακούς κωδικούς (barcodes) και αισθητήρες. Η πρόσφατη τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των οχημάτων αναφορικά με τις δυνατότητες επαίσθησης, επικοινωνίας και επεξεργασίας δεδομένων, επιτρέπει την εξεύρεση της θέσης ενός οχήματος, ιχνηλάτηση της διαδρομής του, ακόμα και πρόβλεψη της επόμενης θέσης του. Επιπλέον, νέα συστήματα μπορούν να προσφέρουν δυνατότητες βελτίωσης των συνθηκών οδήγησης. Επιπρόσθετα, έχει παρατηρηθεί πρόοδος στα δίκτυα των οχημάτων τα οποία είναι ικανά να αποφασίζουν από μόνα τους και να έχουν αυτόνομο έλεγχο [62].

3.1.2. Περίπτωση Χρήσης: Το ΙοΤ στα Έξυπνα Περιβάλλοντα

Μερικοί από τους τομείς που αναπτύσσεται ΙοΤ στα έξυπνα περιβάλλοντα είναι οι οικίες, τα γραφεία και οι εμπορικές τοποθεσίες [168]. Μία οικία μπορεί να μετατραπεί σε ένα «έξυπνο σπίτι» όταν μέσω ενός ευέλικτου και χαμηλού κόστους συστήματος (όπως π.χ. μίας εφαρμογής

σε κινητό τηλέφωνο) δίνεται η δυνατότητα του εξ αποστάσεως ελέγχου και παρακολούθησης των ενδοικιακών συσκευών [63]. Η **Εικόνα 24** προτείνει και ενδεικτική απεικόνιση ανάπτυξης φεμτο-κυψελών σε κατοικία, σύμφωνα με την [156]. Στην [155] προτείνεται ένα σύστημα για έξυπνο εργοστάσιο που στοχεύει στη βελτίωση της ασφάλειας των εγκαταστάσεων, χρησιμοποιώντας μία ενοποιημένη λύση WSN και RFID βασισμένη στο IoT. Μία επιχείρηση μπορεί να βελτιώσει και να αυξήσει την ασφάλεια του κάνοντας χρήση του IoT. Γενικά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον βιομηχανικό έλεγχο, στην παρακολούθηση και στην ασφάλεια.



Εικόνα 24: Ενδεικτική Ανάπτυξη Φεμτο-Κυψελών σε Κατοικία [156].

3.1.3. Περίπτωση Χρήσης: Το IoT στην Υγεία

Η **Εικόνα 22** απεικονίζει μερικές από τις περιοχές όπου εφαρμόζεται το IoT στον τομέα της υγείας. Ορισμένοι από αυτούς τους θεματικούς τομείς περιλαμβάνουν επαίσθηση (sensing), ιχνηλάτηση και συλλογή δεδομένων για την αναγνώριση και επαλήθευση ταυτότητας των χρηστών. Η ικανότητα του IoT να ανιχνεύει, να αναγνωρίζει και να επικοινωνεί δίνει τη δυνατότητα για παρακολούθηση όλων των «αντικειμένων» που σχετίζονται με την υγεία, όπως π.χ. των ανθρώπων, του εξοπλισμού και των φαρμάκων, μεταξύ άλλων. Επιπλέον, εξαιτίας της τεράστιας παγκόσμιας συνδεσιμότητας του IoT, πληροφορίες που αφορούν στην υγεία των ασθενών (όπως επιμελητική, θεραπείες, διάγνωση, φαρμακευτική αγωγή, διαχείριση πόρων και παρεφερή) μπορούν να υπόκεινται σε διαχείριση, να συλλέγονται και υπόκεινται σε μερισμό με ευκολία.

Η χρήση των προσωπικών υπολογιστών και των κινητών τηλεφώνων βοηθούν στην εξατομίκευση του συστήματος υγείας ([53] - [54]). Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία σύνθεση ασύρματων σωματικών δικτύων⁵⁷ (Wireless Body Area

⁵⁷ Ένα δίκτυο Wireless Body Area Network (WBAN) συνδέει ανεξάρτητους κόμβους ή αισθητήρες που βρίσκονται πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Το δίκτυο τυπικά δύναται να εκτείνεται σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα, ενώ μερικές φορές μπορεί και να χρησιμοποιεί κόμβους που βρίσκονται εσωτερικά στο σώμα. Οι κόμβοι που συνθέτουν το WBAN είτε είναι συνδεδεμένοι εσωτερικά μέσω ενός ασύρματου καναλιού επικοινωνίας είτε εναλλακτικά είναι συνδεδεμένοι σε μία κεντρική μονάδα

Networks - WBANs) [153], τα οποία είναι ευρέως υιοθετημένα σε παθητική συλλογή υγειονομικών δεδομένων και τα οποία έχουν περιορισμένο αποθηκευτικό χώρο με την Κινητή Υπολογιστική νέφους⁵⁸ (Mobile Cloud Computing – MCC) [63], η οποία παρέχει προσαρμοστικότητα σε μαζική υπολογιστική δράση δυνατότητες αποθήκευσης των υγειονομικών δεδομένων σε μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους [55].

3.1.4. Περίπτωση Χρήσης: Το IoT στην Προσωπική και Κοινωνική Ζωή

Προσωπικές και κοινωνικές δραστηριότητες είναι κάποια άλλα πεδία στα οποία οι εφαρμογές IoT έχουν επιφέρει βελτιώσεις. Το IoT έχει επιδράσει σε διάφορα πεδία όπως είναι π.χ. η κοινωνική δικτύωση όπου η εκτενής σύνδεση έξυπνων συσκευών παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να επικοινωνούν και να αλληλεπιδρούν, δίχως να λαμβάνουν υπόψη τη μεταξύ τους απόσταση.

Τα ιστορικά ερωτήματα (historic queries) αποτελούν ένα άλλο πεδίο όπου κάποιος μπορεί να ανακτήσει ή να αποθηκεύσει δεδομένα για οτιδήποτε και από οπούδήποτε χωρίς να ανησυχεί για την απώλειά τους. Επιπλέον, το IoT έχει επιδράσει στον τομέα της ασφάλειας όπου η εγκατάσταση έξυπνων συστημάτων ασφάλειας χρησιμοποιείται για την περιφρούρηση της ιδιοκτησίας και την παρεμπόδιση κλοπών.

3.1.5. Περίπτωση Χρήσης: Το «Φουτουριστικό» IoT

Το μέλλον του IoT είναι πολλά υποσχόμενο, καθώς αναδύονται πολλαπλές δυνατότητες. Στην **Εικόνα 22** απεικονίζονται μόνο μερικές από αυτές, όπως π.χ. το ταξί ρομπότ, ένα μοντέλο για πληροφορίες πόλεων και βελτιωμένα δωμάτια παιχνιδιών. Η επέκταση του Παγκόσμιου Ιστού που προς το περιβάλλον Web 2.0⁵⁹, θα προσφέρει σημαντικές και νέες δυνατότητες.

Το μελλοντικό αυτό μοντέλο του διαδικτύου θα βοηθήσει στην αναβάθμιση του ίδιου αλλά και των τεχνολογιών που αφορούν στους αισθητήρες, λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που συλλέγονται για το περιβάλλον του χρήστη και χρησιμοποιώντας τις για τη βελτίωση του παρεχόμενου περιεχομένου.

3.2. Υγεία

Κινητή Υγεία και Εξ αποστάσεως Παρακολούθηση Ασθενών στο 5G

Το δίκτυο μικρών κυψελών θα διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στην επιτυχή εφαρμογή των υπηρεσιών κινητής υγείας (m-health). Μπορεί να ενισχύσει την ποιότητα των κινητών ιατρικών υπηρεσιών (m-QoS) και συναφών ιατρικών εμπειριών (m-QoE) για χρήστες που βρίσκονται σε

επεξεργασίας που τοποθετείται πάνω – ή μακριά – από το σώμα. Οι πιο συχνές εφαρμογές των WBANs είναι η παρακολούθηση των ζωτικών παραμέτρων και η επικοινωνία μεταξύ των έξυπνων υφασμάτων [61].

⁵⁸ Mobile Cloud Computing (MMC) είναι ο συνδυασμός της υπολογιστικής νέφους και της υπολογιστικής των κινητών συσκευών με στόχο τη «μεταφορά»/διάθεση πλούσιων υπολογιστικών πόρων στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας, σε διαχειριστές δικτύων καθώς και σε παρόχους υπολογιστικής νέφους. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_cloud_computing.

⁵⁹ Ο όρος Web 2.0, χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη νέα γενιά του Παγκόσμιου Ιστού η οποία βασίζεται στην όλο και μεγαλύτερη δυνατότητα των χρηστών του Διαδικτύου να μοιράζονται πληροφορίες και να συνεργάζονται επιγραμματικά (online).

εσωτερικούς και σε εξωτερικούς χώρους καθώς και χρήστες που βρίσκονται «εν κινήσει» είτε πρόκειται για ασθενείς είτε για επαγγελματίες υγείας [18][19].

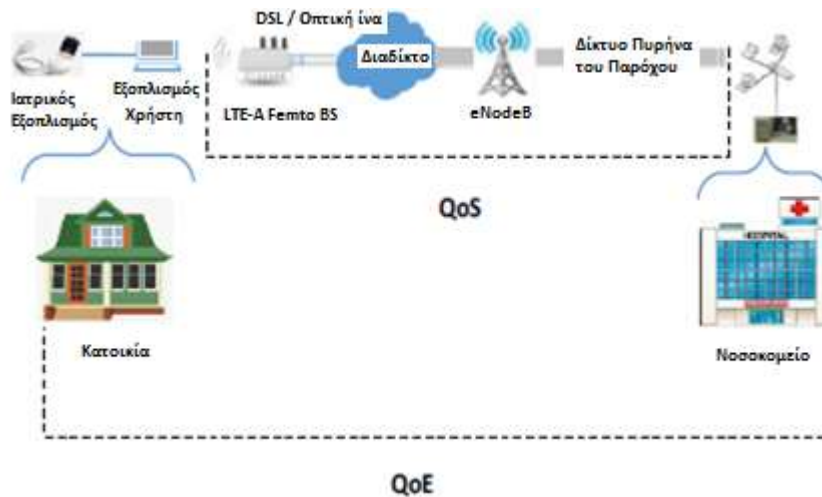
Η κινητή υγεία στηρίζεται στην ιδέα της πρόσβασης οπουδήποτε και οποτεδήποτε, εκμεταλλευόμενη τα καλύτερα χαρακτηριστικά σύνδεσης των αναδυόμενων ασύρματων επικοινωνιών και δικτυακών τεχνολογιών σε ετερογενή περιβάλλοντα [17].

Οι υπηρεσίες κινητής υγείας περιλαμβάνουν διαχείριση χρόνιων ασθενειών, εξ αποστάσεως παρακολούθηση και συλλογή πληροφοριών ασθενή, διαγνωστική και θεραπεία, διαχείριση υγειονομικών πόρων, εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση ασθενών όπως και εκπαίδευση υγειονομικού προσωπικού [21].

3.2.1. Περίπτωση Χρήσης: Μετάδοση Βίντεο Εσωτερικού Χώρου

Η ιδέα της εξ αποστάσεως προ-νοσοκομειακής περίθαλψης είναι αναπόσπαστο συστατικό των κινητών συστημάτων υγείας [22]. Η πληροφορία μεταφέρεται μέσω κινητών υπηρεσιών υγείας από μακρινούς εσωτερικούς χώρους προς εξειδικευμένους επαγγελματίες υγείας, που βρίσκονται σε νοσοκομεία. Πολλά επείγοντα περιστατικά συμβαίνουν σε εσωτερικούς χώρους. Είναι σημαντικής σημασίας η πρόσβαση σε αξιόπιστες ασύρματες τεχνολογίες ώστε οι εφαρμογές κινητής υγείας να είναι προσβάσιμες στους χώρους αυτούς. Οι μικρές κυψέλες σε εσωτερικούς χώρους στους οποίους έχουν πρόσβαση οι επαγγελματίες υγείας παρέχουν διάφορα πλεονεκτήματα, ως ακολούθως: βελτιωμένη κάλυψη, σημαντική αύξηση ταχύτητας και απόδοσης, αδιάλειπτη συνδεσιμότητα, ικανότητα προτεραιοποίησης επείγουσας κίνησης και βελτιωμένη ασφάλεια [18].

Μία περίπτωση χρήσης από άκρο-σε-άκρο μετάδοση ιατρικού βίντεο συνεχούς ροής – όπως το ιατρικό υπερηχογράφημα – με χρήση μικρών κυβελών, απεικονίζεται στην **Εικόνα 25** [18]:



Εικόνα 25: Σενάριο Εσωτερικού Χώρου Ιατρικού Υπερηχογραφήματος Συνεχούς Ροής [18].

3.2.2. Περίπτωση Χρήσης: Κινητό Σύστημα Παρακολούθησης Υγείας

Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο εμπεριέχει φορατούς αισθητήρες μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα της εξ αποστάσεως παρακολούθησης ζωτικών σημείων των ασθενών (όπως π.χ. καρδιακός παλμός, θερμοκρασία σώματος, επίπεδα γλυκόζης, πίεση κ.α.), της επικοινωνίας μέσω νέφους και τη δημιουργία αιτημάτων για βοήθεια από τον ασθενή ([25], [26]). Ιατρικές υπηρεσίες μπορούν να παρέχονται και από εξειδικευμένους ιατρούς από

οποιοδήποτε σημείο του κόσμου, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα εκτίμησης των μετρήσεων μέσω των υπηρεσιών νέφους.

Το όλο σύστημα θα μπορούσε να αποτελείται από μία συσκευή αισθητήρων που επικοινωνεί με μία κινητή συσκευή, μία ταμπλέτα (tablet) ή ένα έξυπνο κινητό, που έχει σύνδεση στο υπολογιστικό νέφος. Σήμερα οι περισσότεροι άνθρωποι είναι κάτοχοι τέτοιων συσκευών, οι οποίες είναι και οικονομικά προσιτές. Ένα τέτοιου είδους κινητό σύστημα παρακολούθησης υγείας συνιστά μία κινητή νεφοϋπολογιστική υπηρεσία παρακολούθησης της υγείας που χρησιμοποιεί φεμτο-κυψέλες και η οποία βασίζεται σε δύο στάδια:

1. Στο **1^ο στάδιο** απαιτείται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σώματος (BSN - Body Sensor Network). Ένα τέτοιο δίκτυο είναι σε θέση ώστε να υποστηρίζει πολλαπλούς ρυθμούς δεδομένων με αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική μετάδοση. Οι αισθητήρες που είναι προσαρτημένοι στον ασθενή συλλέγουν μετρήσεις όπως πίεση, θερμοκρασία, επίπεδο σακχάρου κ.α. του χρήστη της κινητής συσκευής, τις οποίες στέλνουν σε μία αντίστοιχη εφαρμογή της κινητής συσκευής του.
2. Στο **2^ο στάδιο** οι μετρήσεις αυτές στέλνονται μέσω της εφαρμογής της κινητής συσκευής στον αντίστοιχο κινητό σταθμό (Mobile Station - MS) ο οποίος είναι καταχωρημένος σε σταθμό βάσης φεμτο-κυψελών. Ο κινητός σταθμός προωθεί διαδοχικά, και με ασφαλή τρόπο, τις μετρήσεις και την πληροφορία εντοπισμού θέσης μέσω GPS, το τηλέφωνο επικοινωνίας και τον αριθμό IMEI (International Mobile Equipment identity)⁶⁰ προς το σταθμό βάσης φεμτο-κυψελών (HNB, Home Node base Station) ο οποίος συγκρίνει τα δεδομένα με τιμές αποθηκευμένες σε βάση δεδομένων και οι οποίες έχουν οριστεί ως «όρια των ιατρικών εξετάσεων». Αν οι απεσταλμένες μετρήσεις είναι ασυνήθιστες – και κατά συνέπεια μη φυσιολογικές – τις αναμεταδίδουν στον κεντρικό ελεγκτή του νέφους όπου και αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία. Στο νέφος επίσης αποθηκεύονται οι πληροφορίες θέσης και ο αριθμός IMEI ώστε να μπορεί ένα ιατρικό κέντρο να δράσει στέλνοντας ιατρικές συμβουλές στον ασθενή μέσω τηλεφωνικής κλήσης ή SMS ή μέσω εφαρμογής ή στέλνοντας ασθενοφόρο στην περιοχή του ασθενή ώστε να του παράσχει την απαραίτητη βοήθεια ([23], [24]).

Mobile Small Cells - Κινητές Μικρές Κυψέλες

Μία κινητή μικρή κυψέλη συνιστά ενοποίηση κινητών αναμεταδοτών και μικρής κυψέλης. Επιτρέπει στους κινητούς χρήστες να μετακινούνται και να συνδέονται στα δίκτυα που βρίσκονται στην περιοχή τους. Αξιοποιεί μια τεχνική ραδιοδιεπαφής για σύνδεση με τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης μακρο-κυψελών (eNodeB). Μπορεί να εγκατασταθεί σε οχήματα (π.χ. τρένα, λεωφορεία, ασθενοφόρα) και να λειτουργεί ως μία απλή μονάδα βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση, τη διεκπεραιωτικότητα και την ποιότητα του σήματος [27]. Επιπλέον, μειώνει τις μεταπομπές για τους κινητούς χρήστες μέσα στο όχημα εκτελώντας μία και μοναδική λειτουργία μεταπομπής για όλους τους συνδεδεμένους χρήστες [17].

Οι μικρές κυψέλες επιλύουν το ενδεχόμενο απώλειας της σύνδεσης εξαιτίας της μεγάλης κίνησης του οχήματος. Αυτό επιτυγχάνεται μετατρέποντας το κινούμενο όχημα σε κινητή μικρή κυψέλη, όπου ο εξοπλισμός του χρήστη είναι συνδεδεμένος εσωτερικά σε έναν σταθμό βάσης μικρών κυψελών και όχι σε έναν εξωτερικό σταθμό βάσης μακρο-κυψελών. Συνεπώς, το σήμα

⁶⁰ Το IMEI είναι ένας, συνήθως μοναδικός αναγνωριστικός κωδικός αριθμός για αναγνώριση κινητών τηλεφώνων, αποτελούμενος από 15 ψηφία. Περιλαμβάνει πληροφορίες για τον κατασκευαστή και το μοντέλο της συσκευής. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αναγνωρίζει τη συσκευή μοναδικά, βάσει του IMEI. Ο κωδικός IMEI είναι ενσωματωμένος σε όλα τα κινητά τηλέφωνα. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Mobile_Equipment_Identity

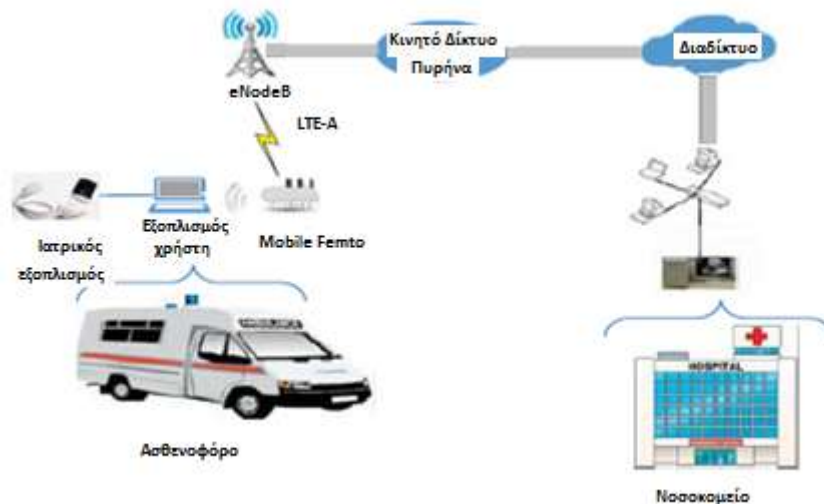
αποφεύγει την απώλεια διεύθυνσης από τα μεταλλικά τοιχώματα του οχήματος, με αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα σήματος ([17], [28]).

3.2.3. Περίπτωση Χρήσης: Μετάδοση Βίντεο Ιατρικού Περιεχομένου Μέσα από Ασθενοφόρο με Χρήση Δικτύου Μικρών Κυψελών.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής κινούμενης υγείας με χρήση μικρών κυψελών είναι η μετάδοση βίντεο συνεχούς ροής ιατρικού υπερηχογραφήματος σε κινούμενο περιβάλλον (όπως είναι το ασθενοφόρο). Η υπηρεσία αυτή είναι κρίσιμη και άκρως απαραίτητη όταν ένας ασθενής μεταφέρεται μέσω ασθενοφόρου στο νοσοκομείο, ειδικά όταν βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή ή όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση στους δρόμους. Όσο ο ασθενής βρίσκεται μέσα στο ασθενοφόρο το παραϊατρικό προσωπικό έχει το χρόνο να μεταφέρει βίντεο ή εικόνα υψηλής ανάλυσης από τον ασθενή.

Ένα ετερογενές δίκτυο (όπως π.χ. ένα δίκτυο μικρών κυψελών και μακρο-κυψελών) μπορεί να υποστηρίξει ασύρματες εφαρμογές σε κινούμενο όχημα επιτυγχάνοντας υψηλούς ρυθμούς ανερχόμενης ζεύξης δεδομένων. Έτσι υποστηρίζεται η μεταφορά υψηλής ανάλυσης βίντεο προς το σταθμό βάσης. Στην περίπτωση αυτή, ο σταθμός βάσης μικρών κυψελών (HeNB) βρίσκεται μέσα στο ασθενοφόρο. Ένας αναμεταδότης είναι εγκατεστημένος στην οροφή του ασθενοφόρου προκειμένου να λαμβάνει/μεταδίδει δεδομένα από/προς το δίκτυο οπισθόφορης ζεύξης (backhaul) μακρο-κυψελών. Το HeNB που είναι εγκατεστημένο εσωτερικά του ασθενοφόρου δημιουργεί μια ασύρματη σύνδεση μεταξύ του παραϊατρικού προσωπικού και του σημείου πρόσβασης μικρών κυψελών SAP (Small Cell Access Point).

Το SAP και ο αναμεταδότης είναι συνδεδεμένα μέσω του ενσύρματου δικτύου. Η κεραία του εξωτερικού αναμεταδότη είναι ισχυρότερη από αυτή του εξοπλισμού του χρήστη. Η καλύτερη ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος από το SAP μπορεί να περιέχει βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών όσο αφορά την ταχύτητα, τη χωρητικότητα, την ποιότητα και την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης. Μία περίπτωση χρήσης που αφορά σε μετάδοση ιατρικού βίντεο συνεχούς ροής δια της χρήσης μικρών κυψελών από ασθενοφόρο φαίνεται στην **Εικόνα 26** [17]:



Εικόνα 26: Περίπτωση Χρήσης Μετάδοσης Βίντεο Συνεχούς Ροής από Ασθενοφόρο [17].

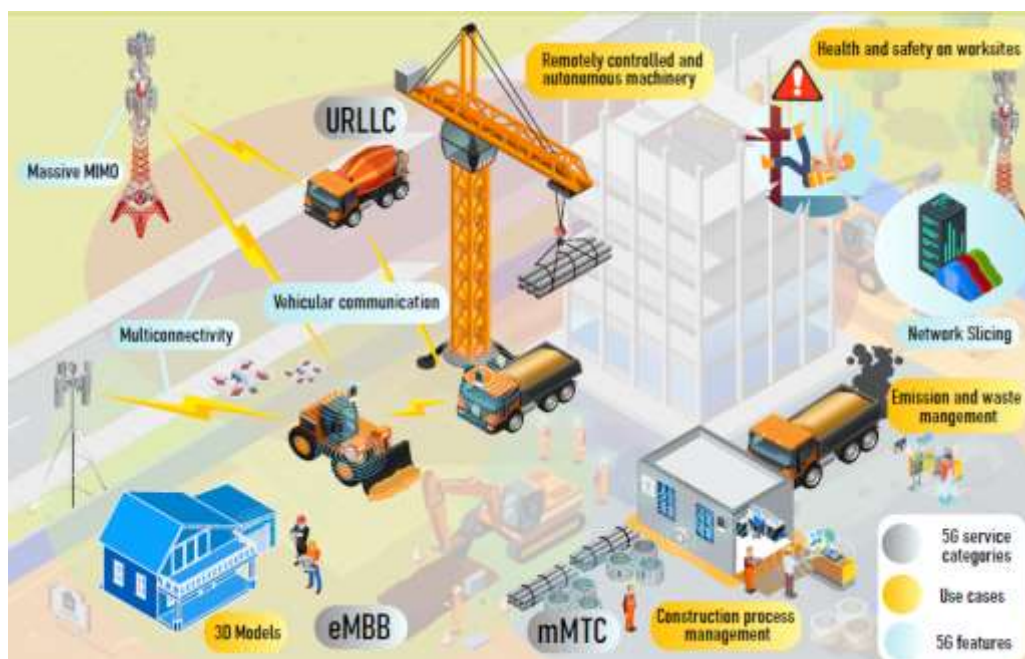
3.3. Κατασκευαστική Βιομηχανία

Ο τομέας των κατασκευών αποτελεί ένα εξαιρετικά δυναμικό περιβάλλον στο οποίο είναι απαραίτητη η παροχή επικοινωνίας σε στοιχεία που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, όπως είναι οι εργάτες και/ή τα μηχανήματα. Σε ένα τέτοιου είδους σενάριο, δεν είναι εφικτές οι ενσύρματες επικοινωνίες καθώς δεν μπορούν εύκολα και γρήγορα να προσαρμόζονται σε αντίστοιχες μεταβολές και κυρίως διότι δεν υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών. Αντιθέτως η χρήση ασύρματων επικοινωνιών είναι ουσιώδης στο περιβάλλον αυτό. Τα κυψελοειδή δίκτυα πλεονεκτούν ως προς το γεγονός ότι χρησιμοποιούν αδειοδοτούμενο φάσμα προσφέροντας υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Επιπλέον, υποστηρίζουν την κινητικότητα του χρήστη (με μεταπομπές (handovers) μεταξύ κυψελών στο ίδιο δίκτυο) και την περιαγωγή (roaming) (με μεταπομπές μεταξύ διαφορετικών δικτύων), παρέχοντας αδιάλειπτη επικοινωνία παντού. Τα δίκτυα 5G εκτός του ότι εξυπηρετούν τεράστιο αριθμό συσκευών καλύπτοντας μεγάλες περιοχές, παρέχουν μεγάλη ευρυζωνικότητα, αξιοπιστία, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή απόδοση που είναι απαραίτητες προδιαγραφές για εφαρμογές όπως η εικονική πραγματικότητα (VR) και η επαυξημένη πραγματικότητα (AR).

Οι 5G τεχνολογίες, ιδιαίτερα με τη χρήση μικρών κυψελών, βελτιώνουν τις δικτυακές επιδόσεις προσφέροντας π.χ. ρυθμούς δεδομένων 100 φορές μεγαλύτερους από εκείνους του 4G, λανθάνουσα καθυστέρηση (latency) μικρότερη από 1 ms, αξιοπιστία (reliability) της τάξης του 99,999% και δυνατότητα συνδέσεων σε τεράστιο αριθμό συσκευών (UEs). Επιπλέον, η ενοποίηση του 5G με τις Δορυφορικές Επικοινωνίες ή τα Μη Επίγεια Δίκτυα (Non-Terrestrial Networks - NTNs), στο πλαίσιο των δράσεων του φορέα 3GPP, επιφέρει βελτιώσεις σε όρους επέκτασης της κάλυψης και της αυξημένης δικτυακής διαθεσιμότητας. Υπό αυτή τη θεώρηση, το 5G αναμφίβιολα καθίσταται ικανό ώστε να υποστηρίξει τις απαιτήσεις που εγείρονται από το πλαίσιο δράσεων “Construction 4.0”⁶¹ ([158], [159]).

Η πρόκληση χρήσης του ψηφιακού μετασχηματισμού για την αυτοματοποίηση της κατασκευαστικής βιομηχανίας έχει πολλά πεδία εφαρμογής (βλέπε **Εικόνα 27**). Καταρχήν αναγνωρίζονται πέντε κυρίαρχοι τομείς, ως εξής: Αυτόνομες συσκευές και εξ αποστάσεως ελεγχόμενες συσκευές, υγιεινή και ασφάλεια σε χώρους εργασίας, τρισδιάστατα μοντέλα, διαχείριση κατασκευών και διαχείριση εκπομπών-αποβλήτων [34].

⁶¹ Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το πλαίσιο δράσεων Construction 4.0 βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.buildingtransformations.org/articles/construction-4-0>



Εικόνα 27: 5G στην Κατασκευαστική Βιομηχανία [34].

3.3.1. Περίπτωση Χρήσης: Αυτόνομα και Εξ Αποστάσεως Ελεγχόμενα Μηχανήματα

Η περίπτωση αυτή αφορά σε αυτόνομο μηχανολογικό εξοπλισμό (π.χ. ρομπότ ή γερανοί και σε εξοπλισμό-μηχανήματα ελεγχόμενα εξ αποστάσεως (όπως π.χ. μπουλντόζες και εκσκαφείς) στα εργοτάξια) [160]. Τέτοιου είδους συσκευές είναι σε θέση ώστε να συλλέγουν – δια της χρήσης αισθητήρων – πληροφορίες από το περιβάλλον τους σε πραγματικό χρόνο (π.χ. εικόνες βίντεο ή φυσικές παράμετροι) και ανάλογα να λαμβάνουν αποφάσεις. Στην περίπτωση των αυτόνομων μηχανικών εξοπλισμών οι αποφάσεις λαμβάνονται από τον ίδιο τον εξοπλισμό, ενώ στην περίπτωση των τηλεχειριζόμενων εξοπλισμών οι αποφάσεις λαμβάνονται από τον αντίστοιχο χειριστή. Τα αυτόνομα συστήματα μειώνουν τα ανθρώπινα λάθη ενώ τα τηλεχειριζόμενα μειώνουν δραστικά τον κίνδυνο των εργατικών ατυχημάτων. Αμφότερα συμβάλλουν σε αύξηση της παραγωγικότητας (productivity) και της διατηρησιμότητας (sustainability) με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και μεγαλύτερη απόδοση των εργασιών.

Η χρήση αυτών των μηχανημάτων στα εργοτάξια έχει το πλεονέκτημα της μη έκθεσης των εργατών σε επικίνδυνες καταστάσεις και περιβάλλοντα, επιτρέποντας στους χειριστές έλεγχο των μηχανημάτων από ασφαλείς θέσεις.

Η γρήγορη επικοινωνία μεταξύ των μηχανημάτων και της οντότητας που λαμβάνει τις αποφάσεις στα αυτόνομα και στα εξ αποστάσεως ελεγχόμενα μηχανήματα είναι ζωτικής σημασίας και απόλυτα απαραίτητη. Μοιραία ατυχήματα μπορούν να γίνουν στην περίπτωση αποτυχίας επικοινωνίας ή καθυστέρησης της λήψης της πληροφορίας [34]. Η χρήση των δικτύων μικρών κυψελών ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια. Ένα άλλο πλεονέκτημα των δικτύων μικροκυψελών είναι ότι υποστηρίζει το δίκτυο των αισθητήρων το οποίο σε ένα εργοτάξιο είναι απαραίτητο για να λαμβάνει παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος [34].

3.3.2. Περίπτωση Χρήσης: Ασφάλεια και Υγεία στα Εργοτάξια

Η ασφάλεια ενός εργοταξίου στηρίζεται στην παρακολούθηση των περιοχών υψηλού κινδύνου και την ειδοποίηση με αυτοματοποιημένα μηνύματα ([161], [162]). Το εργοτάξιο

ψηφιοποιείται αποτυπώνοντας περιοχές υψηλού κινδύνου, μηχανήματα και εργάτες σε πραγματικό χρόνο, ενώ ένα δίκτυο αισθητήρων μετρά περιβαλλοντικούς παράγοντες (όπως ποιότητα αέρα, θερμοκρασία και θόρυβο). Ειδοποιήσεις, σε πραγματικό χρόνο, προς τους εργάτες σε περιοχές υψηλής επικινδυνότητας μπορούν να ποτρέψουν ατυχήματα/θανάτους και επιπλέον να μειώσουν τον αριθμό πτώσεων του προσωπικού ή χτυπημάτων από εξοπλισμούς/μηχανήματα.

Επίσης οι εργάτες είναι εφοδιασμένοι με φορητές συσκευές που παρακολουθούν ζωτικά στοιχεία τους και σε περίπτωση προβλήματος τους ενημερώνουν για πιθανή χρήση εξοπλισμού ασφαλείας [163].

Αυτή η περίπτωση χρήσης απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό συσκευών (αισθητήρες και φορητά) συνδεδεμένων σε δίκτυο. Οι συσκευές αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Με στόχο την έγκαιρη ειδοποίηση των εργατών πριν η ζωή ή η ακεραιότητά τους τεθεί σε ενδεχόμενο κίνδυνο, η επικοινωνία πρέπει να επιτυγχάνεται με χαμηλή καθυστέρηση (π.χ. μεταξύ 5 έως 10 ms) [34].

3.3.3. Περίπτωση Χρήσης: Τρισδιάστατα Μοντέλα

Η περίπτωση αυτή χρήσης αναφέρεται στη χρήση επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality-AR) και εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality-VR) για την παροχή τρισδιάστατης εικόνας από τα σχέδια του εν εξελίξει κατασκευαστικού έργου. Επιπρόσθετα, η περίπτωση αυτή χρήσης εξετάζει το συνδυασμό αυτών των τεχνικών με τη Μοντελοποίηση Κατασκευαστικών Πληροφοριών (Building Information Modeling - BIM). Υπάρχει η δυνατότητα παροχής πρόσθετης πληροφόρησης όπως π.χ. σχετικά με προγραμματισμό εργασιών, το κόστος υλικών ή τα χαρακτηριστικά διαφορετικών στοιχείων κατασκευής στην εικόνα που δημιουργείται μέσω των υπηρεσιών AR και/ή VR. Αυτό μπορεί αισθητά να διευκολύνει τον προγραμματισμό των κατασκευαστικών έργων και να μειώσει την πιθανότητα λάθους κατά την εκτέλεση [164].

Οι προκλήσεις της περίπτωσης αυτής χρήσης, είναι αρχικά συνδεδεμένες με την ανάγκη μετάδοσης υψηλής ποιότητας βίντεο σε πραγματικό χρόνο, που απαιτεί ρυθμούς > 25 Mbps ανά συσκευή, ενώ η παροχή της αίσθησης της πραγματικότητας στους χρήστες εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας απαιτεί καθυστέρηση χαμηλότερη των 10 ms [34].

3.3.4. Περίπτωση Χρήσης: Διαχείριση Διαδικασιών Κατασκευών

Η περίπτωση αυτή χρήσης εστιάζει στην ψηφιοποίηση και αυτοματοποίηση της διαχείρισης των διαδικασιών κατασκευής ([165], [166]). Αποσκοπεί στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών οι οποίες έχουν μεγάλη επίπτωση στο τελικό αποτέλεσμα της κατασκευαστικής εργασίας, όπως είναι π.χ. η πήξη σκυροδέματος ή η εκτέλεση συγκόλλησης. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιούνται δίκτυα αισθητήρων που παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι η «ωριμότητα» του σκυροδέματος, η τοποθεσία εξοπλισμού και μηχανημάτων ή οι καιρικές συνθήκες, IP κάμερες και drones για τη λήψη εικόνων βίντεο 4K⁶². Όλες αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν την εξ αποστάσεως παρακολούθηση της προόδου καθώς και συμπληρωματική λήψη αποφάσεων, κατά συνέπεια μειώνοντας χρόνο και κόστος ενώ παράλληλα αυξάνουν την παραγωγικότητα και την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

Επιπλέον, αποφεύγονται μακροχρόνια και/ή βραχυχρόνια προβλήματα από ανεπαρκή διαχείριση: Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια πήξης του σκυροδέματος, ένας μικρός χρόνος αναμονής μπορεί να οδηγήσει σε μελλοντικά προβλήματα μέσα στην οικοδομή όπως είναι η

⁶² Βλέπε: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7_4K

εμφάνιση ρωγμών ενώ ένας μεγάλος χρόνος αναμονής οδηγεί σε χάσιμο χρόνου και επομένως σε ένα λιγότερο αποδοτικό χρόνο κατασκευών. Στην περίπτωση αυτή οι αισθητήρες μπορούν να βοηθήσουν όχι μόνο στη σωστή μέτρηση της σύνθεσης του σκυροδέματος αλλά και στο στάδιο πήξης αυτού σε κάθε στιγμή.

Επιπλέον, έχοντας περισσότερο έλεγχο στους υφιστάμενους πόρους και στην κατάσταση των εργασιών, βελτιστοποιείται η εφοδιαστική αλυσίδα. Με αυτό τον τρόπο οι συλλεγόμενες πληροφορίες μπορούν να συμβάλλουν ώστε οι παραγγελίες υλικών να γίνονται έγκαιρα αλλά και για να μειώνονται τυχόν καθυστερήσεις συγκριτικά με τον αρχικό προγραμματισμό των έργων. Εν τέλει, αυτός ο τύπος παρακολούθησης μπορεί να είναι και χρήσιμος για την παρεμπόδιση κλοπής υλικών και/ή εξοπλισμού.

Και σε αυτή την περίπτωση χρήσης είναι απαραίτητη η σύνδεση ενός μεγάλου πλήθους συσκευών στο εργοτάξιο. Για την μεταφορά βιντεοεικόνων με υψηλή ποιότητα απαιτείται υψηλή ευρυζωνικότητα γύρω στα 25 Mbps ανά συσκευή. Για την ενεργοποίηση του εξ αποστάσεως ελέγχου των drones είναι απαραίτητο στην επικοινωνία να υπάρχει πολύ χαμηλή καθυστέρηση της τάξης των 1 με 10 ms [34].

3.3.5. Περίπτωση Χρήσης: Διαχείριση Εκπομπών και Αποβλήτων

Αυτή η περίπτωση χρήσης είναι προσανατολισμένη προς μία μορφή βιώσιμης κατασκευής [167]. Περιλαμβάνει όλες τις εφαρμογές που στοχεύουν στη διαχείριση και στον έλεγχο εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και αποβλήτων. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται η χρήση αισθητήρων με σκοπό τη μέτρηση κατάλληλων παραμέτρων (όπως π.χ. της ποσότητας των συσσωρευμένων αποβλήτων ή των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα ή του διοξειδίου του αζώτου στο περιβάλλον). Η κάλυψη των αναγκών της περίπτωσης αυτής απαιτεί συνδεσιμότητα ενός υπερβολικά μεγάλου αριθμού αισθητήρων, οι οποίοι θα πρέπει να είναι ικανοί ώστε να μεταφέρουν πληροφορίες ακόμα και στην περίπτωση που βρίσκονται εκτός του χώρου του εργοταξίου, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στα φορτηγά για τον έλεγχο των αερίων που εκπέμπουν κατά τη διάρκεια των ταξιδιών τους [34].

3.4. Απρόσμενα Γεγονότα

3.4.1. Περίπτωση Χρήσης: Επιτάχυνση Εφαρμογών στα Άκρα του Δικτύου 5G, σε Περιβάλλον Σταδίου

Οι πάροχοι υπηρεσιών ευρυεκπομπής (broadcasters) επιδιώκουν την κάλυψη γεγονότων με νέους τρόπους προκειμένου να προσφέρουν, από τη μια μεριά, στους θεατές συναρπαστικές προοπτικές και από την άλλη για να επιτύχουν μείωση του κόστους παραγωγής και διανομής. Την ίδια στιγμή, οι πάροχοι δικτύων στοχεύουν στην «αύξηση» της χρήσης του δικτύου τους ενώ οι ιδιοκτήτες σταδίων – ή παρεμφερών χώρων που μπορούν να φιλοξενήσουν συμβάντα μεγάλης επισκεψιμότητας – επιδιώκουν ώστε να καταστήσουν την εμπειρία των επισκεπτών όσο το δυνατόν περισσότερο ευχάριστη καθώς και να προάγουν συμπληρωματικά έσοδα, εκτός από την πώληση εισιτηρίων. Η λήψη ζωντανού περιεχομένου από τις κάμερες που βρίσκονται στον αγωνιστικό χώρο, οι επαναλήψεις και οι πρόσθετες συναφείς πληροφορίες που μπορούν να διατίθενται σε κινητές συσκευές αποτελούν μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα περίπτωση χρήσης για όλους τους προηγούμενους «παίκτες». Μείζονες προκλήσεις συνιστούν η καθυστέρηση στη διανομή/διάθεση περιεχομένου και η σημαντική καταπόνηση στην οπισθοζεύξη (backhaul) του δικτύου. Οι προκλήσεις αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μία θεώρηση όπως στην αντίστοιχη περίπτωση χρήσης στο πλαίσιο δράσεων του ερευνητικού προγράμματος 5G-ESSENCE⁶³ [169]. Το ερευνητικό πρόγραμμα 5G-ESSENCE προσφέρει πλεονεκτήματα ωφελεί τους παραγωγούς μέσων ενημέρωσης και τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας καθώς τους επιτρέπει να παρέχουν μία υψηλή διαδραστική εμπειρία θεατών και βελτιστοποιεί διαδικασίες εφαρμόζοντας βασικές λειτουργίες στα άκρα του δικτύου (π.χ. εξελιγμένες Πολυμεσικές Υπηρεσίες Ευρυεκπομπής Πολλαπλής Εκπομπής (evolved Multimedia Broadcast Multicast Services - eMBMS) ή υπηρεσίες τοπικών δικτύων (local network services) όπως αναλυτικά στοιχεία σε πραγματικό χρόνο με ταυτόχρονη υποστήριξη της «πολλαπλής μίσθωσης» (“multitenancy”) και εξυπηρέτησης πολλών παρόχων από μικρές κυψέλες ([170] - [174], [181]).

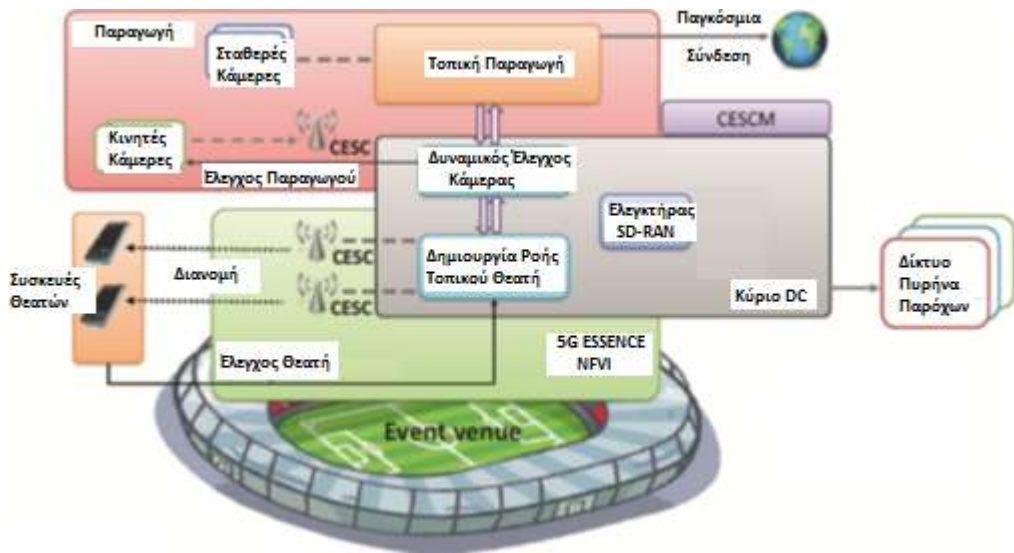
Αξιοποιώντας τα οφέλη της εικονικοποίησης των μικρών κυψελών και της αφαίρεσης ραδιοπόρων όπως και της βελτιστοποίησης ενσωματωμένου δικτυακού νέφους, επιτυγχάνεται η ευκολία κάλυψης και η απαίτηση για χωρητικότητα στις υποδομές πολυμέσων καθώς και η αύξηση της ασφάλειας, εφόσον το περιεχόμενο παραμένει τοπικά.

Επιπλέον, προκύπτουν πρόσθετα οφέλη για τους πάροχους και τους ιδιοκτήτες σταδίων όπως τα ακόλουθα αναφερόμενα:

- (i) Χαμηλότερη καθυστέρηση εξαιτίας της συντόμευσης της διαδρομής για τη μετάδοση των δεδομένων.
- (ii) Διατηρούμενη χωρητικότητα οπισθοζεύξης (backhaul) εξαιτίας της εξυπηρέτησης των ζωντανών ροών και επαναλήψεων τοπικά, γεγονός το οποίο δεν δημιουργεί επιπρόσθετη ένταση στο δίκτυο οπισθοζεύξης και στα στοιχεία του δικτύου πυρήνα.

⁶³ Το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα 5G-ESSENCE (Grant Agreement (GA) No.761592) εστιάζεται στη μελέτη της υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου και της διάθεσης μικρών Κυψελών ως Υπηρεσία (Small Cell as a Service - SaaS) στην αγορά μικρών κυψελών, που διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη του 5G και πέρα από αυτό. Το πρόγραμμα 5G ESSENCE προτείνει μία εξαιρετικά ευέλικτη και κλιμακοθετήσιμη πλατφόρμα, ικανή για να υποστηρίξει νέα επιχειρηματικά μοντέλα και νέες χρηματοροές μέσω της δημιουργίας αγοράς ουδέτερου ξενιστή (neutral host market) και δια της μείωσης του λειτουργικού κόστους προσφέροντας νέες ευκαιρίες για ανάπτυξη, λειτουργία και εκμετάλλευση δικτυακών υποδομών που εξυπηρετούν εφαρμογές 5G σε τρεις (3) καθιερωμένους τομείς της αγοράς. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το έργο βλέπε επίσης: <https://www.5g-essence-h2020.eu/>

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυψελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G



Εικόνα 28: Επιτάχυνση Εφαρμογών στα Άκρα του Δικτύου 5G σε Περιβάλλον Σταδίου [169]

Οι εμπλεκόμενοι φορείς-«παίκτες» στο σενάριο της επιτάχυνσης εφαρμογών στα άκρα του δικτύου 5G σε περιβάλλον σταδίου, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 28**, παρατίθενται ως κάτωθι ([169], [181]):

1. SCNO (Small Cell Network Operator) - Πάροχος Δικτύου Μικρών Κυψελών: Ο ιδιοκτήτης της αναπτυσσόμενης υποδομής δικτύου μικρών κυψελών στο στάδιο.
2. VSCNO (Virtual Small Cell Network Operator) - Εικονικός Πάροχος Δικτύου Μικρών Κυψελών: Ο διαχειριστής της διαθέσιμης υποδομής του σταδίου που παρέχει υπηρεσίες προς τους τελικούς χρήστες.
3. End-Users: Οι τελικοί χρήστες.
4. MOs (Mobile Operators) - Πάροχοι Κινητών Δικτύων: Πάροχοι κινητών δικτύων, υπεύθυνοι για να φέρουν πρόσβαση στις δικτυακές υποδομές τους και υπηρεσίες επικοινωνίας στο στάδιο.
5. SPs (Service Providers) - Πάροχοι Υπηρεσιών: Εταιρίες που παρέχουν μερικές από τις λειτουργίες εικονικού δικτύου στο SCNO.
6. SO (Spectrum Owner) - Κάτοχος Φάσματος: Στην περίπτωση του αδειοδοτούμενου φάσματος, πρόκειται για ένα στάδιο που μισθώνει το φάσμα από έναν πάροχο.
7. MC-PS (Mission Critical-Public Safety) – Κρίσιμες Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας: Δημόσιοι ή ιδιωτικοί οργανισμοί επιφορτισμένοι με την εκτέλεση, όπου απαιτείται, δράσεων κρίσιμων αποστολών για τη δημόσια ασφάλεια (βίντεο επιτήρηση, παρακολούθηση, αυτόνομο τοπικό δίκτυο).

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση είναι ενδεικτική, καθώς ορισμένοι «παίκτες» μπορούν ενίοτε να είναι σε θέση ώστε να εκτελούν περισσότερες από μία από τις περιγραφόμενες δράσεις.

Μεταξύ άλλων, το πρόγραμμα 5G-ESSENCE έχει θέσει ως βασικό στόχο την επίδειξη μίας συνδυασμένης βιντεοπαραγωγής και βιντεοδιανομής με βάση το πλαίσιο του 5G, προς αποκόμιση οφελών για τους παραγωγούς μέσω ενημέρωσης και για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας οι οποίοι θα είναι σε θέση να προσφέρουν εμπλουτισμένες εμπειρίες συμβάντων (αθλητικών, πολιτιστικών, κ.α.) στους συνδρομητές τους. Η παραγωγή/διανομή του τοπικά παραγόμενου περιεχομένου μέσω της πλατφόρμας 5G-ESSENCE, συνδεδεμένη με υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας και πλούσιο περιβάλλον χρήστη είναι σε θέση ώστε να προσφέρει ασφάλεια, υψηλή ποιότητα και ελαστική μετάδοση σε πραγματικό χρόνο εξασφαλίζοντας έτσι την ελάχιστη λανθάνουσα καθυστέρηση ([172], [174]). Στο πλαίσιο της υποδομής κοινής χρήσης υποστήριξης του προγράμματος 5G-ESSENCE, κάθε δυνητικά εμπλεκόμενος πάροχος

δικτύου είναι σε θέση ώστε να βελτιστοποιεί τη χρήση του δικτύου του, έχοντας ως αποτέλεσμα χαμηλότερο OPEX. Επιπρόσθετα, οι πάροχοι δικτύων έχουν την δυνατότητα να αναπτύξουν γρήγορα νέες υπηρεσίες, να «μεταφέρουν» απευθείας στους χρήστες υψηλότερη ποιότητα εμπειριών (QoE) και να παρέχουν «περιεχόμενο ως υπηρεσία», αυξημένη ευρυζωνικότητα και λύσεις για χώρους αποθήκευσης σε παρόχους περιεχομένου και σε ιδιοκτήτες σταδίων [172]. Οι πάροχοι περιεχομένου επίσης μπορούν να αποκομίσουν οφέλη από τη μειωμένη λανθάνουσα καθυστέρηση και τη βελτιωμένη εμπειρία των χρηστών, τοποθετώντας το περιεχόμενο στα άκρα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και επιπλέον μπορούν να παρέχουν επαυξημένες υπηρεσίες αξιοποιώντας τις δικτυακές πληροφορίες. Τελικά ο φορέας-ιδιοκτήτης του σταδίου μπορεί να αποκομίσει επιπρόσθετα οφέλη αξιοποιώντας την προτεινόμενη υποδομή του έργου και τις συναφείς λειτουργίες της, π.χ. αξιοποιώντας ζωντανό περιεχόμενο στους θεατές από πολλές κάμερες και παρεμφερείς δυνατότητες από άλλα μέσα.

Στο πλαίσιο του έργου, το σενάριο που αφορά στην επιτάχυνση των εφαρμογών στα άκρα του δικτύου, παρέχει τη λογική για την διανομή ζωντανών ροών βίντεο που έχουν ληφθεί από το τοπικό δωμάτιο παραγωγής προς τους τοπικούς θεατές, με εξαιρετικά αποτελεσματικό τρόπο. Χρησιμοποιούνται τριών ειδών εγκαταστάσεις στο πλαίσιο του Δήμου Αιγάλεω (εταίρου του έργου 5G ESSENCE) που έχει προσφέρει σχετικές υποδομές, ήτοι: Μία μικρού επιπέδου εγκατάσταση όπως είναι η ανοιχτού τύπου δημοτική πισίνα με χωρητικότητα 500 θεατών, μία μεσαίου επιπέδου εγκατάσταση όπως ένα εσωτερικό δημοτικό στάδιο με χωρητικότητα 2.000 θεατών (που εξυπηρετεί τις ανάγκες παιχνιδιών καλαθοσφαίρισης, πετοσφαίρισης και χειροσφαίρισης) και μία υψηλού επιπέδου εγκατάσταση όπως είναι το ανοικτό δημοτικό στάδιο ποδοσφαίρου «Σταύρος Μαυροθαλασσίτης», χωρητικότητας 8.000 θεατών περίπου ([175] - [177]).

Η εγκατάσταση καλύπτεται από μία σειρά Cloud Enabled Small Cells - CESC (Μικρές Κυψέλες με Δυνατότητες Ενεργοποίησης Υπολογιστικού Νέφους) και μαζί με τον CESC Manager (CESC Manager) και το βασικό DC (Data Centre), μπορούν να συνδέονται στα βασικά δίκτυα των τηλεπικοινωνιακών παρόχων (βλέπε **Εικόνα 28**) ([178], [179]). Το βιντεοπεριεχόμενο από τις κάμερες αποστέλλεται για επεξεργασία στα άκρα του DC. Στη συνέχεια τα βίντεο συνεχούς ροής μεταδίδονται τοπικά χρησιμοποιώντας τα CESC. Οι θεατές θα μπορούν δυναμικά να επιλέγουν ανάμεσα σε διαφορετικές προσφερόμενες ροές ευρυεκπομπής ([176], [177]).

Στο σενάριο αυτό και σε παρόμοια σενάρια μεγάλων γεγονότων, η μεγάλη κυκλοφορία δεδομένων δεν θα επηρεάσει ούτε θα υπερφορτώσει τη σύνδεση της οπισθοζεύξης, καθώς θα παράγεται, θα επεξεργάζεται και θα καταναλώνεται μόνο τοπικά [35].

3.5. Δημόσια και Πολιτική Προστασία

3.5.1. Περίπτωση Χρήσης: 5G E2E τεμαχισμός για εφαρμογές κρίσιμων αποστολών

Οι τελευταίες εκδόσεις του 3GPP προδιαγράφουν τις απαιτήσεις που τίθενται από τον τομέα της δημόσιας ασφάλειας (PS) για την επόμενη γενιά των ευρυζωνικών δικτύων [36]. Σε κάθε περίπτωση, αναμένεται ότι επιπρόσθετες βελτιώσεις στα πρότυπα 3GPP θα πρέπει να λάβουν χώρα ούτως ώστε να υπάρχει συνέργεια με τις απαιτήσεις για τη λειτουργία των κρίσιμων υποδομών [37]. Αναφορικά με τα μοντέλα παράδοσης υπηρεσιών PS, διαφαίνεται μια τάση προς διαφορετικούς τύπους μοντέλων για το μερισμό των δικτύων, σε αντίθεση με την ανάπτυξη «αποκλειστικών» PS δικτύων. Για παράδειγμα, το δίκτυο επειγόντων περιστατικών στο Ηνωμένο Βασίλειο χρησιμοποιεί την υποδομή RAN (Radio Access Network) ενός εμπορικού παρόχου [169]. Η υπηρεσία Blue Light Mobile από τον πάροχο PS Astrid στο Βέλγιο παρέχει πρόσβαση μέσω συμφωνιών περιαγωγής με εμπορικούς παρόχους. Η FirstNet στις ΗΠΑ, ενώ διαθέτει φάσμα κατ'αποκλειστικότητα στον τομέα εφαρμογών PS, αναμένεται να το αξιοποιήσει – μέσω δευτερεύουσας χρήσης – για εμπορικές εφαρμογές. Σε αυτό το πλαίσιο αναφοράς, η πολλαπλή μίσθωση (multitenancy) αναδεικνύεται ως μείζων πρόσκληση σε διεθνές επίπεδο.

Το ερευνητικό πρόγραμμα 5G-ESSENCE [169], με στόχο την αποδοτική ενορχήστρωση των ραδιοπόρων, των δικτυακών πόρων και των πόρων υπολογιστικού νέφους, αναμένεται να συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην εκπλήρωση των απαιτήσεων του τομέα PS, παρέχοντας νέα εργαλεία για το μερισμό τόσο των ραδιοπόρων όσο και των νεφοϋπολογιστικών πόρων στα άκρα του δικτύου, σε εντοπισμένες/προσωρινές δικτυακές αναπτύξεις μεταξύ των χρηστών εφαρμογών PS και των εμπορικών χρηστών. Η πρόκληση συνίσταται στην καταχώριση των συναφών πότρων των παραπάνω κατηγοριών σε «κρίσιμους παίκτες» (τους αποκαλούμενους ως “First Responders - FRs” – «Πρώτοι Ανταποκρινόμενοι»⁶⁴) οι οποίοι εκ φύσεως απαιτούν υπηρεσίες υψηλού επιπέδου και κατά προτεραιότητα. Πράγματι, οι πάροχοι υπηρεσιών δημόσιας ασφάλειας «μετατοπίζουν» το επιχειρηματικό τους μοντέλο από ένα ολοκληρωτικά ιδιόκτητο μοντέλο υποδομής σε ένα που υλοποιεί τον ρόλο ενός MVNO (Mobile Virtual Network Operator – Παρόχου Εικονικού Δικτύου Κινητής Τηλεφωνίας) μεταξύ πολλαπλών ιδιοκτητών και/ή διαχειριστών δικτύων κινητής τηλεφωνίας και των τελικών χρηστών υπηρεσιών-εφαρμογών PS [179].

Υπό μία ευρύτερη προοπτική, μία τέτοια ανάπτυξη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δικτυακό «τεμάχιο»/«τμήμα»/«φέτα» (“slice”) μίας εφαρμογής κρίσιμης αποστολής που εκτείνεται μεταξύ τομέων πολλαπλών παρόχων. Σε μία τέτοιου είδους διάρθρωση, ο σχετικός πάροχος υπηρεσιών δημόσιας ασφάλειας «αγοράζει» συνδεσιμότητα από πολλαπλούς παρόχους κινητής τηλεφωνίας και εγγυάται στους πελάτες του συνδεσιμότητα (connectivity), επανατακτικότητα (resilience) ελαστικότητα και την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών για τις λειτουργίες που αφορούν σε δημόσια ασφάλεια.

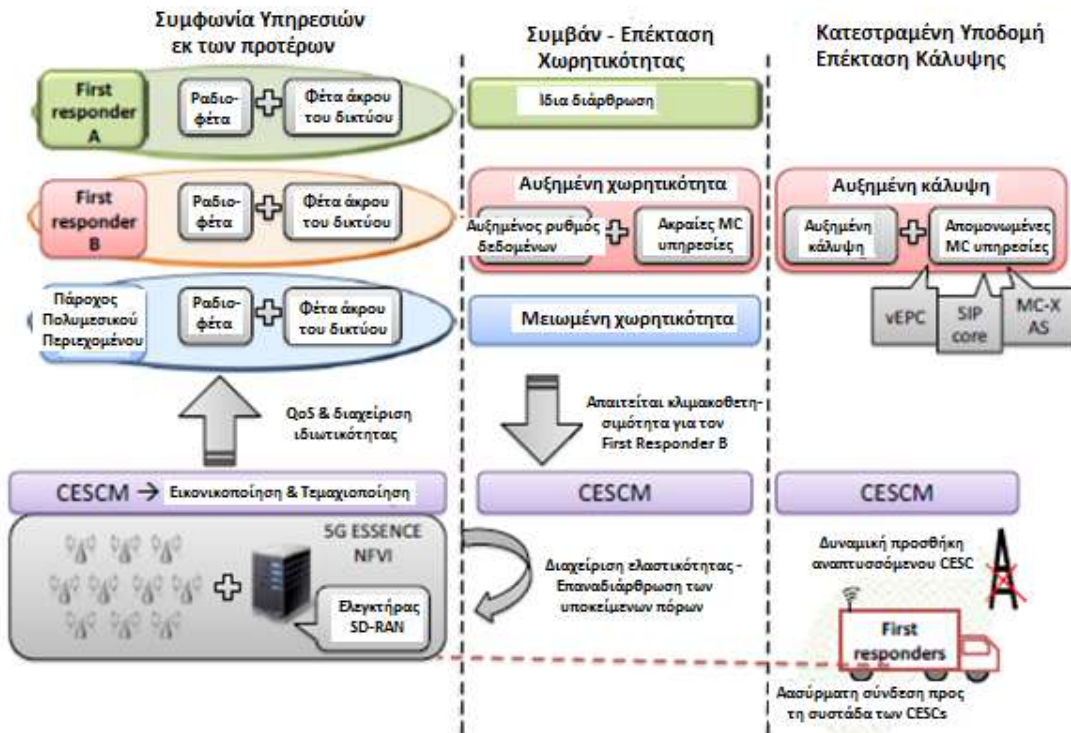
Μία τέτοια προσέγγιση επιφέρει πολλαπλά οφέλη προς τους παρόχους PS τα οποία καταλέγονται ως εξής: Καταρχήν μειώνεται το κόστος της αγοράς, της εγκατάστασης και της

⁶⁴ Ο «πρώτος ανταποκρινόμενος» είναι ένα άτομο με εξειδικευμένη εκπαίδευση που είναι από τα πρώτα που φτάνει και παρέχει βοήθεια στον τόπο έκτακτης ανάγκης, όπως ένα σε ατύχημα, σε φυσική καταστροφή ή σε τρομοκρατική δράση. Ο όρος αναφέρεται στην αστυνομία, στην πυροσβεστική, σε ασθενοφόρα/τραυματιοφορείς, κ.α. (Εναλλακτικά, στην ελληνική μπορεί να τεθεί και ο όρος «μονάδα άμεσης επέμβασης»). Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/First_responder

συντήρησης αποκλειστικών υποδομών. Σημειώτεον ότι οι φυσικές αυτές υποδομές δεν υπόκεινται σε εκμετάλλευση σε σχέση με τη βέλτιστη χωρητικότητά τους. Κατά δεύτερο λόγο, η ευελιξία που παρέχεται από τέτοιου είδους λύσεις επιτρέπει σε συνεργαζόμενους MVNOs, τουλάχιστον θεωρητικά, να προσαρμόζουν τις προσφορές τους στους πελάτες τους.

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή τίθεται σε εξάρτηση από το αντίτιμο των προσυμφωνημένων συμβολαίων ανάμεσα σε MVNOs και σε διάφορους παρόχους, με σκοπό την εξασφάλιση υψηλής διαθεσιμότητας και μίας εγγυημένης διεκπεραιωτικότητας/απόδοσης για τους χρήστες υπηρεσιών PS. Για μία τέτοιου είδους προσέγγιση και με στόχο την επάρκεια και την ενεργοποίηση του (φετο-)τεμαχισμού (slicing) του δικτύου E2E, προτείνεται σχετική λύση από το πλαίσιο του έργου 5G-ESSENCE ([169], [179], [180], [181]).

Η εν λόγω περίπτωση χρήσης σχηματικά φαίνεται παρακάτω στην **Εικόνα 29**.



Εικόνα 29: Εφαρμογές Κρίσιμων Αποστολών για Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας [169].

Οι εμπλεκόμενοι φορείς-«παίκτες» στο σενάριο των εφαρμογών κρίσιμων αποστολών για υπηρεσίες δημόσιας ασφάλειας, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 29**, παρατίθενται ως κάτωθι ([169], [179], [181]):

1. **Ένας πάροχος κινητής τηλεφωνίας** (ο ιδιοκτήτης της πλατφόρμας) που προσφέρει την υποδομή του τόσο σε «κλασικούς» τελικούς χρήστες όσο και σε εικονικούς παρόχους υπηρεσιών δημόσιας ασφάλειας. Σημειώτεον, ότι οι εικονικοί πάροχοι μπορούν να βασίζονται σε πολλαπλούς παρόχους υποδομών για να προσφέρονται επιπρόσθετες εγγυήσεις.
2. **Ένας πάροχος υπηρεσιών δημόσιας ασφάλειας** ο οποίος προσφέρει υπηρεσίες συνδεσιμότητας με «αυστηρές» εγγυήσεις σχετικά με την ποιότητα των υπηρεσιών για τους Πρώτους Ανταποκρινόμενους. Σημειώτεον ότι στην τρέχουσα κατάσταση μπορούν να υφίστανται πολλαπλοί εικονικοί πάροχοι με τον καθένα εξ αυτών να προσφέρει μία ξεχωριστή «φέτα»/τεμάχιο για κάθε διαφορετικό πρώτο ανταποκρινόμενο.

3. **First Responder 1 (Πρώτος Ανταποκρινόμενος 1):** Οι πυροσβέστες είναι τελικοί χρήστες οι οποίοι εκμεταλλεύονται τη συνδεσιμότητα που προσφέρεται από τους παρόχους υπηρεσιών PS μέσω μιας αποκλειστικής, για το σκοπό αυτό, δικτυακής φέτας. Για χάρη του σκοπούς του έργου 5G ESSENCE, οι πυροσβέστες χρησιμοποιούν εφαρμογή Κρίσιμης Αποστολής με Διακόπτη Ομιλίας (Mission Critical Push-To-Talk - MCPTT) για τις επικοινωνίες τους.
4. **First Responder 2 (Πρώτος Ανταποκρινόμενος 2):** Το παραϊατρικό προσωπικό είναι ένας άλλος τύπος τελικών χρηστών που βασίζεται στον ίδιο πάροχο υπηρεσιών PS ή σε διαφορετική δικτυακή «φέτα» που παρέχεται από άλλον πάροχο, με σκοπό την ανταλλαγή μηνυμάτων (κειμένου) καθώς και προ-καταγεγραμμένων εικόνων για την κατάλληλη αξιολόγηση καταστάσεων MC.
5. **Παραδοσιακοί τελικοί χρήστες:** Αυτοί αποτελούν τους «κλασικούς» χρήστες που έχουν γίνει συνδρομητές σε παροχές επικοινωνίας και διαδικτυακών πληροφοριών, ενός συνήθους παρόχου. Δεν αποτελούν μέρος κάποιας «οντότητας» τύπου “First Responder” αλλά εκμεταλλεύονται μόνο το δίκτυο που παρέχει ο πάροχος κινητής τηλεφωνίας χωρίς κανέναν διαμεσολαβητή.

Η προτεινόμενη πλατφόρμα από το πρόγραμμα 5G ESSENCE θεωρεί τη συμμετοχή ενός ή περισσότερων παρόχων επικοινωνίας υπηρεσιών PS που θα χρησιμοποιούν τους πόρους του έργου για την παράδοση υπηρεσιών επικοινωνίας σε οργανισμούς PS σε μία χώρα ή σε μία περιοχή. Η πλατφόρμα που προτείνεται από το έργο μπορεί να ανήκει σε ένα πάροχο κινητού δικτύου (MNO) ή σε έναν VMNO. Ο κάτοχος της υποδομής θα προσφέρει τις απαραίτητες δικτυακές ικανότητες και τις ικανότητες (φετο-)τεμαχισμού στο πλαίσιο αποκλειστικών, για το σκοπό αυτό, Συμφωνιών Στάθμης Υπηρεσίας⁶⁵ (Service Level Agreements - SLAs) σε διαφορετικούς συνεργαζόμενου – ή μισθωτές – παρέχοντας προτεραιότητα σε παρόχους επικοινωνιών PS. Αυτή η περίπτωση χρήσης κρίσιμης αποστολής (MC-Mission Critical) θα είναι οργανωμένη σε τρία στάδια ([180], [181]):

Στάδιο 1: Κάτω από κανονικές συνθήκες, ο ιδιοκτήτης της πλατφόρμας 5G-ESSENCE παρέχει σε διαφορετικούς μισθωτές τις ζητούμενες δικτυακές φέτες. Κάθε δικτυακή φέτα απαρτίζεται από ένα κατανομημένο ρυθμό δεδομένων πάνω από περιοχή κάλυψης (που απεικονίζεται σε έναν κεντροποιημένο, Ελεγχόμενο από το Λογισμικό, Ελεγκτή RAN (centralized Software Defined-RAN - cSD-RAN)) σε ένα τμήμα των ραδιοπόρων CESC) και από κατανομημένους πόρους νέφους (απεικονιζόμενων σε δυνατότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης στα άκρα ενός DC). Για την εξυπηρέτηση των οργανισμών δημόσιας ασφάλειας, οι κανονικές λειτουργίες απαιτούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά σε χωρητικότητα πρόσβασης και σε χαρακτηριστικά επικοινωνίας (π.χ. ομαδικές δυνατότητες επικοινωνίας) υποστηριζόμενα στην περιοχή μιας συστάδας από CESC. Η απαίτηση αυτή θα «απεικονίζεται» σε έναν αριθμό Βασικών Δεικτών Απόδοσης (KPIs⁶⁶) ραδιοεπικοινωνίας εντός των CESC και στην ανάπτυξη υπηρεσιών ομαδικής επικοινωνίας στα άκρα του δικτύου για πολυμέσα και για Εξυπηρετητές Εφαρμογών (Application Servers - ASs) υπηρεσιών MC για φωνή με ενισχυμένη αποκριτικότητα (responsiveness).

Στάδιο 2: Σε περίπτωση επείγουσας κατάστασης σε μία περιοχή, ο CESC θα είναι ικανός ώστε να αντιδράσει στις νέες απαιτήσεις των υπηρεσιών. Ο πάροχος επικοινωνιών PS πιθανόν να απαιτήσει επιπρόσθετη υπηρεσία με στόχο να «ανταπεξέλθει» στον αυξανόμενο αριθμό των

⁶⁵ Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το πλαίσιο SLA, βλέπε χαρακτηριστικά, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Service-level_agreement

⁶⁶ KPIs (Key Performance Indicators): Πρόκειται για δείκτες που χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν παράγοντες που είναι σημαντικοί στην επιτυχία ενός υπό εξέταση συστήματος. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Performance_indicator

Πρώτων Ανταποκρινόμενων ή επιπρόσθετους τύπους υπηρεσιών, όπως είναι η εκπομπή βίντεο κρίσιμων αποστολών. Βασιζόμενη σε προκαθορισμένες ή σε κατ'απαίτηση πολιτικές κλιμάκωσης υπηρεσιών, ο CESCΜ θα υλοποιήσει νέες ελαστικές διατάξεις καταχώρισης πόρων, δίνοντας προτεραιότητα πρόσβασης στους Πρώτους Ανταποκρινόμενους και λαμβάνοντας υπόψη αμφοτέρους τους ραδιοπόρους (για τις συνδέσεις πρόσβασης) και τους πόρους του νέφους (για την ανάπτυξη περισσότερων υπηρεσιών των άκρων οι οποίες καταναλίσκουν περισσότερους πόρους).

Η ανάπτυξη των περιπτώσεων υπηρεσιών στα άκρα υπηρετεί τον εξής διπλό στόχο: πρώτα στις υπηρεσίες κρίσιμων αποστολών το καθιστά ικανό για καθυστερήσεις κοντά στο μηδέν και δεύτερον επιτρέπει τη διατήρηση της λειτουργικότητας ακόμα κι όταν η επικοινωνία οπισθοζεύξης έχει καταστραφεί.

Στάδιο 3: Στην περίπτωση που η ICT υποδομή έχει καταστραφεί κατά τη διάρκεια μίας φυσικής καταστροφής ή μίας τρομοκρατικής επίθεσης, η πρώτη κίνηση που πρέπει να γίνει σχετίζεται με την αντιμετώπιση της ανάγκης για επέκταση της ραδιοκάλυψης. Στο στάδιο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ένα αναπτυσσόμενο σύστημα για να μετριάξει την καταστροφή στους μακροσταθμούς βάσης. Στην προτεινόμενη περίπτωση χρήσης, το αναπτυσσόμενο σύστημα θα παρέχει 5G συνδεσιμότητα στους Πρώτους Ανταποκρινόμενους οι οποίοι βρίσκονται στο πεδίο, ενοποιώντας τις απαιτήσεις της διαλειτουργικότητας. Με σκοπό την «καλύτερη ενορχήστρωση» στις ραδιοεκπομπές, το αναπτυσσόμενο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα νέο CESC που μπορεί δυναμικά να ενσωματωθεί στη συστάδα μικρών κυψελών. Με αυτόν τον τρόπο, τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά του Δικτύου Υποκειμένου σε Αυτο-οργάνωση (Self-Organizing Network - SON) και της Διαχείρισης Ραδιοπόρων (Radio Resources Management - RRM) μπορούν να τύχουν εφαρμογής στη μονάδα επέκτασης κάλυψης. Η ενδοσύνδεση της αναπτυσσόμενης συσκευής με τη συστάδα των CESCs θα πραγματοποιηθεί μέσω ασύρματης τεχνολογίας οπισθόζευξης [35].

3.5.2. Περίπτωση Χρήσης: Χρήση 5G από Ομάδες Άμεσης Επέμβασης (Πρώτοι Ανταποκρινόμενοι)

Οι μονάδες άμεσης επέμβασης όπως οι Πυροσβεστική, η Αστυνομία και το Υγειονομικό Προσωπικό χρειάζονται επικοινωνίες που παρέχει ταχύτητα, αξιοπιστία και ασφάλεια στις διάφορες κρίσιμες περιπτώσεις που αντιμετωπίζουν και οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην απώλεια ανθρώπινων ζωών εάν δεν τύχουν κατάλληλης αντιμετώπισης.

Η επικοινωνία δημόσιας ασφάλειας παραδοσιακά χρησιμοποιεί εξειδικευμένα συστήματα κινητής υπηρεσίας ξηράς (land mobile radio - LMR) για διακόπτη ομιλίας (push to talk - PTT) ως το πρωτεύον σύστημα κινητής επικοινωνίας ([182], [183]). Οι εφαρμογές Επίγειων Συγκαναλικών Επικοινωνιών⁶⁷ (Terrestrial Trunked Radio - TETRA) και Project 25⁶⁸ (P25) είναι ευρέως διαδεδομένες αναφορικά με τη χρήση συστημάτων PPT [184]. Τέτοια στενοζωνικά συστήματα επικοινωνίας μπορούν μόνο να παρέχουν φωνο-κεντρικές υπηρεσίες (voice-centric services) με εν γένει περιορισμένες δυνατότητες δεδομένων. Υπήρξε εγγενής δυσκολία στην επικοινωνία συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών και ως προς το συντονισμό τους. Ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων αυτών είχε σαν αποτέλεσμα την αντικατάστασή τους από 3GPP LTE/NR συσκευές για να υποστηριχθούν πρόσθετες κρίσιμες υπηρεσίες όπως βίντεο πραγματικού χρόνου και επαυξημένη πραγματικότητα [185]. Με την έλευση του 5G οι προκλήσεις είναι πολύ περισσότερες [186].

⁶⁷ Το TETRA είναι ένα πρότυπο του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI), το οποίο θεσπίστηκε το 1995. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, *μεταξύ άλλων*:

⁶⁸ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Project_25

Ο Ρόλος του 5G στη Δημόσια Ασφάλεια με Συνδεσιμότητα Πανταχού Παρούσα

Τυπικά, οι πάροχοι βασίζονται σε καλά μελετημένα και βελτιστοποιημένα σχέδια για την ανάπτυξη του δικτύου τους, με βάση την πληθυσμιακή πυκνότητα για μία περιοχή.

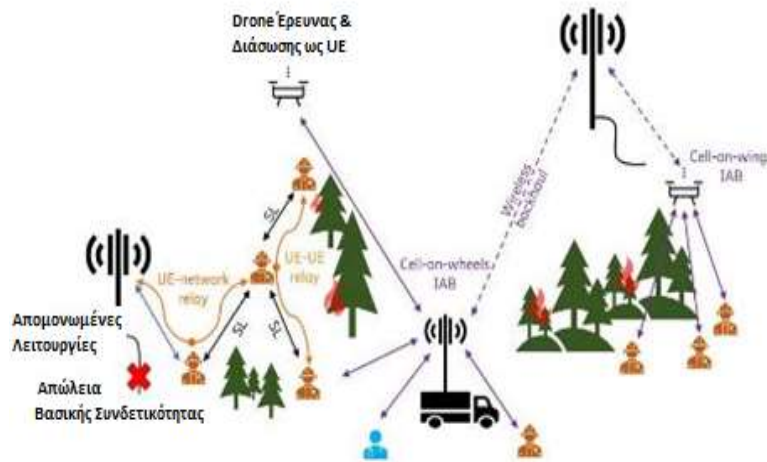
Σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης ή καταστροφών, η κυψελοειδής δικτυακή κάλυψη και η δικτυακή χωρητικότητα μίας περιοχής μπορεί να μην επαρκούν και απαιτούνται πρόσθετα μέσα για την υποστήριξη αξιόπιστων κρίσιμων επικοινωνιών.

Για τη διάθεση εγγυήσεων κάλυψης και χωρητικότητας για τις ανάγκες των πρώτων ανταποκρινόμενων, έχουν προταθεί διάφορες λύσεις για υπηρεσίες MC στο πλαίσιο του 5G NR Release 16⁶⁹ [187]. Τέτοιες λύσεις συνεχίζουν να εξελίσσονται με ενσωμάτωση βελτιώσεων και επιρπρόσθετων χαρακτηριστικών όπως π.χ. στο πλαίσιο της 5G NR Rel-17⁷⁰ και πέραν αυτής [188]. Ορισμένες πιθανές λύσεις για την επέκταση του δικτύου φαίνονται στην παρακάτω **Εικόνα 30** [190].

Σε περιοχές με περιορισμένη κάλυψη οι πάροχοι δικτύων PS μπορούν να αναπτύξουν προηγμένα συστήματα κεραιών με τεχνικές δημιουργίας δέσμης υποστηριζόμενες από το NR για αύξηση της έντασης του σήματος (signal strength) προς συγκεκριμένη κατεύθυνσης, με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση αναγκών των επικοινωνιών MC στην εν λόγω περιοχή.

Η ενοποιημένη πρόσβαση και οπισθοζευκτικό (integrated access and backhaul - IAB⁷¹), ένα χαρακτηριστικό αναμετάδοσης ασύρματου οπισθοζευκτικού πολλαπλών αλμάτων (multi-hop wireless backhaul relaying feature) που προτείνεται στην NR Rel-16 [187], αποτελεί μία ικανοποιητική λύση για ευέλικτη επέκταση δικτυακής κάλυψης για σκοπούς PS.

Στο μέλλον, με σκοπό την καλύψη απομονωμένων περιοχών, οι αρμόδιοι πάροχοι δικτύων PS θα είναι σε θέση ώστε να ενεργοποιούν προσωρινά δίκτυα με φορητούς κόμβους στήριξης IAB επί τροχήλατων οχημάτων οι οποίοι αναφέρονται ως «IAB κυψέλες πάνω σε τροχούς» (IAB cells-on-wheels) ή επί μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων οι οποίοι αναφέρονται ως «IAB κυψέλες πάνω σε φτερά» (IAB cells-on-wings).



Εικόνα 30: Λύσεις Δικτυακής Κάλυψης IAB για Δημόσια Ασφάλεια [191].

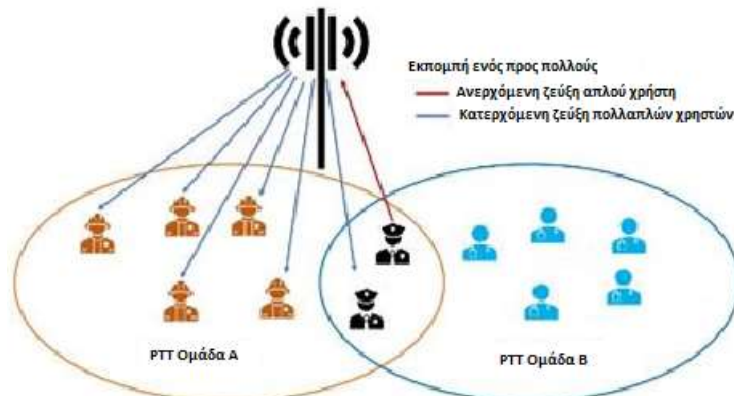
⁶⁹ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε: <https://www.3gpp.org/release-16>

⁷⁰ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.3gpp.org/release-17>

⁷¹ IAB: Οι προδιαγραφές του ορίζουν δύο τύπους συστημάτων κεραιών. Έναν IAB κόμβο και έναν IAB χορηγό. Οι IAB χορηγοί τερματίζουν την κίνηση της οπισθοζεύξεως από τους καταναμηθμένους IAB κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί μπορεί να είναι τερματικά σημεία οπισθοζεύξεως ή αναμεταδότες ανάμεσα στα τερματικά αυτά σημεία και τον χορηγό.

Οι ομάδες άμεσης επέμβασης στηρίζονται στην επικοινωνία για τον συντονισμό της δράσης τους. Υπηρεσίες όπως MCPTT, MCVideo ([189], [190]), μηνυματοδοσία ομάδας (group messaging) και ευρυεκπομπή επειγόντων μηνυμάτων είναι απαραίτητες και έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την εκπομπή ενός κοινού συνόλου δεδομένων προς όλους τους χρήστες της ομάδας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 31** [191].

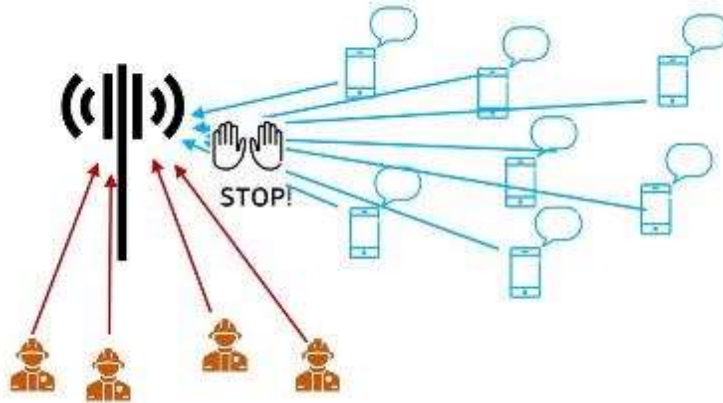
Για το σκοπό αυτό, χρειάζεται η εκπομπή αυτών των δεδομένων προς μία ομάδα δια της χρήσης ενός ελαχίστου συνόλου πόρων για τη μείωση, όσο το δυνατό, του χρόνου και του χρησιμοποιούμενου φάσματος. Τουναντίον, οι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξυπηρετήσουν περισσότερες ομάδες πρώτων ανταποκρινόμενων καθώς και άλλους χρήστες.



Εικόνα 31: Επικοινωνίες Ομάδων για Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας [191].

Διασφάλιση ποιότητας και συνδεσιμότητας επικοινωνίας

Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης σε μία μικρή περιοχή, υπάρχει αυξημένη ζήτηση κίνησης MC για την υποστήριξη των ομάδων άμεσης επέμβασης στην περιοχή του γεγονότος. Παράλληλα, η κίνηση των δεδομένων που δημιουργούνται από τους γενικούς δημόσιους χρήστες μπορεί επίσης να υποστεί ραγδαία αύξηση, π.χ. λόγω των υλοποιούμενων κλήσεων έκτακτης ανάγκης και εξαιτίας του μερισμού πληροφοριών με φίλους ή/και συγγενείς στην προσπάθεια επικοινωνίας αυτών των χρηστών. Εάν οι πρώτοι ανταποκρινόμενοι και οι γενικοί δημόσιοι χρήστες μερίζονται το ίδιο δίκτυο, τότε πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα διάθεσης προτεραιότητας για τις ομάδες άμεσης επέμβασης έναντι των τακτικών χρηστών, προκειμένου να διασφαλίζεται ταχεία σύνδεση στο δίκτυο και για να παρέχεται ασφάλεια της κίνησης MC σε ενδεχόμενες περιπτώσεις δικτυακής συμφόρησης ([191], [192]). Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται με χρήση διαφορετικών χαρακτηριστικών και λειτουργικοτήτων του NR για την απαγόρευση της πρόσβασης των γενικών χρηστών στο δίκτυο (όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32**), από κοινού με διαφορετικές λύσεις για διαχείριση της κίνησης για όσους χρήστες είναι ήδη συνδεδεμένοι στο δίκτυο [191].



Εικόνα 32: Διαφορετικά Επίπεδα Πρόσβασης με βάση την Προτεραιότητα για Ομάδες Χρηστών [191].

Επιχειρησιακή Αποτελεσματικότητα και Γνώση της Τρέχουσας Κατάστασης

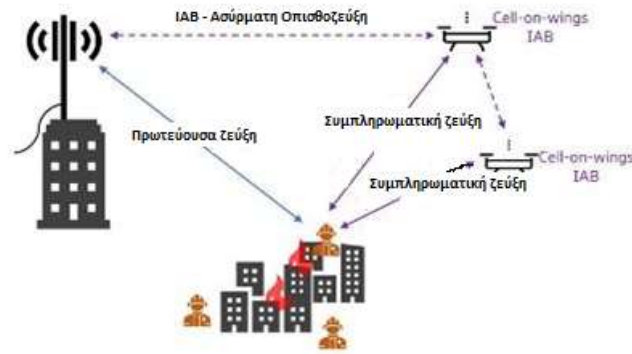
Η γνώση της τρέχουσας κατάστασης είναι μείζων ζήτημα για τις ομάδες άμεσης επέμβασης που καταφθάνουν στα σημεία διάσωσης [191]. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική για την αξιολόγηση και τον σχεδιασμό πλάνου δράσης, ποροκειμένου να υπάρχει άμεσο αποτέλεσμα. Σημαντικό στοιχείο είναι η δυνατότητα εντοπισμού των ομάδων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε μία λειτουργία διάσωσης. Οι προδιαγραφές NR περιλαμβάνουν στοιχεία για τον εντοπισμό θέσης μέσω συσκευών αλλά και με χρήση του δικτύου.

Οι πρώτοι ανταποκρινόμενοι μπορούν να μοιράζονται τις πληροφορίες για τις θέσεις τους, μετρήσεις σημάτων αλλά και πληροφορίες απο αισθητήρες που έχουν με το δίκτυο ή και με άλλα μέλη της ομάδας.

Επιπρόσθετα, το δίκτυο 5G μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίας απευθείας εντοπισμού θέσης μεταδίδοντας σήματα καταρχόμενης ζεύξης αναφοράς θέσης (positioning reference signals - PRSs) ή μετρώντας τα ηχητικά σήματα αναφοράς (sounding reference signals - SRSs) ανερχόμενης ζεύξης.

Μέσω ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών και τεχνικών στοιχείων του, το 5G NR μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις ικανότητες προσδιορισμού θέσης του δικτύου μέσω της χρήσης μεγάλου εύρους ζώνης το οποίο διατίθεται σε υψηλές συχνότητες σε συνδυασμό με κατευθυντική εκπομπή σημάτων που χρησιμοποιούν δέσμη (beamforming). Επιπρόσθετα, η χρήση IAB παρέχει τη δυνατότητα ευέλικτης ανάπτυξης επιπλέον προσωρινών σταθμών βάσης στην περιοχή του έκτακτου γεγονότος.

Μέσω της προσθήκης συμπληρωματικών ζεύξεων επικοινωνίας σε έναν πρώτο ανταποκρινόμενο, αυξάνεται η ακρίβεια των υπηρεσιών εντοπισμού θέσης που παρέχονται από το δίκτυο και βελτιώνεται η επιχειρησιακή δυνατότητα όπως φαίνεται στην **Εικόνα 33** [191].



Εικόνα 33: 5G NR Ακριβής Προσδιορισμός Θέσης Βασισμένος σε IAB [191].

Οι επικοινωνίες που υποστηρίζονται από χρήση drone(s), που έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς στο LTE όπως και στο πλαίσιο του 5G NR Rel-17 [188], μπορούν να τύχουν εφαρμογής για την επίλυση του προβλήματος προσδιορισμού θέσης και της γνώσης της υπό θεώρηση κατάστασης από τους πρώτους ανταποκρινόμενους [193].

Μία επίδειξη χρήσης drones για δημόσια ασφάλεια στον Καναδά⁷² κατέδειξε την αποτελεσματικότητά τους ως αποτέλεσμα της παρεχόμενης δυνατότητας επέκτασης της συνδετικότητας του κυψελοειδούς δικτύου πέραν της οπτικής επαφής (line of sight - LoS) [194]. Ένα drone μπορεί να μεταφέρει σημαντικές πληροφορίες αλλά και video πραγματικού χρόνου στα μέλη της ομάδας και στο κέντρο ελέγχου [67].

⁷² Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/2/drones-in-healthcare-canada>

3.6. Μεταφορές

3.6.1. Περίπτωση Χρήσης: 5G Επικοινωνίες εν Πτήξει και Σύστημα Ψυχαγωγίας

Πριν από μερικά χρόνια κατά τη διάρκεια της αεροπορικής πτήσης μόνο μία ψυχαγωγική ταινία μπορεί να ήταν διαθέσιμη για όλους τους επιβάτες. Αργότερα ήρθαν οι κατ'απαίτηση επιλογές θέασης στις θέσεις των επιβατών, όπου υπήρχε ή δυνατότητα επιλογής από έναν πίνακα διαθέσιμων εκπομπών, ταινιών και ειδικών προγραμμάτων.

Σήμερα, σε αρκετές αεροπορικές εταιρείες, οι επιβάτες μπορούν οι ίδιοι να φέρουν δικό τους εξοπλισμό για σκοπούς ψυχαγωγίας ή/και ενημέρωσης. Έτσι, η ασύρματη «εν πτήξει» ψυχαγωγία (In Flight Entertainment - IFE) και η κινητή ευρυζωνική συνδεσιμότητα έχουν καταστεί προσδοκία των αεροπορικών εταιριών και των επιβατών.

Η απαίτηση για ασύρματη εν πτήξει ψυχαγωγία (IFE) και συνδεσιμότητα μέσω προσωπικής συσκευής (Bring Your Own Device⁷³ - BYOD) μαζί με την εν πτήξει ευρυζωνική συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο, γεννά ένα σημαντικό σημείο ενδιαφέροντος σχετικά με την εν πτήξει υποδομή.

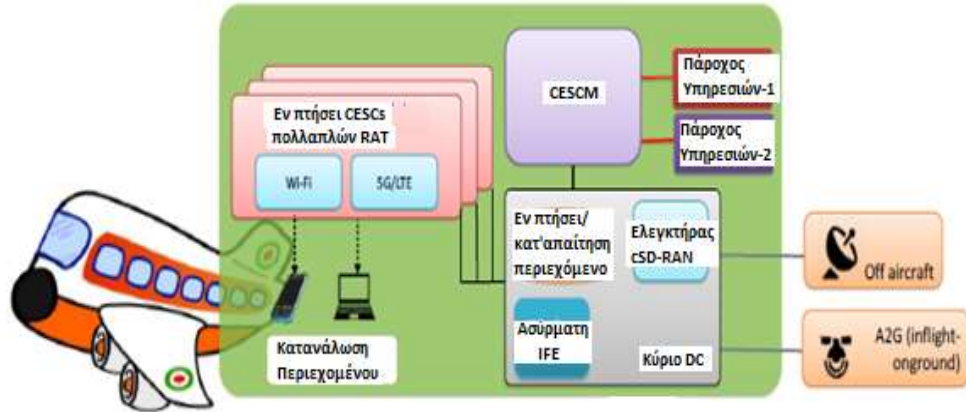
Πρόσφατα, τα ασύρματα συστήματα στο εσωτερικό της καμπίνας των αεροσκαφών βασίζονται κυρίως σε Wi-Fi τεχνολογίες για την ασύρματη εν πτήξει ψυχαγωγία και την ευρυζωνική κινητή συνδεσιμότητα (με την συνδεσιμότητα οπισθοζεύξης να παρέχεται μέσω δορυφορικών ζεύξεων). Τέτοιου είδους λύσεις θέτουν κάποιους περιορισμούς όπως είναι το απαγορευτικό κόστος σε παρόχους υπηρεσιών, αδυναμία υποστήριξης κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών, έλλειψη ευελιξίας για παρόχους αεροπορικών εταιριών κτλ.

Με στόχο την παροχή αποδοτικής κινητής ευρυζωνικής συνδεσιμότητας στο Διαδίκτυο, είναι επιτακτική η εν πτήξει ενσωμάτωση ενός ουδέτερου ξενιστή (neutral host) που θα επιτρέψει συνδεσιμότητα πολλαπλών παρόχων στους επιβάτες, λαμβάνοντας επίσης υπόψη διαφορετικές προσφορές υπηρεσιών.

Τέτοιες υπηρεσίες ουδέτερου ξενιστή είναι σημαντικές για τις ευρωπαϊκές αεροπορικές εταιρείες, αφού διατρέχουν αρκετά γεωγραφικά σύνορα που εξυπηρετούνται από μία μεγάλη ποικιλία παρόχων κινητής τηλεφωνίας. Αναφορικά με την οπισθοζεύξη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίγειες απευθείας από τον αέρα προς το έδαφος λύσεις καθώς και δορυφορικές λύσεις.

Η μοναδική αρχιτεκτονική που προτείνεται στο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα 5G ESSENSE [169], όπως σχηματικά περιγράφεται στην **Εικόνα 34** και η οποία συνδυάζει επαρκώς τα εικονικοποιημένα και πολλαπλής μίσθωσης δίκτυα μικρών κυψελών με την πολλαπλών επιπέδων υποδομή στα άκρα του υπολογιστικού νέφους, αποτελεί ένα ουσιώδες και καινοτόμο βήμα προς την εγκαθίδρυση ενός πρωτοποριακού ολοκληρωμένου συστήματος ψυχαγωγίας και συνδεσιμότητας (IFEC) εν πτήξει ([195], [196]), το οποίο από κοινού θα μεταφέρει την απαιτούμενη επικοινωνία και δικτυακή υποδομή για το ασύρματο IFEC, στις ενσωματωμένες IFE συσκευές και τις ασύρματες BYODs συσκευές των επιβατών [181].

⁷³ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Bring_your_own_device



Εικόνα 34: Ενσωματωμένη Εν Πτήση Συνδεσιμότητα και Συστήματα Ψυχαγωγίας [169].

Δύο διαφορετικά σενάρια προβλέπονται στην αντίστοιχη περίπτωση χρήσης IFEC ([181]):

Το **πρώτο σενάριο** περιλαμβάνει τη ροή και εγκωδικοποίηση δεδομένων σε προσωπικές συσκευές (PErsonal Devices - PEDs) και στις συσκευές των αεροπλάνων (π.χ. σε ενσωματωμένες οθόνες στα καθίσματα). Σκοπός είναι η εκμετάλλευση του Δικτύου Πυρήνα Πολλαπλών Παρόχων (Multi-Operator Core Network - MOCN) από το 5G ESSENSE και των LTE τεχνολογιών ώστε να αναδειχθεί η προοπτική της πολλαπλής μίσθωσης και ουσιαστικά της εμπλοκής πολλών παρόχων-«παικτών» (multitenancy). Με αυτόν τον τρόπο, ο πάροχος δικτύου μικρών κυψελών, όπως π.χ. η αεροπορική εταιρεία, μπορεί να παρέχει ιδιοταγείς (proprietary) υπηρεσίες IFEC στους επιβάτες που είναι και οι τελικοί χρήστες, καθώς ταυτόχρονα μπορεί να μισθώνεται η ίδια υποδομή σε διαφορετικούς VSCNOs, οι οποίοι θα την επαναχρησιμοποιήσουν για να δώσουν πρόσβαση στους ίδιους τελικούς χρήστες σε διαφορετικές υπηρεσίες (όπως π.χ. Netflix, Spotify κτλ.) παρεχόμενες από τους ίδιους ή από άλλους εξωτερικούς παρόχους υπηρεσιών (SPs). Για το λόγο αυτό, στο σχετικό σενάριο είναι σχεδιασμένη η προσθήκη LTE τεχνολογίας στην τρέχουσα επί του σκάφους Wi-Fi αρχιτεκτονική, προκειμένου να παρέχονται πολλαπλές υπηρεσίες από διαφορετικούς παρόχους την ίδια στιγμή και στην ίδια δικτυακή υποδομή ([181], [195]).

Το **δεύτερο σενάριο** συνίσταται στην παροχή επαρκούς ασύρματης πολυεκπομπής εν πτήση. Όλες οι ασύρματες επικοινωνίες επί του σκάφους λειτουργούν με τεχνολογίες Wi-Fi, οι οποίες «αντιμετωπίζουν» πολλούς περιορισμούς, συγκεκριμένα όταν πολλές συσκευές «μοιράζονται» το ίδιο μέσο και μεταφέρουν σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένα, σε πολλαπλές προσωπικές συσκευές και συσκευές αεροπλάνων (για π.χ. βίντεο σε υψηλή ανάλυση).

Έτσι το συγκεκριμένο σενάριο στοχεύει στην ενασχόληση και επίλυση του προβλήματος αυτού συνδυάζοντας τις εξελιγμένες Υπηρεσίες Πολυμεσικής Ευρυεκπομπής (Evolved Multimedia Broadcast Services - eMBMS) από το LTE με την κατά το έργο 5G ESSENSE αρχιτεκτονική, για εφαρμογές επί του σκάφους.

Με αυτό τον τρόπο, ο SCNO μπορεί να μισθώσει την υποδομή του σε VSCNOs και SPs, ώστε όλοι αυτοί να μπορούν ταυτόχρονα να μεταδώσουν ζωντανά τις ροές τους (για π.χ. αθλητικά γεγονότα, ντοκυμαντέρ ή τηλεοπτικές σαπουνόπερες). Έτσι οι επιβάτες με τον προσωπικό τους εξοπλισμό μπορούν να παρακολουθήσουν σε υψηλή ανάλυση, ζωντανό τηλεοπτικό περιεχόμενο ([181], [195]).

Οι εμπλεκόμενοι φορείς-«παίκτες» στο σενάριο των εφαρμογών IFEC, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 33**, ενδεικτικά παρατίθενται ως κάτωθι ([169], [181]):

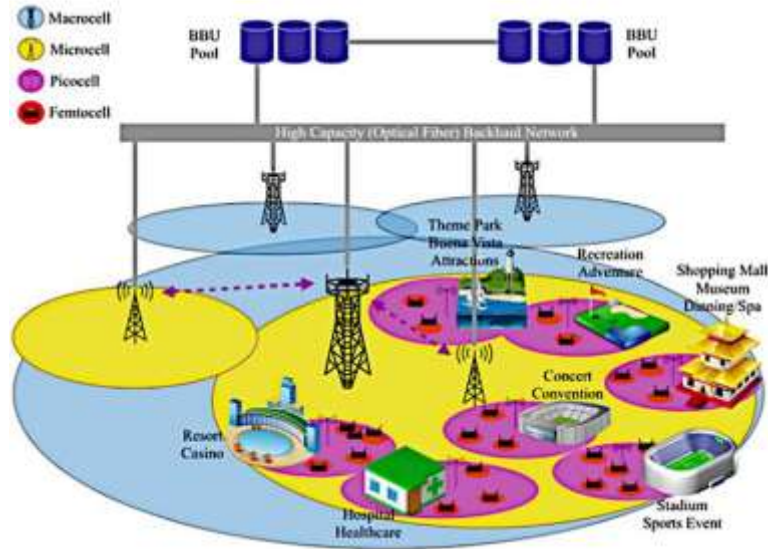
Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμελών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G

1. SCNO (Small Cell Network Operator): Ιδιοκτήτης της αναπτυσσόμενης υποδομής μέσα στο αεροσκάφος. Μπορεί να είναι η αεροπορική εταιρία ή ένας δικτυακός πάροχος που ενδιαφέρεται να παρέχει τις υπηρεσίες του στο αεροσκάφος.
2. VSCNO (Virtual Small Cell Network Operator): Χρήστες της διαθέσιμης υποδομής στο αεροσκάφος που παρέχουν υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες δηλαδή τους επιβάτες.
3. End Users: Χρήστες των δικτυακών υπηρεσιών που παρέχονται από το VSCNO και SCNO (δηλαδή οι επιβάτες μιας πτήσης).
4. MOs (Mobile Operators): Υπεύθυνοι των δικτυακών υπηρεσιών και επικοινωνίας στο αεροσκάφος.
5. SP-Service Provider: Εταιρείες που παρέχουν εικονικές δικτυακές διαδικασίες στο SCNO.
6. SO-Spectrum Owner: Στην περίπτωση του αδειοδοτούμενου φάσματος, το αεροσκάφος είναι αυτό που μισθώνει το φάσμα από έναν πάροχο ή ένα πάροχο κινητής τηλεφωνίας που παρέχει υπηρεσία στο αεροσκάφος (ο οποίος παρέχει το φάσμα δωρεάν ή επί πληρωμή).

Η περίπτωση χρήσης εφαρμογών IFEC στο πλαίσιο του έργου 5G ESSENSE, έχει δοκιμάσει και επιβεβαιώσει τη δικτυακή λύση ενεργοποιημένης πολλαπλής μίσθωσης για τη συνδεσιμότητα των επιβατών και την εμπειρία ασύρματης ευρυζωνικότητας. Οι εμπλεκόμενες CESCs που υποστηρίζουν πολλαπλές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης μπορούν να υλοποιηθούν ως ένα σύνολο ενοποιημένων σημείων πρόσβασης, αναπτυγμένων πάνω στο αεροσκάφος. Αργότερα, αφότου η εν πτήση ψυχαγωγία IFE λάβει υπόψη την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης περιεχομένου σε πολλαπλές οθόνες, το δίκτυο των CESCs θα μεταδίδει ζωντανά κατ' απαίτηση βιντεοπεριεχόμενο πολλαπλών οθονών (τόσο από τους εν πτήση εξυπηρετητές 5G DC στο άκρο του δικτύου όσο και μέσω δορυφόρων συνδέσεων ή συνδέσεων αέρα-εδάφους) στις ασύρματες συσκευές. Οι CESCs θα βασιστούν σε ευρυζωνικές ζεύξεις, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τη χρήση ζωνικού εύρους ([196], [197]).

3.7. Έξυπνη Πόλη

Η έξυπνη πόλη είναι μία πόλη που δίνει τη δυνατότητα για αξιοποίηση έξυπνων υποδομών καθώς και την ενσωμάτωση δεδομένων έξυπνων υποδομών με δεδομένα που συλλέγονται από άλλα αντικείμενα-πηγές, από άτομα και από φορείς, για την καλύτερη διακυβέρνηση και εξυπηρέτηση κοινοτήτων ([66], [168], [198]).



Εικόνα 35: Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G σε Έξυπνες Πόλεις.

Η έξυπνη πόλη είναι μία καινοτομία που αναπτύχθηκε ιδίως κατά την τελευταία δεκαετία [200], η οποία αξιοποιεί αισθητήρες, ενεργοποιητές και τεχνολογία νέφους, με κέντρα δεδομένων και κέντρα πληροφοριών να συνδέονται σε ευρυζωνικά δίκτυα επικοινωνιών (βλέπε π.χ. **Εικόνα 35**). Η ιδέα της έξυπνης πόλης δυναμικά θα παράξει νέες υπηρεσίες και ευεργετικά για την κοινωνία σενάρια, τα οποία θα αλλάξουν ριζικά τον τρόπο ζωής των ανθρώπων και θα βοηθήσουν στην άνοδο της οικονομίας ([201], [202], [203]).

Η τεχνολογία των δικτύων 5G αποτελεί την τεχνολογία «κλειδί» [204] που θα βοηθήσει στην επικοινωνία των αισθητήρων με το νέφος. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία 5G θέτει τρία βασικά σενάρια: (i) Βελτιστοποιημένη Κινητή Ευρυζωνική Πρόσβαση (enhanced Mobile Broadband - eMBB) για την επικοινωνία των πολυμέσων και την κινητή επικοινωνία. (ii) Εξαιρετικά Αξιοπίστευτες και Χαμηλής Καθυστέρησης Επικοινωνίες (Ultra-Reliable and Low Latency Communications - URLLC) για υπηρεσίες μεταφοράς. (iii) Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής (massive Machine Type Communications - mMTC) για εφαρμογές Διαδικτύου των Πραγμάτων οι οποίες χρησιμοποιούν πολλές συσκευές όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές. Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G θα καταστήσει τις πόλεις έξυπνότερες και θα τις συνδέσει σε μεγαλύτερο βαθμό με έξυπνα αντικείμενα, έξυπνα οχήματα και υποδομές (δρόμους, κτίρια κ.α.) ([205] - [208]).

Οι έξυπνες πόλεις είναι αστικές περιοχές στις οποίες υπάρχουν διάφοροι τομείς που συνεργάζονται προκειμένου να επιτύχουν βιώσιμα αποτελέσματα μέσω ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο κάνοντας κοινή χρήση συγκεκριμένων πληροφοριών και λειτουργικών τεχνολογικών συστημάτων ([209], [210]). Στόχος της υλοποίησης μίας έξυπνης πόλης είναι η βελτίωση της λειτουργικότητας/αποτελεσματικότητας των υπηρεσιών προς το κοινό/πολίτες, αξιοποιώντας την τεχνολογία και για την ταχεία και ακριβή λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η επίτευξη του στόχου αυτού δημιουργεί την ανάγκη για ένα σύστημα που θα

ενσωματώνει τα βασικά συστατικά και τα παράγωγα του, ειδικότερα: Έξυπνο σπίτι, έξυπνο όχημα, ευφυή σύστημα μεταφορών και άλλα.

Ιδιαίτερα για τα έξυπνα οχήματα, η ανάπτυξη του συστήματος οδηγεί σε ευφυή συστήματα αυτοκινήτων ή αυτόνομων οχημάτων τα οποία σχεδιάζονται να λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί ο ανθρώπινος νους.

Το κύριο μέρος ενός έξυπνου οχήματος αποτελεί το διαδίκτυο του οχήματος, το οποίο είναι ουσιαστικά μία εφαρμογή της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε ένα ευφυές σύστημα μεταφορών (Intelligent Transport System - ITS) ([214] - [215]), που οδηγεί στην ανάπτυξη εφαρμογών επικοινωνίας Οχήματος προς Οτιδήποτε (Vehicle to Everything - V2X) ([129] - [132], [219], [220]).

Τέτοιες εφαρμογές ([211] - [213]) μπορούν να περιλαμβάνουν επικοινωνίες τύπου Όχημα προς Όχημα (Vehicle to Vehicle - V2V), Όχημα προς Υποδομή (Vehicle to Infrastructure - V2I), Όχημα προς πεζό (Vehicle to Pedestrian - V2P), Όχημα προς το Δρόμο (Vehicle to Roadside - V2R) [217], Όχημα προς Συσκευή (Vehicle to Device - V2D), Όχημα προς Πλέγμα (Vehicle to Grid - V2G), Όχημα προς Αισθητήρες (Vehicle to Sensors - V2S) [218] και Όχημα προς Δίκτυο (Vehicle to Network - V2N) το οποίο απαιτεί ιδιαίτερα υψηλή αξιοπιστία [43].



Εικόνα 36: Περιπτώσεις Επικοινωνίας V2X.

Η παραπάνω **Εικόνα 36** απεικονίζει σχηματικά διάφορες ενδεχόμενες περιπτώσεις σε Τεχνολογία Ασύρματης Πρόσβασης (Wireless Access Technology - WAT), με τη συμμετοχή ευφυούς οχήματος (smart car).

3.7.1. Περίπτωση Χρήσης: Ασύρματη Κυψελοειδής Επικοινωνία Οχήματος προς Οτιδήποτε (C-V2X)

Μία περίπτωση χρήσης, είναι η κυψελοειδής επικοινωνία οχήματος προς οτιδήποτε (Cellular Vehicle-to-Everything - C-V2X) η επικοινωνία δηλαδή μεταξύ οχημάτων και μεταξύ οχημάτων και υποδομών ([128], [129], [131], [216]). Οι δυνατότητες αυτές είναι απαραίτητες για τη λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων.

Οι μικρές κυψέλες μπορούν να χτίσουν την υποδομή που μπορεί να στηρίξει ισχυρές επικοινωνίες απαραίτητες για εφαρμογές ασφαλούς οδήγησης [128].

Η επικοινωνία Vehicle-to-Everything (V2X) ([128], [130], [219], [225], [226]) είναι μία τεχνολογία πρότυπο που ενεργοποιεί την επικοινωνία και αλληλεπίδραση ενός οχήματος με τον χρήστη, τον δρόμο, την υποδομή, τον πεζό και το δίκτυο όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 37** ([46], [43]).

Επικοινωνία Οχήματος με Όχημα (Vehicle to Vehicle Communication - V2V)

Οι υπηρεσίες επικοινωνιών V2V ([128], [221], [222]) οι οποίες είναι σχεδιασμένες για συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα, χρειάζονται διαρκή πρόσβαση στους αισθητήρες των οχημάτων προκειμένου να υποστηρίζεται προηγμένος προγραμματισμός πορείας και υψηλής ταχύτητας ελιγμοί [45].

Υπάρχουν δύο διατάξεις προγραμματισμού πορείας στην επικοινωνία τύπου V2V, ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός ο οποίος χρησιμοποιεί δεδομένα από τους αισθητήρες του ίδιου οχήματος και ο μακροπρόθεσμος ο οποίος χρησιμοποιεί δεδομένα από άλλα οχήματα και από τις γύρω υποδομές. Ως εκ τούτου, ένα συνδεδεμένο όχημα (connected vehicle - CV) έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει με ασφαλή τρόπο μία δυναμική απόφαση που να στηρίζεται στην αναγνωριζόμενη κίνηση [43].



Εικόνα 37: Τεχνολογίες Επικοινωνίας Vehicle-to-Everything (V2X).

Επικοινωνία οχήματος με πεζό (Vehicle to Pedestrian Communication - V2P)

Η επικοινωνία V2P στοχεύει στην βελτίωση της ασφάλειας των πεζών κάνοντας χρήση κυψελοειδούς ασύρματης τεχνολογίας στο έξυπνο κινητό τους [223]. Όλα τα συνδεδεμένα οχήματα, οι ποδηλάτες και οι πεζοί θα στέλνουν στον εξυπηρετητή του νέφους πληροφορίες οι οποίες αναφέρονται στην ταχύτητα, στη θέση τους και στην κατεύθυνσή τους. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιήσουν προειδοποιητικά μηνύματα που αφορούν σε καταστάσεις ασφάλειας και επικινδυνότητας όπως για παράδειγμα είναι η επικείμενη σύγκρουση με όχημα [224].

Επικοινωνία οχήματος με υποδομή (Vehicle to Infrastructure Communication - V2I)

Ο βασικός σκοπός της επικοινωνίας V2I είναι ο αμφίδρομος μερισμός πληροφοριών και δεδομένων σε δομικά εξαρτήματα (components) που βρίσκονται στο πλάι των δρόμων όπως είναι οι φωτεινοί σηματοδότες κυκλοφορίας, οι πυλώνες φωτισμού των δρόμων, περιοχές στάθμευσης, κάμερα για παρακολούθηση της κίνησης, RFID κ.α.

Τα ως άνω δομικά εξαρτήματα που απαιτούνται για την επικοινωνία οχήματος με την υποδομή είναι η επί του οχήματος («εποχούμενη») μονάδα (vehicle on-board unit - OBU), η παρόδια μονάδα (road side unit - RSU) και το κανάλι ασφαλούς επικοινωνίας. Η OBU είναι ένας ραδιοαναμεταδότης για σύστημα Αποκλειστικής Επικοινωνίας Μικρής Εμβέλειας⁷⁴ (Dedicated

⁷⁴ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: Society of Automotive Engineers (SAE): **Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary Resources**. Available at: <https://www.sae.org/standards/development/dsrc>

Short Range Communication - DSRC) και για σύστημα GPS ενώ παρέχει επικοινωνία με την RSU. Η RSU πραγματοποιεί τη μεταφορά δεδομένων και τη διαχείριση μηνυμάτων στα οχήματα ([212], [213], [227]).

Ενδοεπικοινωνία Οχήματος (Intra Vehicle Communication)

Η ενδοεπικοινωνία οχήματος διευκολύνει την εκπομπή δεδομένων ανάμεσα στα συστατικά μέρη του οχήματος και στους αισθητήρες του οχήματος. Η επικοινωνία αυτή είναι σημαντική για την εξασφάλιση ασφαλούς οδήγησης όπως ο αισθητήρας οδηγού που παρακολουθεί την κατάσταση του οδηγού και αισθητήρες άλλων οχημάτων που παρακολουθούν την κατάσταση των ελαστικών και το σύστημα των φρένων. Η επικοινωνία αυτή γίνεται μέσω ασύρματης σύνδεσης και ενσύρματης (Ethernet) ([43], [227]).

3.7.2. Περίπτωση Χρήσης: Στύλοι Φωτισμού

Οι στύλοι φωτισμού είναι η πιο δημοφιλής θέση εγκατάστασης μικρών κυψελών από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Υπάρχει συνήθως μία υψηλή πυκνότητα στύλων φωτισμού, όπου υπάρχει και μεγάλο πλήθος ανθρώπων και κίνηση ανά κυψέλη. Βρίσκονται σε καλό ύψος στο οποίο οι περισσότερες κυψέλες μπορούν να έχουν μία καλή οπτική εικόνα. Η εγκατάσταση είναι απλή όπως και η πρόσβαση σε μία πηγή ενέργειας στην οποία συνδέεται η κυψέλη [228]. Οι στύλοι φωτισμού είναι εύκολο να δώσουν μία ευχάριστη αισθητική με χρήση μικρών απλών κουτιών και μία κεραία εναρμονισμένη με το στύλο [229]. Τα κουτιά μπορούν να δείχνουν ογκώδη εάν τα στοιχεία αυτά γίνουν πολύ πλατιά ή εάν εμπλέκονται με το δικαίωμα διέλευσης (right of way - RoW) ή με τους πεζόδρομους (βλέπε **Εικόνα 38**).



Εικόνα 38: Κουτιά Μικρών Κυψελών Τοποθετημένα στο Κάτω Μέρος ή στην Κορυφή των Στύλων Φωτισμού.

Οι στύλοι φωτισμού αποτελούν καλές τοποθεσίες για κατευθυνόμενες κυψέλες λόγω της θέσης που κατέχουν στους δρόμους και τις διαβάσεις πεζών και γενικά περιβάλλονται από κτήρια. Ωστόσο, τα κτήρια μπορούν να εμποδίσουν τα σήματά τους να εισχωρήσουν στο εσωτερικό τους. Η χροιά των παραθύρων εμποδίζει τα σήματα 5G και για το λόγο αυτό ένας αναμεταδότης πρέπει να εγκαθίσταται στο εσωτερικό των τζαμιών ώστε να επιτραπεί η είσοδος των σημάτων στο εσωτερικό του κτηρίου.

Οι μικρές κυψέλες που αξιοποιούν έξυπνους στύλους φωτισμού ως ενσωματωμένους σταθμούς βάσεων, αντιπροσωπεύουν μία δομική εξέλιξη στις έξυπνες πόλεις. Οι έξυπνοι στύλοι φωτισμού δεν αποτελούν μόνο σημεία πρόσβασης στα δίκτυα 5G αλλά και μία έξυπνη πλατφόρμα από πολλούς αισθητήρες για την υποστήριξη νέων τοπικών υπηρεσιών στις (έξυπνες) πόλεις.

Οι μικρές κυψέλες ως το βασικό κλειδί της τεχνολογίας 5G, παρέχουν δυνατότητες στα υπερβολικά πυκνά δίκτυα (Ultra-Dense Networks - UDNs) για να υποστηρίξουν όλες τις δυνατές επικοινωνίες, άνθρωπου με άνθρωπο, άνθρωπου με μηχανή και μηχανής με μηχανή, στοχεύοντας στην μελλοντική ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, έξυπνων οχημάτων και έξυπνων κτηρίων [230].

Η τεχνολογία των μικρών κυψελών επιλύει πολλά προβλήματα των παρόχων κινητής τηλεφωνίας και θέτει ως σκοπό την εύρεση των καλύτερων τοποθεσιών εξωτερικού χώρου, οι οποίες θα παρέχουν καλύτερη συνδεσιμότητα στους πελάτες τους και θα εξασφαλίζουν περισσότερα έσοδα λόγω της απόκτησης περισσότερων θέσεων εγκατάστασης [231]. Οι μικρές κυψέλες σε σχέση με τις μακροκυψέλες τοποθετούνται κάτω από το μέσο όρο ύψους των κτηρίων ([232], [233]). Οι στύλοι φωτισμού των πόλεων αποτελούν έναν ιδανικό τόπο για την εγκατάσταση μικρών κυψελών γιατί παρέχουν μεγαλύτερη κάλυψη και υψηλή χωρητικότητα. Ένα άλλο πλεονέκτημα της εγκατάστασής τους είναι ότι μειώνουν τον αριθμό των μακροκυψελών οι οποίες είναι δαπανηρές στην εγκατάσταση και στη διαχείρισή τους.

Η **Εικόνα 39** απεικονίζει μία προσέγγιση των έξυπνων στύλων φωτισμού 5G. Οι στύλοι φωτισμού μπορούν να λειτουργήσουν ως ένα δίκτυο κορμού (backbone network) για τεχνολογίες 5G που όχι μόνο παρέχουν μία πλατφόρμα σύνδεσης πολύ μεγάλου αριθμού αισθητήρων αλλά επίσης υποστηρίζουν επικοινωνίες μηχανής προς μηχανή (M2M) για την αυτόνομη οδήγηση οχημάτων και την επαυξημένη πραγματικότητα των ανθρωποκεντρικών επικοινωνιών [64].



Εικόνα 39: Προσέγγιση των Έξυπνων Στύλων Φωτισμού 5G, με πιθανές δυνατότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παροχή νέων υπηρεσιών σε χρήστες [64].

Η εγκατάσταση μικρών κυψελών δικτύων 5G και των δικτύων αισθητήρων στους στύλους φωτισμού των πόλεων μπορεί να γίνει είτε χωρίς την καθοδήγηση ενός δικτυακού παρόχου κινητής τηλεφωνίας MNO (Non-MNO driven small cells) είτε με την καθοδήγηση αυτού (MNO driven small cells). Οι εν λόγω περιπτώσεις περιγράφονται εν συντομία ως ακολούθως:

Non-MNO driven small cells: Το σενάριο αυτό προκύπτει από έναν συνδυασμό υψηλού επιπέδου ανάπτυξης του Διαδικτύου και της μη ύπαρξης δικτυακού παρόχου κινητής τηλεφωνίας που να διαχειρίζεται τους στύλους φωτισμού 5G. Για τους MNOs πρόκειται για το χειρότερο σενάριο αφού δεν είναι οι πρωταγωνιστές, ενώ άλλοι «παίκτες» της αγοράς έχουν

αποκτήσει την κυριότητα των υποδομών. Τούτο συνιστά μία μεγάλη πρόκληση για τον κύριο ενδιαφερόμενο-συμφεροντούχο (stakeholder) αφού οι απαιτήσεις είναι υψηλές και η κίνηση δεδομένων είναι μαζική. Κάποιοι άλλοι «παίκτες» (όπως π.χ. ένας προμηθευτής υποδομών ή αγορές τοπικής συνδεσιμότητας) πρέπει να αναλάβουν την παροχή των κατάλληλων υποδομών (ήτοι τη μαζική ανάπτυξη μικρών κυψελών σε στύλους φωτισμού) και τη διαχείριση των επιχειρηματικών διαδικασιών. Η υψηλή ζήτηση για χρήση της κίνησης δεδομένων θα έχει ως αποτέλεσμα, από τη μία μεριά, την παροχή πολλών νέων υπηρεσιών για τους χρήστες και από την άλλη, έναν υψηλού επιπέδου ανταγωνισμό μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών. Η επένδυση σε αυτό το σενάριο είναι κοστανεργή (cost effective) καθώς τα έσοδα είναι υψηλά.

MNO driven small cells: Το σενάριο αυτό απορρέει από τον/τους δικτυακό/ους πάροχο/-ους κινητής τηλεφωνίας (MNOs) ως τους βασικούς παρόχους των στύλων φωτισμού 5G και ένα υψηλό επίπεδο κίνησης του Διαδικτύου, το οποίο αποτελεί και το καλύτερο σενάριο για τους παρόχους προκειμένου να αποκτήσουν τα μεγαλύτερα οφέλη. Στο αντίστοιχο πλαίσιο, οι ρυθμιστικές ενέργειες έχουν ως αποτέλεσμα την πώληση υποδομών και την κατανομή φάσματος στους δικτυακούς παρόχους κινητής τηλεφωνίας, αναμένοντας επιχειρηματικά οφέλη μέσω της συνεργασίας των παρόχων και της χρήσης κοινών πόρων. Οι πάροχοι είναι υπεύθυνοι για να αντιμετωπίσουν τις υψηλές απαιτήσεις των πελατών. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο, οι συναφείς επιχειρηματικές στρατηγικές ελέγχονται με χρήση ζωνών φάσματος των παρόχων και με τις κυρίαρχες τεχνολογίες. Ο ανταγωνισμός στο συγκεκριμένο σενάριο είναι σχετικά χαμηλό. Η χρήση μη αδειοδοτούμενου φάσματος είναι «εκρηκτική» για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας οι οποίοι αναπτύσσουν στρατηγικές εγκατάστασης και απόκτησης υποδομών για τους στύλους φωτισμού 5G [64].

Έχουν προταθεί τρεις διαφορετικές στρατηγικές εγκατάστασης των μικρών κυψελών και αισθητήρων στους στύλους φωτισμού των πόλεων ((ως Δημοτικών Αρχών/φορέων) με καθοδήγηση των δικτυακών παρόχων κινητής τηλεφωνίας MNO και είναι οι ακόλουθες [65]:

Χαμηλή εμπλοκή της πόλης: Η πόλη (ως Δημοτική Αρχή/φορέας) εκχωρεί δικαιώματα μακροπρόθεσμης εκμετάλλευσης των στύλων φωτισμού σε ένα μόνο διαχειριστή κινητής τηλεφωνίας (MNO) ή σε μία κοινοπραξία από MNOs. Αν και η πόλη μπορεί να διαχειριστεί το κόστος των υποδομών των στύλων φωτισμού, αναλαμβάνει ένα παθητικό ρόλο στην ανάπτυξη του δικτύου και βασίζεται – σε μεγάλο βαθμό – στους MNOs. Η ανάπτυξη είναι αργή καθώς οι MNOs συνήθως δίνουν προτεραιότητα στον εκσυγχρονισμό των περιοχών 4G/LTE. Σχετικά με τα δεδομένα της πόλης, η πόλη ελάχιστα επενδύει στην ενσωμάτωση τμημάτων βάσεων δεδομένων (DBs), δημιουργώντας μικρά σύνολα δεδομένων. Ταυτόχρονα, μία κοινοπραξία εταιριών δεδομένων δημιουργείται από τους MNOs, για την εκμετάλλευση του συνόλου των δεδομένων. Εφόσον η πόλη στερείται της υποδομής για τη συγκέντρωση και την ανταλλαγή δημοτικών δεδομένων και των συλλεγμένων από αισθητήρες δεδομένων, συνάπτει συμφωνία κατανομής εσόδων με την κοινοπραξία των εταιριών δεδομένων που οδηγούνται από τους MNOs. Κατά συνέπεια, μπορούν να αναδυθούν νέες εφαρμογές έξυπνων πόλεων, οι οποίες να διατίθενται κυρίως από ήδη υπάρχοντες παρόχους υπηρεσιών. Σε αυτή τη στρατηγική, οι MNOs επωφελούνται από τις συνέργειες σχετικά με την παροχή συνδεσιμότητας και υπηρεσιών δεδομένων, εφόσον επαναχρησιμοποιούν τις υποδομές και τις καλές πρακτικές. Επιπλέον, διασφαλίζουν τον έλεγχο των υποδομών στα άκρα του δικτύου.

Μεσαία εμπλοκή της πόλης: Όπως και στην χαμηλή εμπλοκή της πόλης, στη στρατηγική αυτή η πόλη (ως Δημοτική Αρχή/φορέας) εκχωρεί δικαιώματα σε εμπλεκόμενους MNOs. Ωστόσο, η πόλη επιβάλλει υποχρεώσεις κάλυψης ως αντάλλαγμα για: α) επιδοτήσεις δημοσίων έργων, β) επιθυμητές συνθήκες πρόσβασης σε δίκτυα οπτικών ινών που ανήκουν στην ίδια την πόλη, γ)

την υπερβολαβία της διαχείρισης των αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι στους στύλους, δ) την υπερβολαβία της φιλοξενίας των δεδομένων σε υποδομές.

Συνεπώς υπάρχει συνεργασία των ΜΝΟs με την πόλη. Από την μία μεριά οι ΜΝΟs αυξάνουν τα επίπεδα εκμετάλλευσης της υπάρχουσας συνδεσιμότητας και των υποδομών των δεδομένων ενώ διασφαλίζουν τον έλεγχο στην φιλοξενία των άκρων. Από την άλλη μεριά, η εταιρία διαχείρισης των δημοτικών δεδομένων μεγιστοποιεί την αξία και τα έσοδα από τα δεδομένα της πόλης, επικεντρώνοντας στη συνάθροισή τους σε μία ουδέτερη υποδομή.

Υψηλή εμπλοκή πόλης: Η πόλη (ως Δημοτική Αρχή/φορέας) έχει ένα μεγάλο επενδυτικό ρόλο στην ανάπτυξη των στύλων φωτισμού δικτύων 5G. Η πόλη θέτει στόχους κάλυψης, αποκτά κεραιές 5G και αναπτύσσει συνεργασία με εταιρίες ενέργειας για τη διασύνδεση των στύλων φωτισμού με δίκτυα οπτικών ινών και με ενεργειακά δίκτυα. Για την ανάκτηση της επένδυσης, η πόλη δημιουργεί μία εταιρεία διαχείρισης τύπου ουδέτερου ξενιστή παράγοντας έσοδα από τον «τεμαχισμό» του δικτύου (network slicing) 5G, τη χρηματοδοτική μίσθωση του χώρου που καταλαμβάνουν οι στύλοι φωτισμού και τις συνδρομές ευρυζωνικότητας στην περίπτωση διαθέσιμων τοπικών αδειών.

Όσο αφορά στα δεδομένα της πόλης, η εταιρεία διαχείρισής τους μεγιστοποιεί την αξία και τα έσοδα, επικεντρώνοντας στη συνάθροισή τους. Για παράδειγμα, βασιζόμενη στην επενδυτική δυνατότητα, η πόλη μπορεί να προτιμά πρώτα την επένδυση στις υποδομές των δεδομένων και να περιμένει τα έσοδα προτού προβεί στην κατασκευή υποδομών συνδεσιμότητας. Επιπλέον, η πόλη μπορεί να παρέχει κίνητρα για επενδύσεις σε υποδομές φιλοξενίας στα άκρα του δικτύου επιτρέποντας τη δρομολόγηση σε τρίτους.

Οι προσδοκώμενοι «παίκτες» της αγοράς σε τέτοιες δράσεις, όπως προηγουμένως, εννοιολογικά φαίνονται στην **Εικόνα 40**.

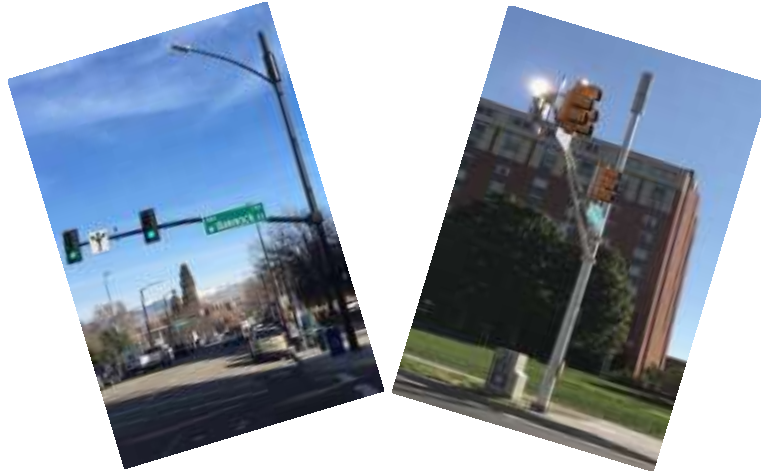


Εικόνα 40: Προσδοκώμενοι Ενδιαφερόμενοι Φορείς για Αξιοποίηση των Στύλων Φωτισμού 5G των Πόλεων.

3.7.3. Περίπτωση Χρήσης: Φωτεινοί Σηματοδότες

Οι φωτεινοί σηματοδότες είναι λιγότερο κατάλληλες τοποθεσίες σε σχέση με τους φωτεινούς στύλους αλλά προσφέρουν μία καλή επιλογή όταν απαιτείται ενίσχυση της κάλυψης σε μία περιοχή όπου άλλες κυψέλες αδυνατούν επαρκώς να καλύψουν (βλέπε **Εικόνα 41**) [234]. Βρίσκονται σε ένα ιδανικό ύψος για τις κυψέλες. Η εγκατάστασή τους είναι απλή και, για λόγους ασφαλείας, δεν τοποθετούνται από τη μεριά του στύλου που είναι πλησιέστερα στο οδόστρωμα. Οι φωτεινοί σηματοδότες παρέχουν καλύτερη αισθητική όταν είναι

ευθυγραμμισμένα με τους στύλους και τα κουτιά που βρίσκονται πάνω σε αυτούς ή στη βάση εφόσον ο εγκατεστημένος εξοπλισμός δεν γίνεται ιδιαίτερα ογκώδης ή παρεμποδίζει τη διέλευση. Οι αγωγοί μπορούν να τοποθετηθούν είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά των στύλων ανάλογα με την εσωτερική διάταξη [40].



Εικόνα 41: Απεικόνιση Μικρών Κυψελών, εγκατεστημένων στην Κορυφή Φωτεινών Σηματοδοτών.

3.7.4. Περίπτωση Χρήσης: Πινακίδες

Οι πινακίδες είναι λιγότερο συχνές αλλά έχουν το μεγαλύτερο ύψος τοποθέτησης. Το ύψος τους επιτρέπει την πρόσβαση σε πολλά κτήρια και εμπόδια, δυνατότητα την οποία δεν έχουν μικρές κυψέλες που βρίσκονται σε μικρότερο ύψος. Ωστόσο, είναι λιγότερο αποτελεσματικές όταν δεν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους.

Το ύψος τους δημιουργεί δυσκολίες στην εγκατάσταση και δεν είναι συνηθισμένη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Οι πινακίδες στις πόλεις αποτελούν ένα καλύτερο παράδειγμα για εγκατάσταση μικρών κυψελών παρά σε πινακίδες μεγάλων αυτοκινητόδρομων με λιγιστές περιβάλλουσες υποδομές και χαμηλότερο ποσοστό πληθυσμού. Μπορούν εύκολα να ταιριάξουν αισθητικά εάν οι μικρές κυψέλες κρύβονται στο πλαϊνό μέρος των πινακίδων [235] (βλέπε **Εικόνα 42**).

Ωστόσο, εάν η τοποθεσία εμποδίζει τη κάλυψη του σήματος, οι μικρές κυψέλες θα μπορούσαν να προεξέχουν ή να τοποθετηθούν στην κορυφή των πινακίδων. Η επιλογή αυτή δημιουργεί μία άσχημη αισθητική και δεν ταιριάζει με την υποδομή των πινακίδων. Μερικές περιπλοκές που δημιουργούνται είναι η μακροβιότητα και το κόστος της μίσθωσης που σχετίζεται με τις πινακίδες [40].

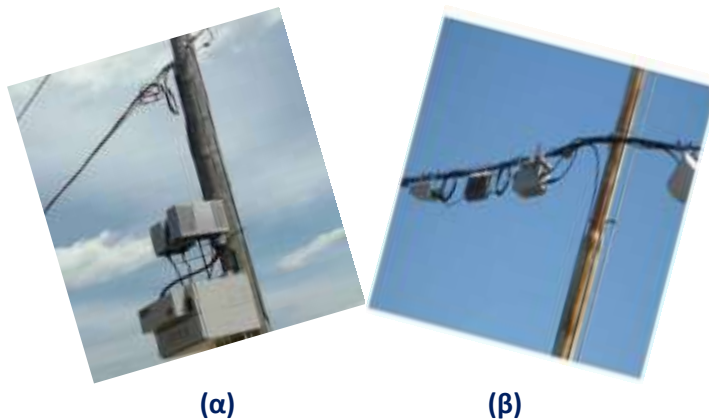


Εικόνα 42: Μικρές Κυψέλες εγκατεστημένες στα Άκρα Πινακίδων.

3.7.5. Περίπτωση Χρήσης: Στύλοι Κοινής Ωφέλειας

Οι στύλοι κοινής ωφέλειας αποτελούν έναν άλλο τύπο υποδομών μεταφοράς που συχνά εμφανίζονται σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή [235]. Ωστόσο, ο εξοπλισμός των μικρών κυψελών είναι προτιμότερο να είναι προσαρτημένος στους πυλώνες ή τις ενεργειακές γραμμές υπερυψωμένος κι όχι επί του εδάφους. Η **Εικόνα 43(α)** απεικονίζει μικρή κυψέλη προσαρτημένη σε έναν στύλο κοινής ωφέλειας και η **Εικόνα 43(β)** απεικονίζει μικρές κυψέλες που κρέμονται σε στύλους ρεύματος. Ισχύς και οπισθοζεύξη είναι διαθέσιμα στην περίπτωση αυτή, αλλά η αισθητική αποτελεί ένα σημαντικό θέμα.

Οι πιο πολλοί στύλοι κοινής ωφέλειας είναι ξύλινοι κι έτσι οι μικρές κυψέλες τείνουν να προεξέχουν περισσότερο από τις άλλες επιλογές ανεξάρτητα της τοποθέτησής τους. Σε περιοχές που δεν υπάρχουν πολλοί φωτεινοί στύλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι στύλοι κοινής ωφέλειας για να συμπληρωθεί η απαιτούμενη κάλυψη σε κυψέλες [40].



(α)

(β)

**Εικόνα 43: Μικρές Κυψέλες εγκατεστημένες σε Ξύλινους Στύλους Κοινής Ωφέλειας:
(α) Μικρή Κυψέλη και Καμπίνες εγκατεστημένες στο Μέσο Στύλων Κοινής Ωφέλειας και
(β) Στερεωμένες στις Γραμμές Ηλεκτροδότησης.**

3.7.6. Περίπτωση Χρήσης: Στάσεις Λεωφορείων

Οι στάσεις λεωφορείων προσφέρουν πολλούς τρόπους να αφομοιώσουν αισθητικά τις μικρές κυψέλες ή/και να τις αποκρύψουν (βλέπε **Εικόνα 44**). Οι μικρές κυψέλες μπορούν, για παράδειγμα, να τοποθετηθούν στο πλαϊνό μέρος ή στην κορυφή τυχόν διαφημιστικών

πινακίδων, μέσα σε κουτιά πάνω από το στέγαστρο, μέσα σε πινακίδες σημάτων που περιγράφουν τις στάσεις των λεωφορείων και αλλού [235].



Εικόνα 44: Απεικόνιση Μικρών Κυψελών σε Διαφημιστικές Πινακίδες σε Στέγαστρο Στάσης Λεωφορείων.

Βρίσκονται συνήθως σε πόλεις και πυκνοκατοικημένες περιοχές και σε περιοχές που οι άνθρωποι τείνουν να χρονοτριβούν, ωθώντας πολλούς ανθρώπους να συνδεθούν στην κυψέλη για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Οι τοποθεσίες αυτές είναι μικρότερες από άλλες επιλογές οι οποίες πιθανά εμποδίζουν τα σήματα των κυψελών. Η επιλογή αυτή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί με άλλες εφαρμογές όπως είναι οι στύλοι φωτεινών σηματοδοτών και μονοπολικών κατακόρυφων μικρών κεραιών [40].

3.7.7. Περίπτωση Χρήσης: Δεξαμενές Ύδατος - Συντριβάνια

Τα συντριβάνια και οι δεξαμενές ύδατος είναι επίσης μία επιλογή για μικρές κυψέλες όπως φαίνεται στην **Εικόνα 45**. Είναι λιγότερο συχνή επιλογή αλλά το ύψος και το μέγεθός τους επιτρέπουν την τοποθέτηση πολλαπλών μικρών κυψελών σε μία περιοχή για την προαγωγή του σήματος και για την κάλυψη μιας περιοχής που δεν έχει πολλές επιλογές υποδομών.

Για να μειωθεί το βάρος του νέου εξοπλισμού, οι κεραιές συχνά τοποθετούνται κοντά στην κορυφή του πύργου καθώς τα άλλα συστατικά βρίσκονται σε καμπίνα πάνω από ή πλησιέστερα στο έδαφος.

Οι καμπίνες στο έδαφος δεν δημιουργούν πρόβλημα εφόσον οι πύργοι δεν είναι αρκετά κοντά στον δρόμο στον οποίο η καμπίνα μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο. Λόγω του ύψους τους, απαιτούν περισσότερο εξοπλισμό ο οποίος είναι δυσκολότερο να εγκατασταθεί σε σχέση με μία κυψέλη που βρίσκεται σε έναν στύλο [40].



Εικόνα 45: Μικρές Κυψέλες που φιλοξενούνται σε Δεξαμενές Νερού.

3.7.8. Περίπτωση Χρήσης: Εγκαταστάσεις σε Κτήρια

Η τοποθέτηση μικρών κυψελών στα πλαϊνά ή στις οροφές κτηρίων έχει διάφορα οφέλη. Τα κτήρια μπορούν να στηρίζουν περισσότερο και βαρύτερο εξοπλισμό από ό,τι οι μικρότερες δομές και έτσι μπορούν να δεχτούν μεγαλύτερες κυψέλες με ισχυρότερη και ευρύτερη περιοχή κάλυψης σημάτων.

Τα σήματα μπορούν να εξαπλωθούν καλύτερα αφού τα κτήρια είναι γενικά ψηλότερα από τις περιβάλλουσες υποδομές και υπάρχουν λιγότερα εμπόδια. Έτσι τα σήματα μπορούν να ενισχυθούν μέσα και γύρω από τα κτήρια.

Δεν είναι πολύ κοντά στο έδαφος ή στο οδόστρωμα κι έτσι θα απαιτούνται μικρές κυψέλες με εκτενέστερη περιοχή σε σχέση με άλλες κυψέλες που βρίσκονται στο επίπεδο του δρόμου, προκειμένου να συμπληρώνεται η δικτυακή κάλυψη. Η εγκατάσταση μιας κυψέλης στην ταράτσα ενός κτηρίου είναι εύκολη ενώ εάν τοποθετηθεί στο πλάι του κτηρίου απαιτείται περισσότερος εξοπλισμός και αισθητικά μειονεκτεί λόγω της προεξοχής [40].

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΙΟΙΧΕΩΝ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΩΝ ΤΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ SESAME ΚΑΙ 5G ESSENCE

4.1. Επισκόπηση του Ερευνητικού Προγράμματος SESAME

Στο χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση ερευνητικό πρόγραμμα SESAME [236] δημιουργήθηκε η ιδέα της Μικρής Κυψέλης με Δυνατότητες Ενεργοποίησης Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Enabled Small Cell - CESC), μιας μικρής κυψέλης δυνάμενης να ενεργοποιηθεί σε ένα υπολογιστικό νέφος από πολλαπλούς παρόχους, η οποία ενσωματώνει μια εικονικοποιημένη υποδομή εκτέλεσης εντολών (ήτοι ένα Light Data Centre) για την ανάπτυξη εικονικών δικτυακών λειτουργιών (Virtual Network Functions - VNFs) που υποστηρίζουν εφαρμογές και υπηρεσίες διαχείρισης και εκτέλεσης «self-x λειτουργιών»⁷⁵ στο εσωτερικό της υποδομής του δικτύου πρόσβασης [5]. Πρόκειται δηλαδή, για μια μικρή κυψέλη στην οποία έχει προστεθεί ένας «ελαφρύς» επεξεργαστής με δυνατότητες εικονικοποίησης.

Το πρόγραμμα SESAME είχε ως στόχο καινοτομίες που περιστρέφονται γύρω από τρία κεντρικά σημεία, στο ευρύτερο πλαίσιο του 5G [5]. Αυτές αναλύονται εν συντομία ως εξής:

- ✓ Τοποθέτηση της δικτυακής ευφυΐας και εφαρμογών στα άκρα του δικτύου μέσω της εικονικοποίησης των λειτουργιών του δικτύου (Network Functions Virtualization - NFV) και της νεφούπολογιστικής στα άκρα του δικτύου (edge cloud computing).
- ✓ Περαιτέρω ουσιώδης εξέλιξη της ιδέας των μικρών κυψελών που επικρατεί στα δίκτυα 4G/LTE αλλά που αναμένεται να ανταποκριθεί με τις πλήρεις δυνατότητές τους στα υπερβολικά απαιτητικά 5G σενάρια.
- ✓ Εδραίωση της πολυμίσθωσης (multi-tenancy) στις υποδομές επικοινωνιών, επιτρέποντας πολλούς φορείς/παρόχους υπηρεσιών να εμπλέκονται σε νέα μεριζώμενα μοντέλα με δυνατότητα πρόσβασης και υπολογισμού στα άκρα.

Μερικά από τα οφέλη που προκύπτουν είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ο πάροχος μειώνει τα λειτουργικά κόστη μοιράζοντας τους πόρους και τη χωρητικότητα του δικτύου.
- ✓ Ο «κάτοχος του τόπου συνάντησης» - “Venue Owner” (μπορεί να θεωρηθεί η Αρχή Τοπικής Αυτοδιοίκησης, ο ιδιοκτήτης εμπορικού κέντρου, σταδίου, επιχείρησης, μεγάλου οικοδομήματος, κτλ.) καθίσταται τελικά ένας τοπικός δικτυακός πάροχος. Αγοράζει, εγκαθιστά και λειτουργεί τις CESCs και ο κάθε διαχειριστής - φορέας εκμετάλλευσης περνάει από εκεί την κίνησή του.
- ✓ Οι τελικοί χρήστες λαμβάνουν καλύτερης ποιότητας υπηρεσίες με τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Η προσέγγιση αυτή θα επιτρέψει σε νέους ενδιαφερόμενους να διεισδύσουν δυναμικά στην αλυσίδα της προσφοράς και της ζήτησης, εκτελώντας το ρόλο παρόχων ουδέτερων ξενιστών (neutral host providers) σε περιοχές υψηλής κίνησης όπου η δικτυακή πυκνότητα δεν είναι αποτελεσματική [2].

⁷⁵ “Self-x” λειτουργίες: Γενικά ο όρος αυτός αναφέρεται σε χαρακτηριστικά της αυτο-ρύθμισης (self-configuration), της αυτο-οργάνωσης (self-organization), της αυτο-βελτιστοποίησης (self-optimization), της αυτο-ίασης (self-healing) και της αυτο-προστασίας (self-protection).

Τρία αρχικά σενάρια «στόχοι» έχουν αναγνωριστεί ως «υποσχόμενα πεδία» για την εφαρμογή των εννοιών-ιδεών του SESAME (Small Cells CoordinAtion for Multi-tenancy and Edge services), τα οποία μπορούν στην συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την διατύπωση συγκεκριμένων περιπτώσεων χρήσης.

Μία περιγραφή των σεναρίων δίνεται στις επόμενες υποενότητες, τονίζοντας τις κύριες προκλήσεις, τις εφαρμογές και υπηρεσίες (στο πεδίο εφαρμογής) όπως και τα σχετικά συστατικά στοιχεία του έργου SESAME όπως και τις δυνατότητές τους.

4.2. Αναφορά Ανάλυσης Αγοράς και Επιχειρησιακού Μοντέλου

Η εισαγωγή των τεχνολογιών 5G στην καθημερινή μας ζωή, στον κοινωνικό και οικονομικό τομέα, είναι ένα βασικό εργαλείο που υποστηρίζει τη μεταμόρφωση των «κάθπτων βιομηχανιών» και εστιάζει στην ανάπτυξη των υποδομών νέφους και των δικτύων ψηφιακής πρόσβασης κινητής τηλεφωνίας [80].

Η αυξανόμενη ζήτηση για υψηλή ευρυζωνικότητα και οι εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις για όγκο δεδομένων, θέτουν νέες απαιτήσεις στις υπάρχουσες δικτυακές υποδομές. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και η προληκτική και σε πραγματικό χρόνο (real time - RT) ευφυΐα των δικτυακών συσκευών διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στην εξεύρεση λύσεων και υπηρεσιών από το νέφος στα άκρα του δικτύου. Η νέα γενιά επικοινωνιών και υπηρεσιών περιλαμβάνει εικονικοποιημένες εφαρμογές που τρέχουν εγγύτερα στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας παρέχοντας δικτυακή προσαρμοστικότητα, οικονομία και επεκτασιμότητα. Η μεταφορά υπηρεσιών από το νέφος στα άκρα του δικτύου δημιουργεί ένα νέο συνεργατικό επιχειρηματικό μοντέλο ανάμεσα στους παρόχους δικτυακών υπηρεσιών ή στους παρόχους υπηρεσιών νέφους και στις επιχειρήσεις.

Σύμφωνα με μία βασική μελέτη του 2019 [237], η αγορά των μικρών κυψελών θα συνεχίσει να αναπτύσσεται, αφού το 85% των LTE κυψελών αφορά σε εξοπλισμό μικρών κυψελών. Σύμφωνα με το Small Cell Forum⁷⁶ (SCF) [238] η αύξηση του αριθμού των μικρών κυψελών το 2016 σε σχέση με το 2015 ήταν 280%. Η ανάλυση του Small Cell 5G Network Market προέβλεπε ότι η αγορά μικρών κυψελών θα αυξάνεται με ρυθμό 29,80% μέχρι το 2020, ενώ σύμφωνα με το SCF το 90% των κυψελών θα αφορά περιοχές χωρίς οικιστική χρήση.

Το πλαίσιο εργασίας του προγράμματος 5G ESSENCE [169] αναγνωρίζει μία αρχιτεκτονική δύο επιπέδων που επιτρέπει την διάθεση δυναμικά επαναπροσδιοριζόμενων εικονικών δικτυακών υποδομών με εξατομικευμένες υπολογιστικές δυνατότητες και με ευέλικτες δυνατότητες δικτύωσης. Οι πάροχοι δικτύων κινητής τηλεφωνίας (MNOs) και οι «παίκτες» πάνω από την κορυφή (over-the-top - OTT) θα επωφεληθούν για να αναπτύξουν και να προσφέρουν υπηρεσίες αιχμής σε συγκεκριμένους πελάτες με αυξημένη εξοικονόμηση κόστους (π.χ. για ενεργειακή απόδοση χάρη στο σχεδιασμό Κέντρου Δεδομένων στα Άκρα (Edge DC) και στη φορητότητα λειτουργιών εγγύτερα στα άκρα των κινητών δικτύων) και που θα επιτρέπουν τη βέλτιστη επαναχρησιμοποίηση των αναπτυγμένων εικονικών υποδομών.

Στοχεύοντας στην αύξηση της δικτυακής χωρητικότητας, στην κλιμακοθετησιμότητα και στη μείωση της λανθάνουσας καθυστέρησης, τα εξαιρετικά πυκνά δίκτυα με πολυάριθμες μικρές κυψέλες αποτελούν μία αξιοσημείωτη λύση. Αυτά απαιτούν προηγμένο μετριάσμο των

⁷⁶ Small Cell Forum (SFC), <https://www.smallcellforum.org/>

παρεμβολών και προηγμένη αυτοματοποίηση της διαχείρισης και των λειτουργιών στα άκρα του δικτύου. Η προσέγγιση διάθεσης Μικρής Κυψέλης ως υπηρεσία (Small Cell as a Service - SaaS, η οποία ενεργοποιείται επίσης μέσω πολλαπλών εκμισθωτών και δια του μοντέλου δικτυακού (φετο-)τεμαχισμού στο πρόγραμμα 5G ESSENCE) θα είναι στοιχειωδώς πολύ πιο αποδοτική σε σενάρια υψηλής δικτυακής πυκνωσης από ό,τι λύσεις βασιζόμενες σε ανεξάρτητες δικτυακές αναπτύξεις ανά πάροχο, επιφέροντας έτσι σημαντική μείωση στο κόστος.

Μελέτη της Nokia για τις μικρές κυψέλες⁷⁷ ερεύνησε τον απαιτούμενο αριθμό μικρών κυψελών για την παροχή της ίδιας ποιότητας Εμπειρίας Χρήστη με χρήση του μοντέλου ουδέτερου ξενιστή, συγκρινόμενο με καθέναν από τρεις συμμετέχοντες παρόχους που ανέπτυξαν έκαστος το δικό του δίκτυο μικρών κυψελών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εγκατάσταση ενός δικτύου μικρών κυψελών παρείχε μία σημαντική αύξηση, της τάξης του 35%, στην ποιότητα εμπειρίας του χρήστη (που μετρήθηκε) όσον αφορά στον αριθμό των συνδρομητών που ελάμβαναν διακεπραιωτικότητα με ρυθμό κατερχόμενης ζεύξης 1,8 Mbps.

Επιπλέον, μόνο 25 κοινόχρηστες εγκαταστάσεις ήταν απαραίτητες στην περίπτωση της ανάπτυξης ουδέτερου ξενιστή σε σχέση με την μέθοδο της ανεξάρτητης λειτουργίας των παρόχων, γεγονός που σημαίνει 56% εξοικονόμηση στον αριθμό των εγκαταστάσεων. Η μελέτη αναλύει και τα οφέλη ενός μοντέλου στο οποίο λειτουργίες και περιουσιακά στοιχεία μοιράζονται μεταξύ πολλών μέσω τρίτων.

Τα οικονομικά οφέλη του μοντέλου αυτού υπολογίστηκαν γύρω στο 40% όσο αφορά την εξοικονόμηση περιουσιακών στοιχείων και γύρω στο 31% όσο αφορά βελτιώσεις στις ταμειακές ροές. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι οι λύσεις του 5G ESSENCE, οι οποίες είναι βασισμένες στο μοντέλο του ουδέτερου παρόχου για την διευκόλυνση της κοινόχρηστης χρήσης των υποδομών μεταξύ πολλών εκμισθωτών, μπορούν να οδηγήσουν σε μία σημαντική επίπτωση όσον αφορά στην εξοικονόμηση κόστους/δαπανών για δικτυακούς παρόχους.

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες από το πλαίσιο δράσεων του SCF ([238], [239], [243]) έχει διαπιστωθεί ότι η διαχείριση πόρων είναι μία από τις θεμελιώδεις προσεγγίσεις για την εκκίνηση του μοντέλου πολλαπλών διαχειριστών.

Συγκεκριμένα, το μοντέλο διαχείρισης πόρων των μικρών κυψελών επιτρέπει μεγαλύτερο έλεγχο του παρόχου στους πόρους του, εξελίσσοντας την προσέγγιση αυτή προς τον δικτυακό (φετο-)τεμαχισμό σε εικονικοποιημένα περιβάλλοντα, ώστε διαφορετικοί εκμισθωτές να έχουν την δυνατότητα να έχουν πρόσβαση στους δικούς τους πόρους.

Η βασική πρόκληση στο πλαίσιο εργασίας του 5G ESSENCE συνίσταται στη δημιουργία ενός οικοσυστήματος για την υποστήριξη της κοινόχρηστης δικτυακής υποδομής, που είναι βασισμένο στους πυλώνες της εικονικοποίησης του δικτύου, στις δυνατότητες της υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου κινητής επικοινωνίας και στη γνωστική (cognitive) διαχείριση δικτύου.

Μία περαιτέρω πρόκληση που αντιμετωπίζεται από το πλαίσιο του 5G ESSENCE είναι η δραματική μείωση του λειτουργικού κόστους (OPEX) για τη διαχείριση του δικτύου μέσω της αυτοματοποίησης, ενώ αυξάνεται η ασφάλεια και η ποιότητα εμπειρίας ανά χρήστη.

4.3. Η Επανάσταση των Δικτύων 5G

Το 5G αναμφίβολα θα αλλάξει τον κόσμο και τις καθημερινές μας ζωές, στο σύνολό τους. Θα έχει πολλές πολιτικές, κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Θα εμφανιστούν νέες εφαρμογές

⁷⁷ Βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/small-cells/>

και περιπτώσεις χρήσεων, οι οποίες όχι μόνο θα επιτρέψουν την επεκτασιμότητα των επιχειρηματικών δράσεων των παρόχων αλλά επίσης θα επιτρέχουν την είσοδο νέων «παικτών» στην αγορά. Η απαίτηση των χρηστών για μεγαλύτερες ταχύτητες θα συνεχίζει να αυξάνεται και το 5G με τις νέες τεχνολογίες και προσεγγίσεις θα ικανοποιήσει αυτές τις ανάγκες των χρηστών. Οι βασικές τεχνολογίες του 5G είναι οι:

- Χιλιοστομετρικά κύματα (mmwaves)
- Μικρές Κυψέλες (Small Cells)
- Μαζική MIMO (Massive MIMO)
- Δημιουργία δέσμης (Beamforming)
- Αμφίδρομη επικοινωνία (Full duplex)

Οι νέες αυτές τεχνολογίες θα επιτρέψουν στο 5G να έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις από τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς και να επιτύχει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, κινητικότητα, μικρότερη λανθάνουσα χαμηλότερη καθυστέρηση, υψηλότερη δικτυακή πυκνότητα και αποδοτικότερη ενεργειακή διαχείριση του δικτύου, τα οποία είναι όλα χαρακτηριστικά απαραίτητα για τις ενδεχόμενες περιπτώσεις χρήσεων στα μελλοντικά δίκτυα.

Τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά, μαζί με την εικονικοποίηση (virtualization) των δικτυακών λειτουργιών, τη δικτύωση την οριζόμενη από το λογισμικό (software-defined networking), την υπολογιστική στα άκρα κινητού δικτύου (mobile edge computing) και τον δικτυακό (φετο-) τεμαχισμό (network slicing), αποτελούν σημαντικά στοιχεία που διευκολύνουν στις προοπτικές της διάθεσης νέων υπηρεσιών. Επιλέον, έχουν αναπτυχθεί μία νέα ραδιοεπαφή και ένα δίκτυο ραδιοπρόσβασης, το αποκαλούμενο ως το 5G New Radio (5G NR) το οποίο μπορεί να λειτουργεί σε τρόπο αυτοδύναμο (standalone - SA) αλλά και σε τρόπο μη αυτοδύναμο (non-standalone - NSA)⁷⁸.

Για τη σωστή ανάπτυξή του, το 5G πρέπει να ακολουθήσει συγκεκριμένους κανόνες που αφορούν στα ραδιοδίκτυα (radio-networks) και στα δίκτυα πυρήνα (core networks), όπως είναι π.χ. οι αδειοδοτήσεις φάσματος από διαφορετικές Εθνικές Ρυθμιστικές Αρχές καθώς και από διεθνείς φορείς-οργανισμούς (όπως είναι π.χ. η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission - EC)).

Το 3GPP είναι ο οργανισμός ανάπτυξης προτύπων (Standards Developing Organization - SDO⁷⁹) που παρέχει τους ορισμούς και τις προτυποποιήσεις για το 5G. Στην έκδοση 15 (Rel-15⁸⁰) υπάρχει το πρώτο πλήρες σετ προδιαγραφών για την αρχιτεκτονική του δικτύου. Στην έκδοση 16 (Rel-16⁸¹), παρουσιάζεται το αυτόνομο 5G με ενισχυμένο ραδιοσύστημα και την επόμενη γενιά του δικτύου κορμού.

Οι επόμενες εκδόσεις αποτυπώνουν τα συμπεράσματα από μελέτες για προτεραιότητα πολυμεσικών υπηρεσιών, V2X υπηρεσίες, δορυφορική πρόσβαση 5G, υποστήριξη τοπικού δικτύου σε 5G, υπηρεσίες εντοπισμού θέσης τερματικών, αυτοματοποίηση δικτύου, επικοινωνίες σε κάθετες περιοχές, ασφάλεια, (φετο-)τεμαχισμός δικτύου και Διαδίκτυο των Πραγμάτων.

⁷⁸ Βλέπε επίσης, *μεταξύ άλλων*: Cohen, P. (2021, September): **Standalone 5G vs Non-Standalone 5G**. PCR Wireless News. Available at: <https://www.rcrwireless.com/20210907/5g/standalone-5g-vs-non-standalone-5g>.

Επίσης βλέπε: Darah, D. (2022, May): **5G NSA vs. SA: How does each deployment mode differ?** TechTarget. Available at: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/feature/5G-NSA-vs-SA-How-does-each-deployment-mode-differ>

⁷⁹ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, *μεταξύ άλλων*: https://en.wikipedia.org/wiki/Standards_organization

⁸⁰ Βλέπε: <https://www.3gpp.org/release-15>

⁸¹ Βλέπε: <https://www.3gpp.org/release-16>

4.4. Καινοτομίες του Προγράμματος 5G ESSENCE στην Αρχιτεκτονική του 5G

Το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα 5G-ESSENCE (Grant Agreement (GA) No.761592) [169] εστιάζεται στη μελέτη της υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου (edge cloud computing) και της διάθεσης Μικρών Κυψελών ως Υπηρεσία (Small Cell as a Service - SaaS) στην αγορά μικρών κυψελών, που διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη του 5G και πέρα από αυτό. Το πρόγραμμα 5G ESSENCE προτείνει μία εξαιρετικά ευέλικτη και κλιμακοθετήσιμη πλατφόρμα, ικανή για να υποστηρίξει νέα επιχειρηματικά μοντέλα και νέες χρηματοροές μέσω της δημιουργίας αγοράς ουδέτερου ξενιστή (neutral host market) και δια της μείωσης του λειτουργικού κόστους, προσφέροντας νέες ευκαιρίες για ανάπτυξη, λειτουργία και εκμετάλλευση δικτυακών υποδομών που εξυπηρετούν εφαρμογές 5G σε τρεις (3) επιλεγμένους καθετοποιημένους τομείς της αγοράς. Τέτοιοι στόχοι «ευθυγραμμίζονται» πλήρως με τις σημερινές τεχνικές και επιχειρηματικές ανάγκες και ως συνέπεια με τις αναγκαίες καινοτομίες στις οποίες επίσης απευθύνονται οι αντίστοιχοι φορείς SDOs.

Γενικά, οι SDOs παρακολουθούν όλες τις πτυχές, τις εκάστοτε τιθέμενες απαιτήσεις, τα RANs και τα δομικά στοιχεία της 5G αρχιτεκτονικής καθώς επίσης και τα τερματικά αλλά και τις υπηρεσίες. Η αποσαφήνιση των αναγκών και των βελτιώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες λύσεις και τεχνολογίες, τελεί υπό δυναμικό καθεστώς έρευνας.

Στο πρόγραμμα 5G ESSENCE, η λύση που στοχεύει στην παροχή κάλυψης με τη χρήση μικρών κυψελών «ως υπηρεσία» (SCaaS) και με τη δυναμική ενσωμάτωσης πολλαπλών παρόχων, εμπλουτίζεται με μία μορφή αρχιτεκτονικής δύο διακριτών επιπέδων-βαθμίδων (tiers) ως εξής: Ένα πρώτο καταναμημένο (distributed) επίπεδο για την παροχή υπηρεσιών χαμηλής λανθάνουσας καθυστέρησης και ένα δεύτερο κεντροποιημένο (centralized) επίπεδο για την παροχή υψηλής επεξεργαστικής ισχύος για δικτυακές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν πολλούς υπολογισμούς. Στις περιπτώσεις χρήσης του έργου 5G ESSENCE ([178], [181]), μαζί με τη συνολική αρχιτεκτονική [240] έχουν αναπτυχθεί ορισμένες υπηρεσίες και εφαρμογές σημαντικού ενδιαφέροντος για την αγορά [241]. Αυτό, σε κάθε περίπτωση, επιδεικνύει τόσο την εγκυρότητα όσο και τις καινοτομίες του έργου.

Η λύση του 5G ESSENCE δίνει έμφαση στην εικονικοποίηση και τον καταμερισμό της χωρητικότητας των μικρών κυψελών ενώ την ίδια στιγμή υποστηρίζει ενσωματωμένες νεφοϋπολογιστικές υπηρεσίες στα άκρα του δικτύου. Στην «κορυφή» της αντίστοιχης πλατφόρμας, οι απαραίτητες λειτουργίες και υπηρεσίες «τρέχουν» ως στοιχεία λογισμικού εγκατεστημένα σε φυσικά στοιχεία. Η NFV αναγνωρίζεται ως ένα από τα «βασικά κλειδιά» των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών, με το πλαίσιο εργασίας της διαχείρισης NFV και της ενορχήστρωσης (MANO) [242].

Το πρότυπο MEC είναι μία προδιαγραφή του ETSI⁸² που χρησιμοποιείται ευρύτατα για την αποφόρτιση των φορητών συσκευών, μεταφέροντας εφαρμογές σε εικονικοποιημένη υποδομή που βρίσκεται στα άκρα του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Το πλαίσιο εργασίας του προγράμματος 5G ESSENCE συνδυάζει βασικά στοιχεία και προδιαγραφές των MEC και NFV με την εικονικοποίηση των μικρών κυψελών στα δίκτυα 5G και τα ενσωματώνει για την υποστήριξη της πολυμίσθωσης και την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και της διαθεσιμότητας υπολογιστικών πόρων στα άκρα.

⁸² Βλέπε επίσης: <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>

Η προτεινόμενη λύση επιτρέπει σε πολλαπλούς δικτυακούς διαχειριστές να παρέχουν υπηρεσίες στους χρήστες τους μέσω μιας συστάδας μικρών κυψελών που ενεργοποιούνται από το νέφος (CESCs) και η οποία ανήκει, εγκαθίσταται και διαχειρίζεται από τρίτους (π.χ. τον πάροχο CESC). Αυτή όχι μόνο επεκτείνει τα προηγούμενα πλαίσια εργασίας των NFV και MEC αλλά είναι επίσης ευθυγραμμισμένη με την οπτική μιας πλήρως ενσωματωμένης λύσης, όπου οι εφαρμογές MEC μπορούν επίσης να εγκατασταθούν και να τύχουν διαχείρισης ως VNFs (σύμφωνα με τα οριζόμενα στις προδιαγραφές του ETSI).

Η συνολική λύση του έργου που συνδυάζει τις μικρές κυψέλες, τη νεφοϋπολογιστική στα άκρα και το πλαίσιο NFV, προτάσσει μία εξαιρετική καινοτομία ανάμεσα σε άλλες που υποστηρίζει το 5G ESSENCE για τον (φέτο-)τεμαχισμό του δικτύου προκειμένου να υποστηρίξει όλες τις καθετοποιημένες αγορές. Τέτοιες καινοτομίες του πλαισίου εργασίας 5G ESSENCE επιτρέπουν τη δημιουργία δικτυακών τεμαχίων/φετών για να καλύψουν τις ανάγκες οποιασδήποτε κάθετης αγοράς, συμπεριλαμβανομένου πλήρως του ραδιομέρους του δικτύου όσο αφορά στους πόρους και στην ενσωμάτωση δικτυακής διαχείρισης με ενορχήστρωση. Για τους σκοπούς αυτούς, ενσωματωμένα εικονικά χαρακτηριστικά, προγραμματισμός και διαχείριση ραδιοπόρων, δεδομένα ορισμένα από το λογισμικό και εγκαταστάσεις επιπέδου ελέγχου, προηγμένες μετρήσεις και αναλυτικές που εμπεριέχονται στο RAN και έλεγχος από μηχανική μάθηση για προσαρμογή και βελτιστοποίηση λύσεων που έχουν συλληφθεί, έχουν αναπτυχθεί και επικαιροποιηθεί μαζί με την εκτέλεση του έργου.

Η τρέχουσα τεχνολογία στις υποδομές εικονικοποίησης των δικτυακών λειτουργιών (Network Functions Virtualization Infrastructure - NFVI) απαιτεί ενσωματώσεις για την υποστήριξη αποτελεσματικής εκτέλεσης καθώς και για τη γρήγορη ενεργοποίηση των εικονικών δικτυακών λειτουργιών για δίκτυα 5G, με στόχο την άμεση ανταπόκριση σε ενδεχόμενες δικτυακές μεταβολές.

Στην αρχιτεκτονική 5G ESSENCE οι NFVIs εκτείνονται στο κύριο DC (π.χ. είτε στο περιφερειακό είτε στο βασικό νέφος) και στο Light DC (π.χ. τοπικά νέφη) και τούτο απαιτεί λύση που θα αντιμετωπίζει τις προκλήσεις ευρείας κατανομής και ετερογένειας. Η υψηλή δυναμική που χαρακτηρίζει το συνολικό πλαίσιο, επιβάλλει την ανάγκη για ένα ένα επαρκές, καταμεμημένο και προσαρμοστικό σύστημα παρακολούθησης. Το εμπλουτισμένο σύνολο δεδομένων του έργου τροφοδοτεί μία μηχανή αναλυτικής (analytics) για να εξάγει εσωτερικά στοιχεία που θα υποστηρίζουν αποφάσεις ενορχήστρωσης και που θα ενεργοποιεί αποδοτική δέσμευση πόρων έναντι της συνολικής υποδομής [244]. Η πλατφόρμα ενορχήστρωσης του 5G ESSENCE επίσης διαχειρίζεται το χρόνο ζωής των υπηρεσιών και υποστηρίζει πλήρως τη θεώρηση του ETSI για το MANO [242], «προεκτείνοντας» σχετιζόμενες ιδέες που υιοθετούν την υψηλά καταμεμημένη και δυναμική υποδομή που χαρακτηρίζει το έργο.

Μεταξύ άλλων απαιτήσεων, είναι σημαντική η παροχή υπηρεσιών προσδιορισμού θέσης καθώς και η αποδοτικότητα των πόρων και της ενέργειας, όπως και η δυναμική και κλιμακούμενη ενορχήστρωση. Ένας ενορχηστρωτής OSM⁸³ (Open-Source MANO) είναι επικεφαλής για τη ρύθμιση των υπολογιστικών πόρων και των δικτυακών πόρων. Ο ενορχηστρωτής OSM έχει επεκταθεί και αναπτυχθεί στην κορυφή δύο σημαντικών συστατικών στοιχείων:

1. Του ελεγκτήρα SDN (OpenDaylight⁸⁴) που επιβλέπει τις ροές, τις συνδέσεις και την επικοινωνία μεταξύ VNFs (και πιθανόν άλλους πόρους).
2. Τη μηχανή ενορχήστρωσης εικονικοποιημένης υποδομής (OpenStack⁸⁵) που επιβλέπει τους υπολογιστικούς πόρους οι οποίοι εκτείνονται σε ολόκληρη τη δικτυακή και υπολογιστική υποδομή, για μία ολιστική και συνεργατική άποψη και λύση.

⁸³ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε σχετικά: <https://osm.etsi.org/>

⁸⁴ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε σχετικά: <https://www.opendaylight.org/>

⁸⁵ Το OpenStack είναι μια δωρεάν, νεφοϋπολογιστική πλατφόρμα υπό καθεστώς «ανοικτού προτύπου» (open standard). Κυρίως αναπτύσσεται ως «υποδομή ως υπηρεσία» (Infrastructure as a Service - IaaS)

Ο μείζων στόχος είναι η κάλυψη των «κάθετων» απαιτήσεων για τις οποίες έχει δημιουργηθεί ο (φετο-)τεμαχισμός του δικτύου βελτιστοποιώντας, την ίδια στιγμή, το διαθέσιμο δίκτυο και τους υπολογιστικούς πόρους ολόκληρου του συστήματος (ήτοι από άκρο σε άκρο (E2E)). Για την «κάλυψη» των διαφόρων περιπτώσεων χρήσης που θεωρούνται από το έργο, επιπρόσθετες ενσωματώσεις και καινοτομίες έχουν αναπτυχθεί μέσα στο πλαίσιο εργασίας του περιεχομένου του προγράμματος 5G ESSENCE [80].

τόσο σε δημόσια όσο και σε ιδιωτικά νέφη, όπου οι εικονικοί εξυπηρετητές και άλλοι πόροι διατίθενται στους χρήστες. Για περισσότερα στοιχεία βλέπε: <https://www.openstack.org/>

4.5. Ενσωμάτωση των Λειτουργιών “Self-x” για την Υποστήριξη Υψηλότερων Αποδόσεων

4.5.1. Ασύρματη Οπισθόζευξη και Λειτουργίες “Self-x”

Στη στοχευμένη χρήση των μικρών κυβελών και των κατάλληλων τεχνικών εικονοποίησης δικτύου για την εξυπηρέτηση πολλαπλών μισθωτών, η ασύρματη οπισθόζευξη είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Η εικονικοποίηση των δικτυακών κόμβων και των ασύρματων συνδέσεων επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός κατάλληλου ελεγκτήρα SDN ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για τις δράσεις (φετο-)τεμαχισμού του δικτύου εκεί που οι ασύρματοι πόροι οπισθοζεύξεως υπόκεινται σε μερισμό, κατά μία θεώρηση ανά επιμισθωτή. Προκειμένου να εφαρμοστούν χαρακτηριστικά τεχνολογίας SON όσο αυτά εφαρμόζονται στη στάθμη ραδιοπρόσβασης, ο ελεγκτήρας SDN είναι υπεύθυνος για τη συλλογή και την εκτίμηση της κατάστασης των πληροφοριών στάτου του δικτύου (δηλαδή ποιοτικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, στάτο των ασύρματων διεπαφών, τρέχουσα κίνηση) με αποτέλεσμα ιδιοχαρακτηριστικά (attributes) αυτο-σχεδιασμού (self-planning), αυτο-βελτιστοποίησης (self-optimization) και αυτο-ίασης (self-healing).

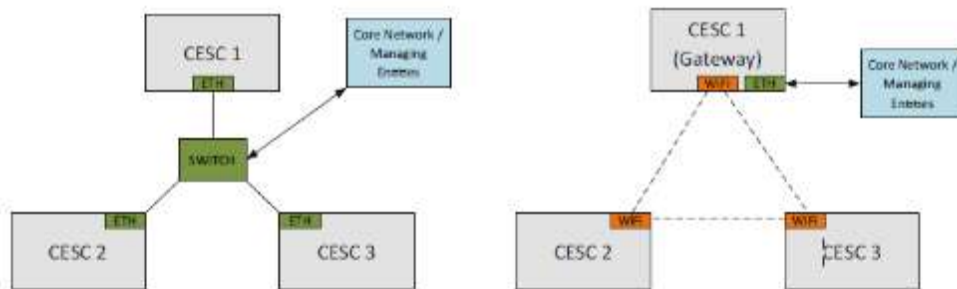
Ένα ιδιαίτερα σημαντικό συστατικό της αρχιτεκτονικής του έργου SESAME ([68], [69], [236]) είναι η οπισθοζεύξη η οποία επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των CESCs και του δικτύου πυρήνα, μεταξύ των CESCs αλλά και μεταξύ των CESCs και του στοιχείου του συστήματος διαχείρισης CESC (CESC Manager). Η κίνηση σηματοδότησης για τον έλεγχο και την παρακολούθηση των Φυσικών Λειτουργιών του Δικτύου (Physical Network Functions - PNFs) και των Εικονικών Δικτυακών Λειτουργιών (VNFs) των CESCs καθώς και η κίνηση πρόσβασης των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ του εξοπλισμού των χρηστών και του δικτύου πυρήνα, μεταφέρονται πάνω στην οπισθόζευξη. Επιπλέον οι μικρο-εξυπηρετητές (micro-servers) που διαμορφώνουν ένα Ελαφρύ Κέντρο Δεδομένων (Light DC) είναι διασυνδεδεμένοι μέσω της οπισθοζεύξεως. Στο έργο SESAME [236], αυτό είναι απαραίτητο για την παροχή χαρακτηριστικών όπως Συναλύσωση Λειτουργιών Υπηρεσιών (Service Function Chaining - SFC), που επιτρέπουν τη «συναλύσωση» των διαφορετικών υπηρεσιών των άκρων που «τρέχουν» σε διαφορετικές μηχανές.

Ένας σημαντικός υποψήφιος για τις τεχνολογίες οπισθοζεύξεως 5G είναι οι ασύρματες ραδιοεπικοινωνίες οι οποίες σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ενσύρματες (Ethernet over copper ή οπτικές ίνες) δεν απαιτούν την ανάπτυξη επιπρόσθετης υποδομής. Αντί αυτού, κάθε CESC είναι εξοπλισμένο με ένα τουλάχιστον ραδιοπομποδέκτη αποκλειστικά για την οπισθοζεύξη.

Μία συσκευή που είναι εξοπλισμένη με ασύρματους αναμεταδότες έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας όχι με μία αλλά με πολλές άλλες συσκευές μέσω της ασύρματης σύνδεσης. Επιτρέποντας σε κάθε CESC να ενεργεί ως δρομολογητής (router) μέσα στο δίκτυο, μπορεί να διαμορφωθεί ένα δίκτυο-πλέγμα.

Στο δίκτυο αυτό, μία ή περισσότερες CESCs χρειάζονται να λειτουργούν ως σημεία κόμβου εξόδου (egress points) για την ασύρματη οπισθόζευξη. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 46**, αυτές είναι υπεύθυνες για την επικοινωνία ανάμεσα στη συστάδα των CESCs και το δίκτυο πυρήνα ή με οποιεσδήποτε οντότητες διαχείρισης του CESC, όπως είναι το Σύστημα Διαχείρισης Στοιχείων (Element Management System - EMS) ή ο Διαχειριστής Λειτουργιών Εικονικού Δικτύου (Virtual Network Functions Manager - VNFM). Οι πύλες εξόδου (GWs) αποτελούν ένα

σημαντικό μέρος της οπισθοζεύξης, γιατί είναι οι μοναδικές συσκευές του δικτύου που έχουν πρόσβαση στον κορμό διαχείρισης/Διαδικτύου [117].



Εικόνα 46: Σύγκριση της Ενσύρματης Τοπολογίας Αστέρα και της Ασύρματης Τοπολογίας Πλέγματος στο Πρόγραμμα SESAME.

Στις τοπολογίες πλέγματος (mesh) η δρομολόγηση καθίσταται απαραίτητη για τη διασύνδεση μεταξύ των CESC ή καθεμίας από αυτές με μία πύλη εξόδου. Απαιτείται η γνώση της κατάστασης των ασύρματων πόρων οπισθοζεύξης. Αυτό περιλαμβάνει ποιοτικά χαρακτηριστικά της ζεύξης και στοιχεία διαθεσιμότητας της ζεύξης, που μπορούν να μεταβάλλονται στο χρόνο. Για το σκοπό αυτό, το έργο SESAME χρησιμοποιεί τεχνολογίες SDN οι οποίες παρέχουν λύσεις που ικανοποιούν τις προαναφερθείσες απαιτήσεις.

Ένας ελεγκτήρας SDN είναι αφιερωμένος στη διαχείριση του δικτύου οπισθοζεύξης και είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση της δικτυακής τοπολογίας και της εκτέλεσης κεντροποιημένων αποφάσεων δρομολόγησης στο επίπεδο δεδομένων (Data Plane - DP) και στο επίπεδο ελέγχου (Control Plane - CP). Επιπλέον, με σκοπό την εφαρμογή χαρακτηριστικών SON ([70], [71]), όπως αυτά εφαρμόζονται στο επίπεδο της ραδιοπρόσβασης, ο ελεγκτήρας SDN είναι υπεύθυνος για τη συλλογή και την εκτίμηση της κατάστασης των πληροφοριών στάτου του δικτύου (ήτοι ποιοτικά χαρακτηριστικά των ζεύξεων, κατάσταση των ασύρματων διεπαφών, τρέχουσα κίνηση). Οι συλλεγόμενες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των αλγορίθμων δρομολόγησης του ελεγκτήρα SDN, με στόχο την επίτευξη δρομολογήσεων υψηλής απόδοσης για πρόσβαση και για έλεγχο της κίνησης.

Η τοποθέτηση του ελεγκτήρα SDN γίνεται με δύο εναλλακτικούς τρόπους, ως εξής: είτε εκτελείται εσωτερικά στο LDC είτε σε μία εξωτερική μηχανή που διαχειρίζεται τις εικονικοποιημένες οπισθοζεύξεις όλων των μισθωτών (tenants). Επίσης είναι δυνατόν ένας συγκεκριμένος ελεγκτήρας SDN να εκχωρείται σε κάθε μισθωτή, ενδεχόμενο που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για το σχεδιασμό του δικτύου οπισθοζεύξης.

Η εφαρμογή του SDN απαιτεί σε συγκεκριμένο βαθμό μία αφηρημένη εικόνα του δικτύου, ήτοι: Οι ασύρματες διεπαφές που χρησιμοποιούνται από κάθε CESC παριστάνονται ως εικονικοποιημένες θύρες ενός ασύρματου εικονικού μεταγωγέα. Οι ασύρματες ραδιο-συνδέσεις μεταξύ δύο δικτυακών κόμβων αντιμετωπίζονται ως παραδοσιακές ενσύρματες συνδέσεις.

Η εικονικοποίηση των δικτυακών κόμβων και των ασύρματων ζεύξεων επιτρέπουν στον ελεγκτήρα SDN να εκτελέσει τον δικτυακό (φετο-)τεμαχισμό, εκεί που οι ασύρματοι πόροι κατανέμονται ανά μισθωτή [117].

4.5.2. Εικονικοποίηση της Οπισθόζευξης ανά Μισθωτή

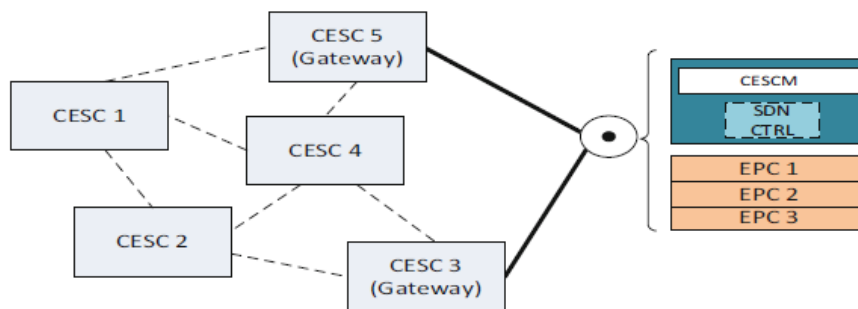
Κάθε μισθωτής (π.χ. VSCNO - Virtual Small Cell Network Operator) υπογράφει μία SLA (Service Level Agreement) που καθορίζει τον τύπο και την ποιότητα της υπηρεσίας που θα έχει στην ανάπτυξη του έργου του προγράμματος SESAME. Αυτό ουσιαστικά αναφέρεται στην ανάθεση των ασύρματων πόρων και σε μία ελάχιστη αποδοτικότητα υπηρεσίας σε κάθε μισθωτή, βασισμένη στην υπογεγραμμένη συμφωνία.

Οι SLAs επίσης επηρεάζουν την ασύρματη οπισθόζευξη, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Καθώς οι συναφείς πόροι της ασύρματης οπισθόζευξης υπόκεινται σε περιορισμούς αναφορικά με όρους ζωνικού εύρους και ενός ελάχιστου των καθυστερήσεων ανά άλμα, η εκχώρηση των πόρων σε κάθε μισθωτή πρέπει να γίνεται κατά τρόπο αποδοτικό, για να πληρούνται οι KPIs από τις αντίστοιχες SLAs.

Ο ελεγκτήρας SDN χρησιμοποιεί μία Διεπαφή Προγράμματος Εφαρμογής (Application Programming Interface - API) για την ανταλλαγή πληροφοριών που σχετίζονται με τις ενεργές SLAs και άλλα σχετικά δεδομένα με τον CESCΜ.

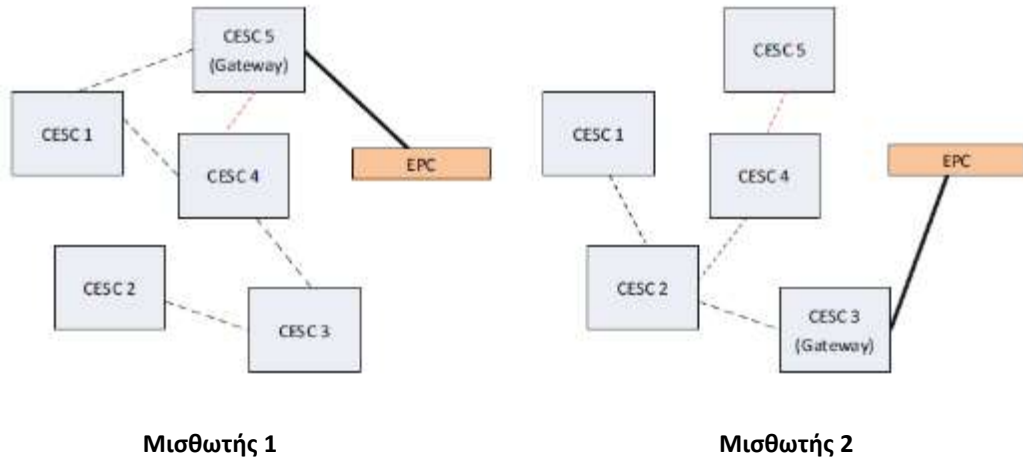
Ο ελεγκτήρας SDN βασισμένος στη γενική εικόνα του δικτύου και στη γνώση των SLAs, εκτελεί τον δικτυακό (φετο-)τεμαχισμό ([72] - [74]). Στον (φετο-)τεμαχισμό οι διαθέσιμοι πόροι οπισθοζεύξεως κατανέμονται μεταξύ των μισθωτών με σκοπό την εκπλήρωση των απαιτήσεων του κάθε μισθωτή.

Ο ελεγκτήρας SDN εικονικοποιεί τη διαθέσιμη (φυσική) τοπολογία, η οποία περιλαμβάνει τις ασύρματες ζεύξεις, τους αναμεταδότες και τις πύλες εξόδου του δικτύου οπισθοζεύξεως, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 47**.



Εικόνα 47: Παράδειγμα Τοπολογίας για μία Ανάπτυξη Υποδομής SESAME με μερικές CESCs που δρουν ως Κόμβοι Αναμεταδοτών ή Πύλες Εξόδου.

Ως αποτέλεσμα ένα υποσύνολο των διαθέσιμων εικονικοποιημένων δικτυακών στοιχείων εκχωρείται σε κάθε μισθωτή ([75] - [77]). Έτσι, κάθε μισθωτής μπορεί να έχει διαφορετικό μερίδιο του δικτύου οπισθοζεύξεως, εν αγνοία του. Περίπτωση μίας τέτοιας διαφορετικής κατανομής των εικονικοποιήσεων ανά μισθωτή παρέχεται στο παράδειγμα τοπολογίας που απεικονίζεται στην **Εικόνα 48**.



Εικόνα 48: Πιθανή Εικονικοποίηση ανά Μισθωτή, της Παραδειγματικής Τοπολογίας.

Στον κάθε μισθωτή εκχωρείται ένα διαφορετικό σύνολο ασύρματων ζεύξεων (εκτός της ζεύξης που σημειώνεται με κόκκινο) και μία διαφορετική πύλη προς το Εξελιγμένο Πακέτο Πυρήνα (Evolved Packet Core - EPC) του μισθωτή ([78], [79]). Όλες οι CESCs περιλαμβάνονται σε κάθε τοπολογία και κάθε τοπολογία περιλαμβάνει μία πύλη εξόδου που απαιτείται για την επικοινωνία της συστάδας των CESC σκαι των αντίστοιχων EPCs του μισθωτή.

Από την άλλη μεριά οι ραδιοπόροι εικονικοποιούνται στο φυσικό (ράδιο) επίπεδο. Σε αυτό περιλαμβάνεται η εικονικοποίηση του εύρους ζώνης των ασύρματων ζεύξεων σε όρους διαθέσιμων ρυθμών δεδομένων και η εικονικοποίηση του φάσματος συχνοτήτων των ζεύξεων. Ο ελεγκτήρας SDN παρακολουθεί την κατάσταση αυτών των φυσικών πόρων και εκτελεί τεμαχισμό προκειμένου να τους εκχωρήσει σε διαφορετικούς μισθωτές. Για παράδειγμα μία ασύρματη ζεύξη μπορεί να παρέχει λόγο μετάδοσης (transmission ratio) έως 1 Gbit/s. Εάν η ζεύξη χρησιμοποιείται από πολλαπλούς μισθωτές, ο διαθέσιμος ρυθμός δεδομένων πρέπει να κατανεμηθεί μεταξύ αυτών με τέτοιο τρόπο που να ικανοποιούνται οι σε εξέλιξη μεταδόσεις (π.χ. βιντεορροεύματα) και οι συμφωνηθείσες SLAs για τον εκάστοτε μισθωτή. Για να επιτευχθεί αυτό, ο ελεγκτήρας SDN χρησιμοποιεί τη γνώση της πληροφορίας που σχετίζεται με τους ασύρματους πόρους της οπισθοζεύξεως. Η γνώση αυτή είναι επίσης απαραίτητη για την εφαρμογή των χαρακτηριστικών τύπου “self-x” όπως είναι ο αυτο-σχεδιασμός (self-planning), η αυτο-βελτιστοποίηση (self-optimization) και η αυτο-ίαση (self-healing) [117].

4.5.3. Self-planning (Αυτο-Σχεδιασμός)

Ο αυτο-σχεδιασμός αφορά στην αυτοματοποιημένη λήψη απόφασης για δημιουργία νέων δικτυακών κόμβων σε συγκεκριμένες περιοχές, προσδιορίζοντας τις επαρκείς διαρθρώσεις και ρυθμίσεις των κόμβων αυτών όπως και προτάσεις για την ενίσχυση της χωρητικότητας υφιστάμενων κόμβων (π.χ. αυξάνοντας το καναλικό εύρος ζώνης και/ή προσθέτοντας νέες φέρουσες συνιστώσων). Ειδικές λειτουργίες στην εν λόγω κατηγορία περιλαμβάνουν το σχεδιασμό νέας κυψέλης και το σχεδιασμό φάσματος. Ορισμένα γενικευμένα παραδείγματα αυτο-σχεδιασμού περιλαμβάνουν και τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. **Σχεδιασμός νέας κυψέλης:** Η διαδικασία αυτή στοχεύει στην αυτοματοποίηση της απόφασης για τη δημιουργία και ανάπτυξη μίας νέας κυψέλης σε συγκεκριμένη περιοχή, προσδιορίζοντας και τη γεωγραφική της θέση.

2. **RF σχεδιασμός νέας κυψέλης:** Η διαδικασία αυτή στοχεύει στην αυτόματη επιλογή των RF χαρακτηριστικών, όπως είναι η ισχύς εκπομπής και οι παράμετροι κεραιών της νέας μικρής κυψέλης.
3. **Σχεδιασμός φάσματος:** Ο σχεδιασμός φάσματος πρέπει να αποφασίσει για τον τύπο του φάσματος που απαιτείται (π.χ. αδειοδοτούμενο, μη αδειοδοτούμενο), την απαιτούμενη ευρυζωνικότητα και την εκχώρηση του συναφούς φάσματος σε διαφορετικές μικρές κυψέλες.

Έχοντας γνώση των διαθέσιμων ασύρματων διεπαφών και των ζεύξεων του δικτύου διαπλοκής (mesh network) που δημιουργείται από τις CESC, ο ελεγκτήρας SDN μπορεί να εκχωρεί ασύρματα κανάλια στις διεπαφές για να επιβεβαιώσει μία επαρκή κατανομή φάσματος και να επαναχρησιμοποιήσει την οπισθοζεύξη κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού [120]. Στην ίδια διαδικασία, σε κάθε ενεργό μισθωτή έχει ανατεθεί ένα μέρισμα (φέτα) του δικτύου οπισθοζεύξεως.

Ωστόσο, εξαιτίας της υψηλής δυναμικότητας της κίνησης που οφείλεται στις διακυμάνσεις του αριθμού των χρηστών και στη διαφορετικότητα των σχηματομορφών στην κίνηση, είναι πιθανόν ο καταμερισμός (δικτυακή φέτα) για κάθε μισθωτή να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της δικτυακής λειτουργίας, το οποίο αποτελεί μέρος της δράσης αυτο-βελτιστοποίησης. Ο αυτο-σχεδιασμός κατά βάση εκτελείται από τον ελεγκτήρα SDN ο οποίος έχει μία γενική θεώρηση του δικτύου. Έτσι ο αυτο-σχεδιασμός μπορεί να ως θεωρηθεί ως χαρακτηριστικό τύπου κεντροποιημένου αυτο-οργανούμενου δικτύου (centralized SON - cSON).

4.5.4. Self-optimization (Αυτο-Βελτιστοποίηση)

Η αυτοβελτίωση περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών που στοχεύουν στη βελτίωση ή στη διατήρηση της αποδοτικότητας του δικτύου, στα πλαίσια της κάλυψης, της χωρητικότητας και της ποιότητας των υπηρεσιών.

Παραδείγματα λειτουργιών αυτο-βελτιστοποίησης τίθενται ως εξής:

1. **Εξισορρόπηση Φόρτου Κινητικότητας (Mobility Load Balancing - MLB):** Η περίπτωση αυτή στοχεύει στη διαχείριση φόρτου με δυναμικές μεταβολές, βελτιστοποιώντας τις δικτυακές παραμέτρους έτσι ώστε ο φόρτος από κυψέλες υψηλού φόρτου να μπορεί να μετατίθεται σε κυψέλες χαμηλού φόρτου. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με ρυθμίσεις μεταπομπής και των τιμών κατωφλίου επαναεπιλογής των κυψελών.
2. **Βελτιστοποίηση Στιβαρότητας της Κινητικότητας (Mobility Robustness Optimization - MRO):** Η περίπτωση αυτή στοχεύει στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων μεταπομπής με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αποτυχιών μεταπομπής και ανεπαρκούς αξιοποίησης των δικτυακών πόρων (π.χ. εξαιτίας αποτελεσμάτων τύπου “ring-rong”). Στα πλαίσια του έργου SESAME λαμβάνονται υπόψη οι μεταπομπές μεταξύ των μικρών κυψελών αλλά και οι μεταπομπές από/προς τις μικρές κυψέλες και τις υπόλοιπες κυψέλες ενός μισθωτή.
3. **Αυτοματοποιημένη Σχέση Γείτονα (Automated Neighbor Relation - ANR):** Η λειτουργία αυτή είναι υπεύθυνη για την αυτόματη δημιουργία του Πίνακα Γειτονικών Σχέσεων για κάθε κυψέλη. Η σωστή ταυτοποίηση των γειτονικών σχέσεων μιας κυψέλης είναι θεμελιώδης για σκοπούς κινητικότητας γιατί οι μεταπομπές μπορούν να εκτελεστούν μόνο μεταξύ γειτονικών κυψελών.
4. **Βελτιστοποίηση Κάλυψης και Χωρητικότητας (Coverage and Capacity Optimization - CCO):** Η λειτουργικότητα αυτή στοχεύει στην παροχή βέλτιστης κάλυψης και

χωρητικότητας σε ραδιοδίκτυα (Radio Networks - RNs). Αυτό επιτυγχάνεται με την προσαρμογή RF παραμέτρων των μικρών κυψελών (δηλαδή ισχύς εκπομπής, γωνία κλίσης κεραίας, αζιμούθιο κεραίας, κτλ.) σύμφωνα με συγκεκριμένους στόχους βελτιστοποίησης και επιδιώκοντας την αποφυγή κενών στην κάλυψη, ασθενών περιοχών κάλυψης, πιλοτική ρύπανση, υπέρβαση κάλυψης και αναντιστοιχία (κακή προσαρμογή) καναλικής κάλυψης για καταφόρτωση (DL) και αναφόρτωση (UL).

5. **Βελτιστοποίηση παραμέτρων ελέγχου εισδοχής (admission control) / ελέγχου συμφόρησης (congestion control) / χρονοπρογραμματισμού πακέτων (packet scheduling):** Αυτή η λειτουργικότητα στοχεύει στην βελτιστοποίηση διαφορετικών RRM παραμέτρων όπως είναι τα κατώφλια εισδοχής/συμφόρησης, οι προτεραιότητες των τάξεων ποιότητας των υπηρεσιών, κ.τ.λ.
6. **Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών (Inter-Cell Interference Coordination - ICIC):** Η λειτουργικότητα αυτή στοχεύει στη διάρθρωση της ισχύος, του χρόνου και των πόρων συχνοτήτων με έναν συντονισμένο τρόπο μεταξύ διαφορετικών κυψελών ώστε οι εσωτερικές παρεμβολές των κυψελών να ελαχιστοποιηθούν. Η προσαρμογή γίνεται με έναν σχετικά αργό ρυθμό.
7. **Εξοικονόμηση Ενέργειας (Energy Saving):** Η περίπτωση αυτή στοχεύει στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσα στο αναπτυγμένο δίκτυο. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται απενεργοποιώντας τις κυψέλες που μεταφέρουν πολύ μικρό φόρτο σε συγκεκριμένες περιόδους μέσα στην ημέρα και κάνοντας τις απαραίτητες προσαρμογές στις γειτονικές κυψέλες.

4.5.5. Self-healing (Αυτο-ΐαση)

Σχετίζεται με την αυτοματοποίηση των διαδικασιών που διαχειρίζονται τη διαχείριση σφαλμάτων (δηλαδή ανίχνευση σφαλμάτων, διάγνωση, αντιστάθμιση και διόρθωση) που συχνά συσχετίζονται με προβλήματα υλισμικού ή/και λογισμικού, με σκοπό τη διατήρηση της λειτουργικότητας του δικτύου καθώς αναμένεται μία μόνιμη λύση που θα το επιδιορθώσει και που θα εμποδίσει την εμφάνιση προβλημάτων ρήξης.

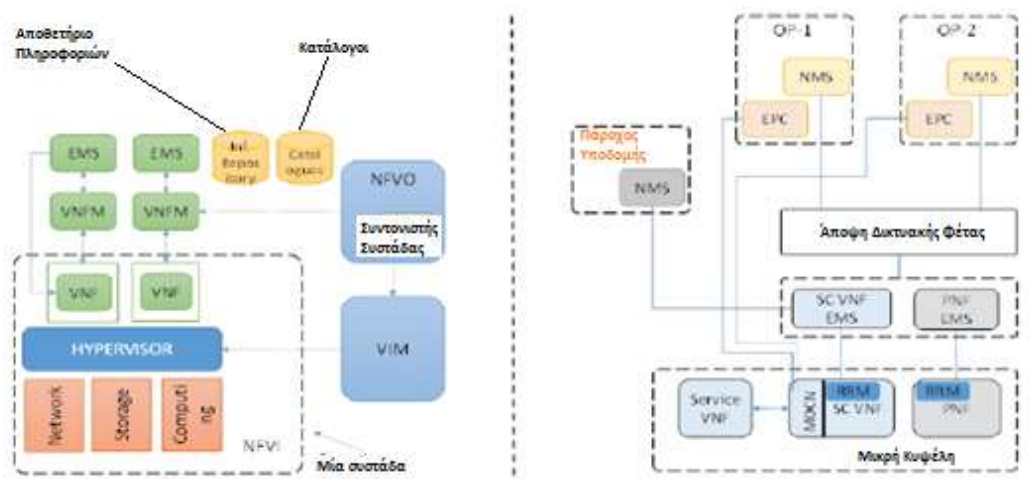
Παραδείγματα λειτουργιών αυτοΐασης:

1. **Ανίχνευση Χρόνου Διακοπής (Λειτουργίας) Κυψέλης (Cell Outage Detection - COD):** Περιλαμβάνει την ανίχνευση κυψελών χαμηλής απόδοσης που συνήθως οφείλεται σε σφάλματα υλισμικού ή/και λογισμικού (π.χ. βλάβες συνδετικότητας, βλάβες ραδιοπίνακα, βλάβες στην τροφοδοσία, κτλ.).
2. **Αντιστάθμιση Χρόνου Διακοπής (Λειτουργίας) Κυψέλης (Cell Outage Compensation - COC):** Αναφέρεται σε ενέργειες για επίλυση ή εξομάλυνση του χρόνου διακοπής (λειτουργίας) που ανιχνεύεται σε μία κυψέλη, ενεργώντας συνήθως πάνω σε γειτονικές κυψέλες, με σκοπό την εξυπηρέτηση της κίνησης με χρόνο διακοπής.

4.6. Κύρια Καινοτόμα Χαρακτηριστικά της Αρχιτεκτονικής του Έργου SESAME

Τα καινοτόμα στοιχεία που προτείνει η αρχιτεκτονική του έργου SESAME επικεντρώνονται στην εικονικοποίηση των δικτύων μικρών κυψελών αξιοποιώντας τα παραδείγματα ενός πλαισίου ενεργοποίησης πολλαπλών μισθωτών (πολυμίσθωση - multitenancy) που συνδυάζεται με ένα, βασισμένο στα άκρα, εικονικοποιημένο περιβάλλον εκτέλεσης. Το SESAME εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής των δύο αυτών αρχών και «προωθεί» την υιοθέτηση της πολυμίσθωσης μικρών κυψελών – για παράδειγμα *πολλαπλοί πάροχοι θα μπορούν να χρησιμοποιούν την πλατφόρμα SESAME χρησιμοποιώντας ο καθένας τους τη δική του δικτυακή «φέτα»*. Εξάλλου η βασική ιδέα είναι να «προωθείται» η ανάπτυξη των μικρών κυψελών με κάποιες εικονικοποιημένες εφαρμογές, όπου κάθε μικρή κυψέλη εμπεριέχει έναν μικρο-εξυπηρετητή μέσω κατάλληλης τεχνολογίας πρόσθιας ζεύξης. Ένας μικρο-εξυπηρετητής είναι βασισμένος σε αρχιτεκτονική non-x86⁸⁶ χρησιμοποιώντας τεχνολογία 64-bit ARM. Μαζί με την μικρή κυψέλη διαμορφώνουν την Cloud- Enabled Small Cell (CESC), ενώ ένας αριθμός από CESCσ σχηματίζει μία συστάδα CESC (CESC cluster) ικανή να παρέχει πρόσβαση σε μία γεωγραφική περιοχή με έναν ή περισσότερους παρόχους.

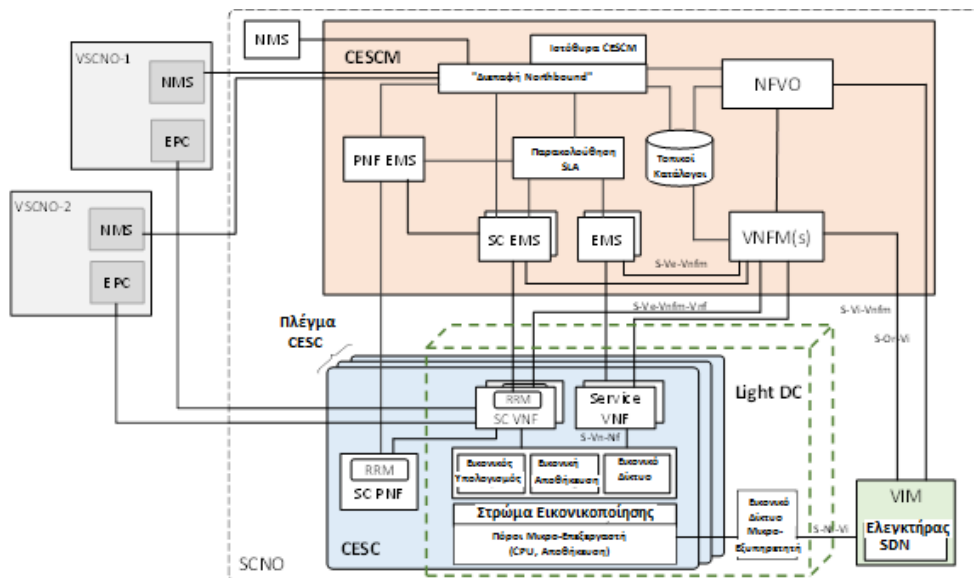
Σε μία σύντομη περιγραφή εικονογραφούνται τα δύο βασικά τεχνολογικά πεδία που απαρτίζουν τα κεντρικά καινοτόμα πεδία του πλαισίου λειτουργίας του SESAME. Αυτός ο στοχευμένος τρόπος της «αποσύνθεσης» έχει αποτελέσει το «ενακτήριο σημείο» κατασκευής ενός ακριβούς πλαισίου λειτουργίας για την επιθυμητή αρχιτεκτονική του SESAME. Η τεχνολογία NFV χρησιμοποιείται ως ένας θεμελιώδης ενεργοποιητής που θα παρέχει μία εικονικοποιημένη πλατφόρμα και θα ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του SESAME, δηλαδή στις NFV λειτουργίες των μικρών κυψελών και στις NFV δικτυακές υπηρεσίες. Στην αριστερή μεριά της **Εικόνας 49** απεικονίζεται το πλαίσιο λειτουργίας Management and Orchestration (MANO) για το κομμάτι του NFV [41].



Εικόνα 49: Πεδίο των Δομικών Στοιχείων του Έργου SESAME (φυσική άποψη).

⁸⁶ Η x86 είναι μία οικογένεια συνόλου αρχιτεκτονικών που Βσιζεται στην CPU Intel 8086 και στη μεταβλητή της (variant) Intel 8088. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://en.wikipedia.org/wiki/X86>.

Στο δεξί μέρος της **Εικόνας 49**, απεικονίζεται ένα δίκτυο μικρών κυψελών ικανό να υποστηρίξει περισσότερους του ενός παρόχους. Οι σχετικές προδιαγραφές του φορέα 3GPP έχουν ήδη προσθέσει κάποια υποστήριξη για κοινόχρηστη ασύρματη δικτυακή ραδιοπρόσβαση (Radio Access Network - RAN) [47]. Αν και δύο βασικές αρχιτεκτονικές έχουν ταυτοποιηθεί, δηλαδή η τεχνολογία του *Δικτύου Πυρήνα Πολλαπλών Παρόχων (Multi-Operator Core Network - MOCN)*, όπου η κοινόχρηστη δικτυακή ραδιοπρόσβαση RAN είναι απευθείας συνδεδεμένη με την κεντρική δικτυακή υποδομή του κάθε παρόχου και η τεχνολογία του *Δικτύου Πύλης Πυρήνα (Gateway Core Network - GWCN)*, όπου ένα κοινόχρηστο δίκτυο πυρήνα έχει αναπτυχθεί με σκοπό τη διασύνδεση των δικτύων πυρήνα των πολλαπλών παρόχων, η περίπτωση MOCN έχει αναγνωριστεί ως ο αποκλειστικός ενεργοποιητής για χαρακτηριστικά πολυμίσθωσης στην πλατφόρμα του έργου SESAME. Η σχετική υποδομή απαρτίζεται από έναν αριθμό μικρών κυψελών και τις αντίστοιχες δικτυακές λειτουργίες μικρών κυψελών όπως πύλες και συστήματα διαχείρισης. Η υιοθετημένη αρχιτεκτονική είναι βασισμένη στο πλαίσιο λειτουργίας 3GPP για δικτυακή διαχείριση σε σενάρια κοινόχρηστης δικτυακής ραδιοπρόσβασης ([48], [49]). Δεδομένης της τεχνολογίας LTE (Long Term Evolution) ως το βασικό σχετικό πλαίσιο λειτουργίας, η διασύνδεση των μικρών κυψελών του παρόχου SCaaS στο Evolved Packet Core του μισθωτή γίνεται μέσω της *διεπαφής S1*, μεταφέροντας λειτουργίες σε επίπεδο δεδομένων (π.χ., μεταφορά της κίνησης των τελικών χρηστών) και σε επίπεδο ελέγχου (π.χ., ενεργοποίηση των ραδιο-κομιστών).



Εικόνα 50: Συνολική Αρχιτεκτονική του Έργου SESAME.

Στην **Εικόνα 50** απεικονίζεται μία γενική θεώρηση του συστήματος SESAME σύμφωνα με τις αρχιτεκτονικές αρχές και τις προαναφερόμενες απαιτούμενες λειτουργίες. Η CESC παρέχει πόρους υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και ραδιοπόρους. Μέσω της εικονικοποίησης, η συστάδα των CESC μπορεί να θεωρηθεί ως ένα νέφος πόρων που μπορούν να «τεμαχιστούν» για να ενεργοποιηθεί η πολυμίσθωση. Συνεπώς, η συστάδα των CESC μετατρέπεται σε φυσικό χώρο φιλοξενίας για παρόχους κινητών δικτύων μικρών κυψελών (mobile Small Cell Network Operators – mSCNOs) ή εικονικούς SCNOs (Virtual SCNO - VSCNOs) που επιθυμούν να μοιράζονται την τεχνολογία των πληροφοριών (IT) και τους δικτυακούς πόρους στα άκρα του δικτύου της κινητής τηλεφωνίας. Επιπρόσθετα, οι υπολογιστικοί πόροι που είναι βασισμένοι στο νέφος μπορούν να παρασχεθούν μέσω μίας εικονικοποιημένης πλατφόρμας εκτέλεσης. Αυτή η πλατφόρμα εκτέλεσης χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει τις εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες (VNFs) που υλοποιούν τις διαφορετικές δυνατότητες/χαρακτηριστικά

των μικρών κυβελών (και τελικά ολόκληρο το δίκτυο πυρήνα), τη γνωστική διαχείριση και τις “self-x” λειτουργίες [50] (για παράδειγμα, αυτο-προγραμματισμό, αυτο-βελτιστοποίηση και αυτο-ίαση), καθώς και την υπολογιστική υποστήριξη προς τις εφαρμογές που τρέχουν στα άκρα των κινητών συσκευών των τελικών χρηστών.

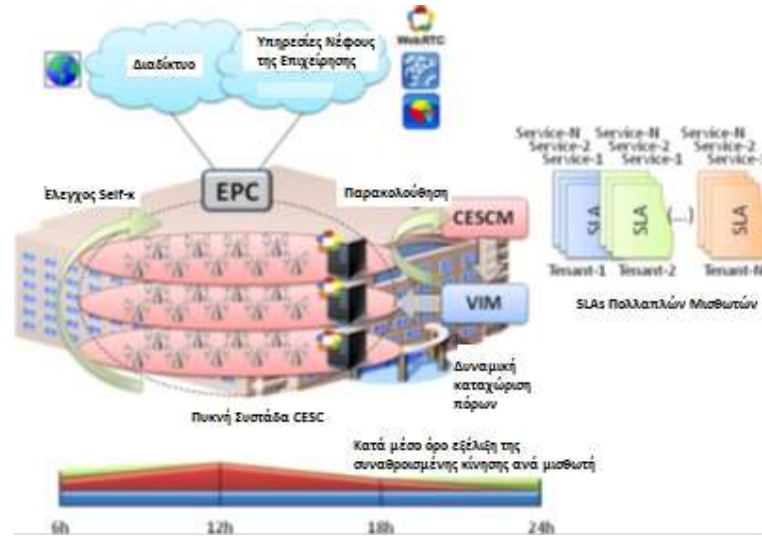
Η ομαδοποίηση των CESCs συντελεί στην επίτευξη μίας μικρο-κλιμακοθετήσιμης εικονικοποιημένης υποδομής εκτέλεσης στη μορφή ενός κατανεμημένου κέντρου δεδομένων (για παράδειγμα το Light Data DC), βελτιώνοντας τις εικονικοποιημένες δυνατότητες και την ισχύ επεξεργασίας στα άκρα του δικτύου. Οι δικτυακές υπηρεσίες (Network Services - NSs) εξυπηρετούνται από εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες (VNFs) που φιλοξενούνται στο Light DC – αποτελούμενο από μία ή περισσότερες CESCs – αξιοποιώντας λειτουργικότητες SDN και NFV που καθιστούν εφικτό ένα ικανοποιητικό επίπεδο προσαρμοστικότητας και επεκτασιμότητας στα άκρα της υποδομής του νέφους. Πιο συγκεκριμένα, οι εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες (VNFs) εκτελούνται ως Εικονικές Μηχανές (Virtual Machines - VMs) στο εσωτερικό του Light DC, οι οποίες παρέχονται με έναν επόπτη (hypervisor), μία Εικονική Μηχανή βασισμένη στον Πυρήνα (Kernel-based Virtual Machine - KVM) ειδικά επεκταμένη για να υποστηρίζει αξιόπιστα πολυδοκιμασμένα υπολογιστικά συστήματα και δικτυακή αποδοτικότητα.

Στο παρεχόμενο εικονικοποιημένο περιβάλλον εκτέλεσης (δηλαδή στο Light DC), είναι δυνατόν να επιτυγχάνεται αλύσωση διαφόρων VNFs για να ικανοποιείται μία απαίτηση αιτούμενης δικτυακής υπηρεσίας (Network Service - NS) από έναν μισθωτή (δηλαδή έναν κινητό πάροχο). Σύμφωνα με το SESAME μία δικτυακή υπηρεσία είναι μία «συλλογή» από VNFs που συνδυαστικά υποστηρίζουν εκπομπή δεδομένων μεταξύ Εξοπλισμού Χρήστη (UE) και το EPC. Γι’αυτό το λόγο, κάθε δικτυακή υπηρεσία υλοποιείται από μία αλυσίδα SC VNFs και VNFs Υπηρεσίας.

Τελικά, ο διαχειριστής CESC (CESCM) είναι το συστατικό κεντρικής διαχείρισης υπηρεσιών και ενορχήστρωσης, στον συνολικό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Γενικά, ενσωματώνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία δικτυακής διαχείρισης, όπως παραδοσιακά προτείνονται στο πλαίσιο των δράσεων του 3GPP, και τις καινοτόμες συνιστώμενες λειτουργικές πλοκάδες (blocks) του NFV MANO [51]. Μία απλή υπόσταση του CESCM είναι ικανή να λειτουργεί πάνω σε διάφορες συστάδες CESC, με κάθε μία από αυτές να συνιστά ένα Light DC, δια της χρήσης αποκλειστικών Εικονικών Διαχειριστών Υποδομής ανά συστάδα. Όσον αφορά στις διεπαφές, πρέπει να σημειωθεί ότι η **Εικόνα 50** κυρίως απεικονίζει σημεία αναφοράς – τα οποία ενδέχεται να περιέχουν μία ή περισσότερες ενεργές διεπαφές – μεταξύ αρχιτεκτονικών στρωμάτων. Κάθε ετικέτα σημείου αναφοράς ξεκινά με “S-” ώστε να διαφοροποιείται από διεπαφές που ορίζονται στα έγγραφα ETSI NFV ISG (και ιδίως για τις περιπτώσεις των διεπαφών Vi-Vnfm, Or-Vi, Ve-Vnfm, Nf-Vi) αν και σε ορισμένες περιπτώσεις η λειτουργικότητα του σημείου αναφοράς θα είναι σχεδόν «ευθυγραμμισμένη» με τους πραγματικούς ορισμούς κατά το ETSI [41].

4.6.1. Σενάριο 1: Υπηρεσίες Επιχειρήσεων σε Πολυμισθωμένα Μεγάλα Εργασιακά Κέντρα

Ένα **τυπικό σενάριο** στο οποίο το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο, εικονογραφείται στην **Εικόνα 51**.



Εικόνα 51: Προτεινόμενο Σύστημα για Πολυμισθωμένες Επιχειρηματικές Υπηρεσίες.

Η εικόνα απεικονίζει μια κατάσταση ενός παρόχου CESC, ο οποίος κατέχει, αναπτύσσει και συντηρεί τη δικτυακή υποδομή μικρών κυψελών και ενός «Ελαφρού» Κέντρου Δεδομένων (Light Data Centre) (π.χ. σύνολο από micro-servers) εντός των χώρων, όπου φιλοξενούνται διαφορετικές επιχειρήσεις.

Σε αυτή την περίπτωση, ο πάροχος CESC θα υλοποιήσει μία Συμφωνία Στάθμης Διάθεσης Υπηρεσιών (Service Level Agreement - SLA) με κάθε εταιρικό πελάτη/επιχείρηση ώστε να επιτρέψει στους εταιρικούς χρήστες την πρόσβαση σε διαφορετικές υπηρεσίες (συμπεριλαμβανομένης της διαδικτυακής πρόσβασης, των φωνητικών επικοινωνιών, των βιντεοδιασκέψεων, της πρόσβασης στο σύστημα ηλεκτρονικών μηνυμάτων και σε αποθετήρια, της περιήγησης στον παγκόσμιο ιστό και σε ανοιχτές και κλειστές ομάδες συνδρομητών με ενσωματωμένα πιστοποιητικά υψηλής ασφάλειας).

Η χρήση των μ-Servers (μSs ή micro-servers)⁸⁷ μπορεί να μειώσει αισθητά την καθυστέρηση του δικτύου, με σαφή οφέλη για βελτιωμένη ποιότητα της εμπειρίας (QoE) σε ροές μέσων. Αυτό γίνεται με απόκρυψη περιεχομένου στη στάθμη του Light DC ή αποθηκεύοντας περιεχόμενο σε μSs διαφορετικών περιοχών. Σημαντικός παράγοντας για τα μεγάλα επιχειρησιακά κέντρα είναι οι διακυμάνσεις της κίνησης δεδομένων ανάλογα με την ώρα της ημέρας και τυχόν εκδηλώσεις που λαμβάνουν χώρα και απαιτούν ευέλικτα συστήματα για την εξυπηρέτηση των αναγκών.

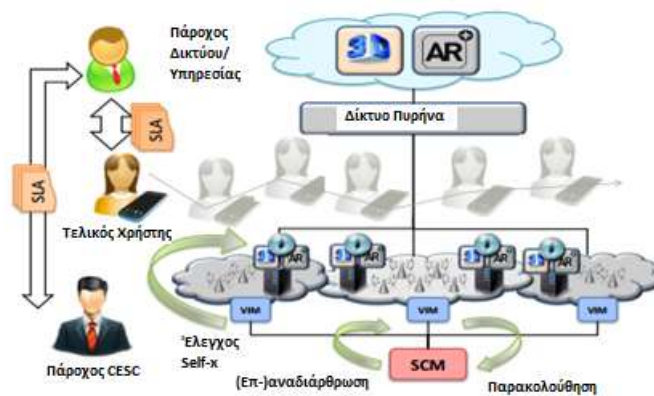
Η χρήση του SESAME στο επιχειρησιακό σενάριο και η δυνατότητα πολυμίσθωσης επιτρέπει στους παρόχους μικρών κυψελών να προσφέρουν δικτυακές υπηρεσίες και συνδεσιμότητα πάνω από το δίκτυο πυρήνα του παρόχου υποδομών. Οι αυτοματισμοί του δικτύου για τη ρύθμιση, διαχείριση, βελτιστοποίηση και διόρθωση θα επιφέρουν βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες [74].

⁸⁷ μ-Servers (μSs ή micro-servers): διακομιστές μικρού μεγέθους βασισμένοι σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με μικρή επεξεργαστική ισχύ.

4.6.2. Σενάριο 2: Βελτιωμένη Εξυπηρέτηση «Εν Κινήσει»

Στο σενάριο αυτό, ένας πάροχος CESC διαχειρίζεται **τρεις καταναμημένες συστάδες CESC** αναπτυγμένες σε γεωγραφικά γειτονικές περιοχές και υποστηρίζει έναν μόνο πάροχο δικτύου κινητής τηλεφωνίας, ο οποίος παρέχει υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες μέσω των υποδομών CESC. Οι σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων ρυθμίζεται από διαφορετικά SLAs που συντάσσονται μεταξύ του παρόχου CESC και του παρόχου υπηρεσιών και μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών και των τελικών χρηστών του.

Οι βασικοί «παίκτες» και οι αλληλεπιδράσεις αυτού του σεναρίου ενδεικτικά απεικονίζονται στην παρακάτω **Εικόνα 52**.



Εικόνα 52: Εμπειρία Βελτιωμένης Υπηρεσίας «Εν Κινήσει».

Με σκοπό την επίδειξη διαφορετικών δυνατοτήτων σε αυτή την εγκατάσταση, η κινητικότητα του τελικού χρήστη λαμβάνεται υπόψη στις απαιτήσεις για συνεχή και ποιοτική υπηρεσία καθώς ο χρήστης μετακινείται (με μεταπομπή) σε διαφορετικές συστάδες από CESC. Ο τύπος της κίνησης που γεννάται από τον χρήστη θεωρείται ότι είναι περιεχόμενο υψηλής ευκρίνειας, που μεταδίδεται σε πραγματικό χρόνο και απαιτεί χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση.

Η χρήση του παραδείγματος MEC (Mobile Edge Computing) που υλοποιείται στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική με στοιχεία υλισμικού και λογισμικού που «τρέχουν» στα άκρα του δικτύου και στην εγγύτητα του κινούμενου χρήστη, επιτρέπει την επαρκή παρακολούθηση της θέσης του χρήστη σε πραγματικό χρόνο με αναφορά RT και την έναρξη συντονιστικών ενεργειών με σχεδόν μηδενική καθυστέρηση.

Η διαχείριση της φορητότητας των τελικών χρηστών είναι μία συνέπεια των αυτο-οργανούμενων δικτύων (SON - Self-Organized Networks) κάνοντας χρήση των δυνατοτήτων παρακολούθησης στα άκρα για να εξασφαλίσουν την ομαλή μετάδοση μεταξύ γειτονικών κυψελών. Η αυξημένη ποιότητα που λαμβάνει ο τελικός χρήστης επιτυγχάνεται περιορίζοντας τις διαδικασίες εντός της CESC, εφαρμόζοντας γρήγορα πολιτικές για την επαύξηση της ποιότητας και λαμβάνοντας υπόψη τις SLAs που πρέπει να ικανοποιηθούν.

Σε σχέση με την κίνηση των χρηστών, το σενάριο εστιάζεται στον τρόπο με τον οποίο κρυφές μνήμες χαμηλής λανθάνουσας καθυστέρησης στα άκρα του δικτύου μπορούν να αναπτύσσονται μεταξύ των εγκαταστάσεων των CESC ώστε να επιτρέπεται στον τελικό χρήστη αδιάλειπτη πρόσβαση σε περιεχόμενο. Η πρόβλεψη της πιθανής μετάβασης του χρήστη, από

την παρακολούθηση των σημάτων, συνδυασμένη με την παροχή δεδομένων στις κρυφές μνήμες μπορεί να αποφορτίσει τις τελικές συσκευές από την ανάγκη αποθήκευσης δεδομένων τοπικά [74].

4.6.3. Σενάριο 3: Παροχή Υπηρεσίας σε Απρόσμενα Συμβάντα

Ένα άλλο σενάριο του προτεινόμενου, από το πρόγραμμα *SESAME*, συστήματος, απεικονίζεται στην **Εικόνα 53**, όπου η ξαφνική συγκέντρωση ανθρώπων σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και χρονική στιγμή, δημιουργεί ένα αναπάντεχο σημείο επαυξημένης ζήτησης (“hot spot”) στο οποίο η ποικιλία των διαφορετικών τύπων κίνησης απαιτεί κατάλληλη διαχείριση, *κατά περίπτωση*. Η ξαφνική συγκέντρωση πλήθους μπορεί να οφείλεται σε μη αναμενόμενα ζωντανά γεγονότα ή/και σε επείγουσες καταστάσεις.

Αυτό το σενάριο είναι σχετικό με την αξιοποίηση των πόρων των συστάδων CESC, που βασικά συνιστούν μία συλλογή από CESC (π.χ. μικρές κυψέλες με τους δικούς τους μικρο-εξυπηρετητές). Επιπλέον, το σενάριο δείχνει το πώς η πολυμίσθωση μπορεί να θεωρηθεί ως μια «ενσωματωμένη» (“built-in”) λειτουργία του συστήματος. Αρχικά η υποδομή CESC, αναπτυσσόμενη από έναν πάροχο υποδομών, θα υποστηρίζει διαφορετικούς παρόχους κινητής τηλεφωνίας για την εξυπηρέτηση των πελατών της. Σε μια τέτοια κατάσταση, οι πόροι των συστάδων CESC πρέπει να παρέχονται προς κάθε μισθωτή και, προκειμένου να είναι επαρκώς διαχειρίσιμη η αναπάντεχη (και σημαντική) αύξηση της κίνησης των χρηστών, είναι απαιτούμενες οι αυτο-οργανούμενες δικτυακές τεχνικές. Στην αρχή, ο CESC θα διεφάπτεται με έναν πάροχο υπηρεσιών OSS (Operations Support System) / BSS (Business Support System)⁸⁸ για την ανάκτηση των παραμέτρων διάρθρωσης του μισθωτή. Ακολούθως, οι επικοινωνίες και η QoS τυχάνουν υποστήριξης στο επίπεδο της CESC.

⁸⁸ Ο όρος OSS/BSS στις τηλεπικοινωνίες αναφέρεται σε συστήματα υποστήριξης των λειτουργιών και σε συστήματα υποστήριξης των επιχειρηματικών δράσεων. Η διαφορά έγκειται στο διαχωρισμό των εννοιών μεταξύ της διατήρησης των λειτουργιών του δικτύου και των επιχειρηματικών δράσεων γύρω από τις οποίες δομείται ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Οι πάροχοι υπηρεσιών επικοινωνιών υποστηρίζουν ένα εκτενές εύρος υπηρεσιών και λειτουργιών με τα αντίστοιχα ευρισκόμενα σε λειτουργία OSS/BSS. Ο όρος BSS πρωτίστως αφορά στη διαχείριση των σχέσεων με τους πελάτες και στην πολιτική χρεώσεων ενώ ο όρος OSS αφορά σε διαχείριση διατάξεων, σε διαχείριση δικτυακών αποθεμάτων και στις δικτυακές λειτουργίες. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, *μεταξύ άλλων*: <https://en.wikipedia.org/wiki/OSS/BSS>.

Σενάρια Χρήσης Μικρών Κυμαλών για την Ανάπτυξη Εφαρμογών του 5G



Εικόνα 53: Προτεινόμενο Σύστημα για Απρόσμενα Συμβάντα

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι αυτό το σενάριο «δομείται» πάνω στην δυνατότητα του συστήματος για υπολογιστική στα άκρα καθώς εντατικές υπολογιστικές διεργασίες μπορούν να μεταφορτωθούν από τους κινητούς τερματικούς σταθμούς προς τους mSs , ενώ την ίδια στιγμή να βελτιστοποιείται η χρήση των πόρων οπισθόζευξης.

Οι δύο βασικοί τύποι κίνησης που απαιτούν υποστήριξη και βελτιστοποίηση από τις συστάδες των CESCs είναι τα βίντεο πραγματικού χρόνου (π.χ. κινηματογραφήσεις χρηστών και ανάρτηση περιεχομένου βίντεο σε μέσα κοινωνικής δικτύωσης) και οι επικοινωνίες ομάδων σε πραγματικό χρόνο (π.χ. μικρή κοινότητα χρηστών που ανταλλάσσουν αρχεία ή βίντεο). Έλεγχος πακέτων σε βάθος, διακωδικοποίηση βίντεο (video transcoding) και ανάλυση δεδομένων μπορούν να ενεργοποιηθούν στις συστάδες των CESCs, μέσω επιταχυντών υλισμικού (hardware accelerators), με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της κίνησης από/προς τις CESCs. [74]

❖ Συμπερασματική Επισκόπηση

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά στη μελέτη:

Της αναγκαιότητας των μικρών κυψελών στην εποχή του 5G, των κατηγοριών σεναρίων που επηρεάζουν την παροχή υπηρεσιών, στην ταυτοποίηση και στην ταξινόμηση περιπτώσεων χρήσης καθώς και των τυπικών σεναρίων ανάπτυξης μικρών κυψελών, των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάπτυξη των μικρών κυψελών και των απαιτούμενων υποστηρικτικών τεχνολογιών για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G (Κεφάλαιο 1).

Της χρήσης των μετακινούμενων μικρών κυψελών ως μία «καινοτόμο λύση» στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, για δικτυακές υπηρεσίες «εν κινήσει». Οι μετακινούμενες μικρές κυψέλες συγκροτούν ένα δίκτυο «προσανατολισμένο στην υπηρεσία του χρήστη», το οποίο εγκαθιδρύει επικοινωνία εξασφαλίζοντας την προσβαση στο δίκτυο. Γειτονικές μετακινούμενες μικρές κυψέλες μπορούν να λειτουργούν ως αναμεταδότες και κατά συνέπεια να παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες σε χρήστες που βρίσκονται εκτός δικτυακής κάλυψης. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική και ιδίως αποτελεσματική όταν εφαρμόζονται σε Δίκτυα Δημόσιας Ασφάλειας. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όπου δεν υπάρχει επαρκής δικτυακή κάλυψη, οι μετακινούμενες μικρές κυψέλες έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν τα απαραίτητα πληροφοριακά σήματα με υψηλή ισχύ εκπομπής και να χειριστούν ταυτόχρονα πολλαπλές συνδέσεις χρηστών, με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την κίνηση (Κεφάλαιο 2).

Της χρήσης των μικρών κυψελών στην τεχνολογία 5G που συνδέει όλων των ειδών τις συσκευές (επίσης με κάλυψη φορατών συσκευών και πολυάριθμων αισθητήρων του Διαδικτύου των Πραγμάτων). Η σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών και αισθητήρων μέσω του Διαδικτύου δημιουργεί τεράστιο διακινούμενο όγκο δεδομένων και η χρήση μικρών κυψελών εξασφαλίζει στους παρόχους αξιόπιστες συνδέσεις, με μεγάλη ακεραιότητα σήματος, σημαντική ευρυζωνικότητα και χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση. Οι τεχνολογίες των μικρών κυψελών έχουν την ικανότητα να αυξήσουν τη δικτυακή διείσδυση χωρίς «συμβιβαστικές» ταχύτητες δεδομένων ή «υπερβάλλουσα» χρήση ενέργειας για συσκευές και εξοπλισμό. Οι μικρές κυψέλες επεκτείνουν την περιοχή κάλυψης του δικτύου, μειώνουν την καθυστέρηση, εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες και διασφαλίζουν υψηλές αποδόσεις.

Της χρήσης των φεμτο-μικρών κυψελών ως μία λύση «αποφόρτισης» των υπερφορτωμένων μακρο-κυψελών, διεύρυνσης της περιοχής κάλυψης – κατά βάση σε εσωτερικούς χώρους – καθώς και ενίσχυσης της χωρητικότητας. Οι φεμτο- μικρές κυψέλες ουσιαστικά συνιστούν έναν κυψελοειδή σταθμό βάσης χαμηλού κόστους και με μικρό ενεργειακό αποτύπωμα, ο οποίος παρέχει διεπαφή ραδιοπρόσβασης στους χρήστες, βελτιωμένη κάλυψη και ισχυρότερο σήμα λόγω εγγύτητας προς αυτούς. Οι φεμτο- μικρές κυψέλες μπορούν να εφαρμοστούν σε εξωτερικούς χώρους αντικαθιστώντας τη δορυφορική σύνδεση ή/και τη σύνδεση με τις μακρο-κυψέλες.

Της χρήσης των μικρών κυψελών στον τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) ο οποίος, μεταξύ άλλων, αλλάζει ριζικά το πεδίο των συγκοινωνιακών μέσων και της εφοδιαστικής αλυσίδας, μετατρέπει μία κατοικία σε «έξυπνο» σπίτι και επίσης προσφέρει σε γραφεία και εμπορικές τοποθεσίες τη δυνατότητα εξ αποστάσεως παρακολούθησης και ελέγχου. Στον τομέα της υγείας η ικανότητα του IoT να ανιχνεύει, να αναγνωρίζει και να επικοινωνεί, επιτρέπει την παρακολούθηση όλων των «αντικειμένων» που σχετίζονται με τις αντίστοιχες εφαρμογές. Υπό αυτό το πρίσμα, η εργασία αναφέρεται στον σπουδαίο ρόλο που θα διαδραματίσει το δίκτυο των μικρών κυψελών για την επιτυχή εφαρμογή των κινητών

υπηρεσιών υγείας, η οποία στηρίζεται στην ιδέα της «πρόσβασης οπουδήποτε και οποτεδήποτε». Η ιδέα της εξ αποστάσεως προ-νοσοκομειακής περίθαλψης είναι αναπόσπαστο συστατικό των κινητών συστημάτων υγείας. Οι επαγγελματίες υγείας, με τη χρήση των μικρών κυψελών, μπορούν να λαμβάνουν πληροφορίες από μακρινούς χώρους λόγω της διασφαλισμένης και αδιάλειπτης συνδεσιμότητας, της βελτιωμένης δικτυακής κάλυψης και της σημαντικής αύξησης της ταχύτητας.

Περιπτώσεων χρήσης στην κατασκευαστική βιομηχανία όπως π.χ. αυτόνομα και εξ αποστάσεως ελεγχόμενα μηχανήματα στα εργοτάξια, ασφάλεια και υγεία στα εργοτάξια, διαχείριση διαδικασιών κατασκευών και διαχείριση εκπομπών και αποβλήτων.

Περιπτώσεων χρήσης όπου τα γεγονότα είναι απρόσμενα και απαιτείται επιτάχυνση εφαρμογών στα άκρα του δικτύου 5G καθώς επίσης και περιπτώσεων χρήσης που σχετίζονται με τη δημόσια ασφάλεια και την πολιτική προστασία.

Περίπτωσης χρήσης των μικρών κυψελών στον τομέα των μεταφορών, ειδικότερα δε σχετικά με την ασύρματη επικοινωνία και ψυχαγωγία εν πτήση.

Περιπτώσεων χρήσης σε εφαρμογές στις έξυπνες πόλεις. Η εργασία αναφέρεται σε μία αρχιτεκτονική που συνδυάζει τα εικονικοποιημένα και πολλαπλής μίσθωσης δίκτυα μικρών κυψελών με την πολλαπλών επιπέδων υποδομή στα άκρα του υπολογιστικού νέφους και μελετά την αξιοποίηση των μικρών κυψελών και της τεχνολογίας 5G προκειμένου να μετατρέψει τις πόλεις σε «έξυπνες πόλεις» οι οποίες θα παράξουν νέες υπηρεσίες και θα αλλάξουν ριζικά τον τρόπο ζωής των πολιτών. Στο πλαίσιο αυτό, οι μικρές κυψέλες μπορούν να αποτελέσουν την υποδομή που θα στηρίξει ισχυρές επικοινωνίες απαραίτητες για εφαρμογές ασφαλούς οδήγησης όπως π.χ. τη λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων καθώς και την επικοινωνία των οχημάτων με πεζούς, με τις υποδομές, με άλλα οχήματα, με αισθητήρες και το Διαδίκτυο καθώς και άλλες δυνητικές εφαρμογές. Επιπλέον μελετώνται οι περιπτώσεις χρήσης μικρών κυψελών σε στύλους φωτισμού, φωτεινούς σηματοδότες, πινακίδες, στάσεις λεωφορείων, δεξαμενές ύδατος καθώς και σε εγκαταστάσεις σε κτήρια (Κεφάλαιο 3).

Βασικών στοιχείων και καινοτομιών των ερευνητικών προγραμμάτων SESAME και 5G ESSENCE της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, από το καινοτόμο πλαίσιο δράσεων H2020/5G-PPP.

Το ερευνητικό πρόγραμμα SESAME (GA No.671596) υποστηρίζει την ιδέα μιας μικρής κυψέλης δυνάμενης να ενεργοποιηθεί σε ένα υπολογιστικό νέφος από πολλαπλούς παρόχους και η οποία ενσωματώνει μία εικονικοποιημένη υποδομή εκτέλεσης εντολών για την ανάπτυξη εικονικών δικτυακών λειτουργιών που υποστηρίζουν εφαρμογές και υπηρεσίες διαχείρισης και εκτέλεσης «self-x λειτουργιών».

Το ερευνητικό πρόγραμμα 5G ESSENCE (GA No.761592) εστιάζεται στη μελέτη της υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου και της διάθεσης «μικρών κυψελών ως υπηρεσία» στην αγορά μικρών κυψελών, με έμφαση σε τρία επιλεγμένα σενάρια των καθετοποιημένων αγορών (Κεφάλαιο 4).

Σε όλες τις συναφείς περιπτώσεις χρήσης αναδεικνύεται ο μείζων ρόλος των μικρών κυψελών ως βασικών «ενεργοποιητών» για την προώθηση εφαρμογών του 5G και την ανάδειξη νέων ευκαιριών για την αγορά.

❖ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ghang, Y.-H. (2021): **5G Small Cells 2021-2031: Technologies, Markets, Forecast**. IDTech Ex. (<https://www.idtechex.com/en/research-report/5g-small-cells-2021-2031-technologies-markets-forecast/825>).
- [2] Wilson Amplifiers (2021): **Guide to Small Cells: Femtocells, Picocells and Microcells**. Available at: <https://www.wilsonamplifiers.com/blog/guide-to-small-cells-femtocell-picocell-and-microcells/>.
- [3] Global5G Project (Grant Agreement No.761816) (2019): **Deliverable 3.4: “White Paper on Small Cells”**. Available at: <https://global5g.org/deliverables>.
- [4] Δρακάκης Κ. (2020, Ιανουάριος): **Αρχιτεκτονικές Ασύρματων Δικτύων για Μείωση του Κόστους Λειτουργίας**. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων. (Διαθέσιμη σε: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/12590>).
- [5] Lopez-Perez, D., Valcarce, A., de la Roche, G., and Jie, Z. (2009, September): **OFDMA femtocells: a roadmap on interference avoidance**. *IEEE Communications Magazine*, vol.47, no.9, pp.41-48, doi: 10.1109/MCOM.2009.5277454.
- [6] Small Cell Forum (SCF): **About small cells**. Available at: <https://www.smallcellforum.org/small-cells/>.
- [7] SESAME Project (Grant Agreement No.671596) (2015, December): **Deliverable 2.1: “System Use Cases and Requirements”**.
- [8] Shah, S.T., Kwon, Y.M., Chung, M.Y., Shin, J., and Park, A.-S. (2015): **Performance analysis of MPCs with varying characteristics in different multitier HetNet scenarios**. In: Proceedings of the 2015 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), pp.607-611. IEEE, doi: 10.1109/IBCAST.2015.7058567.
- [9] Kwon, Y.M., Shah, S.T., Shin, J., Park, A.-S., and Chung, M.Y. (2016, July): **Performance Evaluation of Moving Small-Cell Network with Proactive Cache**. *Mobile Information Systems*, vol.2016, Article ID 6013158, pp.1-11, <https://doi.org/10.1155/2016/6013158>.
- [10] Hickey, W. (2018, February): **Densifying the Network, One Small Cell at a Time**. Cienna. Available at: <https://www.ciena.com/insights/articles/Densifying-the-Network-One-Small-Cell-at-a-Time.html>.
- [11] Sui, Y., Vihriala, J., Papadogiannis, A., Sternad, M. Yang, W., and Svensson, T. (2013, June): **Moving cells: a promising solution to boost performance for vehicular users**. *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.6, pp.62-68, doi: 10.1109/MCOM.2013.6525596.
- [12] Prasad, A. Kunz, A., Velez, G., Samdanis, K. and Song, J. (2014, December): **Energy-Efficient D2D Discovery for Proximity Services in 3GPP LTE-Advanced Networks: ProSe Discovery Mechanisms**. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.9, no.4, pp.40-50, doi: 10.1109/MVT.2014.2360652.

- [13] Chao, S.-L., Lee, H.-Y., Chou, C.-C., and Wei, H.-Y. (2013, December): **Bio-inspired proximity discovery and synchronization for D2D communications**. *IEEE Communication Letters*, vol.17, no.12, pp.2300-2303, doi: 10.1109/LCOMM.2013.101713.131839.
- [14] The Third Generation Partnership Project (3GPP) (2015, May): 3GPP TSG-RANWG1: "R1-152778], **“Support of UE-Network relays”**. Available at: [https:// www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-81--31256.htm](https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-81--31256.htm).
- [15] Munir, D., Gu, J., Hasan, S.F., and Chung, M.Y. (2015, December): **Reliable cooperative scheme for public safety services in LTE-A networks**. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, <https://doi.org/10.1002/ett.3008>.
- [16] Lin, X., Andrews, J.G., Ghosh, A. and Ratasuk, R. (2014, April): **An overview of 3GPP device-to-device proximity services**. *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.4, pp.40-48, doi: 10.1109/MCOM.2014.6807945.
- [17] Rehman, I.U., Nasralla, M.M, Ali, A., and Philip, N. (2018, October): **Small Cell-based Ambulance Scenario for Medical Video Streaming: A 5G-health use case**. In: Proceedings of the 2018 15th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT), pp. 29-32, doi: 10.1109/HONET.2018.8551336.
- [18] Philip, N.Y. and Rehman, I.U. (2016, September): **Towards 5G Health for Medical Video Streaming over Small Cells**. In: Kyriacou, E., et al. (eds.), Proceedings of the XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016, pp.1093-1098. Springer International Publishing Switzerland, doi: 10.1007/978-3-319-32703-7_215.
- [19] Andrews, J.G., Claussen, H., Dohler, M., Rangan, S., and Reed, M.C. (2012, April): **Femtocells: Past, present, and future**. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.30, no.3, pp.497-508, doi: 10.1109/JSAC.2012.120401.
- [20] Hindia, M.N., Rahman, T.A., Ojukwu, H., Hanafi, E.B., and Fattouh, A. (2016, May): **Enabling Remote Health-Caring Utilizing IoT Concept over LTE-Femtocell Networks**. PLoS ONE 11(5): e0155077, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155077>.
- [21] Istepanian, R.S.H., and Zhang, Y.T. (2012, January): **Guest editorial introduction to the special section: 4G health - the long-term evolution of m-health**. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol.16, no.1, pp.1-5, doi: 10.1109/TITB.2012.2183269.
- [22] Keane, G. (2009): **A review of the role of telemedicine in the accident and emergency department**. *Journal of Telemedicine and Telecare*, vol.15 no.3, pp.132-134, doi: 10.1258/jtt.2009.003008.
- [23] Rehman, I.U., Philip, N.Y., and Istepanian, R.S.H. (2014, January): **Performance analysis of medical video streaming over 4G and beyond small cells for indoor and moving vehicle (ambulance) scenarios**. In: Proceedings of the 2014 4th International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare - Transforming Healthcare Through Innovations in Mobile and Wireless Technologies (MOBIHEALTH), pp.211-216, doi: 10.1109/MOBIHEALTH.2014.7015948.

- [24] De, D., and Mukherjee, A. (2014, February): **Femtocell Based Economic Health Monitoring Scheme Using Mobile Cloud Computing**. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC), pp.385-390. IEEE, doi: 10.1109/IAdCC.2014.6779354.
- [25] Constantinescu, L., Kim, J., and Feng, D. (2012, January): **SparkMed: A framework for dynamic integration of multimedia medical data into distributed m-health systems**. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol.16, no.1, pp.40-52, doi: 10.1109/TITB.2011.2174064.
- [26] Van Gorp, P., and Comuzzi, M. (2014, January): **Lifelong Personal Health Data and Application Software via Virtual Machines in the Cloud**. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol.18, no.1, pp.36-45, doi: 10.1109/JBHI.2013.2257821.
- [27] Chou, S.-F., Chiu, T.-C., Yu, Y.-j., and Pang, A.-C. (2014, December): **Mobile small cell deployment for next generation cellular networks**. In: Proceedings of the 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.4852-4857, doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037574.
- [28] Marzuki, A.S.W., Ahmad, I., Habibi, D., and Phung, Q.V. (2017, June): **Mobile Small Cells: Broadband Access Solution for Public Transport Users**. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.6, pp.190-197, doi: 10.1109/MCOM.2017.1500484.
- [29] Al-Turjman, F., Ever, E., and Zahmatkesh, H. (2019): **Small Cells in the Forthcoming 5G/IoT: Traffic Modelling and Deployment Overview**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.21, no.1, pp.28-65, doi: 10.1109/COMST.2018.2864779.
- [30] Liu, Z., Zhang, P., Guan, X., and Yang, H. (2018, September): **Joint Subchannel and Power Allocation in Secure Transmission Design for Femtocell Networks**. *IEEE Systems Journal*, vol.12, no.3, pp.2688-2698, doi: 10.1109/JSYST.2016.2635153.
- [31] Hu, x., Li, B., Huang, K., Fei, Z., and Wong, K.-K. (2018, April): **Secrecy Energy Efficiency in Wireless Powered Heterogeneous Networks: A Distributed ADMM Approach**. *IEEE Access*, vol.6, pp.20609-20624, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2825387.
- [32] Li, B., Fei, Z., Chu, Z., and Zhang, Y. (2018, December): **Secure Transmission for Heterogeneous Cellular Networks with Wireless Information and Power Transfer**. *IEEE Systems Journal*, vol.12, no.4, pp.3755-3766, doi: 10.1109/JSYST.2017.2713881.
- [33] Katzis, K., and Ahmadi, H. (2016, April): **Challenges implementing Internet of Things (IoT) using cognitive radio capabilities in 5G mobile networks**. In: Mavromoustakis, C., Mastroerakis, G., Batalla, J. (eds.), *Internet of Things (IoT) In 5G Mobile Technologies. Modeling and Optimization in Science and Technologies*, vol.8, pp.55-76. Springer, Cham, https://doi.org10.1007/978-3-319-30913-2_4.
- [34] Mendoza, J., de-la-Bandera, I., Álvarez-Merino, C.S., Khatib, E.J., Alonso, J., Casalderrey-Díaz, S., and Barco, R. (2021, July): **5G for Construction: Use Cases and Solutions**. *Electronics 2021*, vol.10(14), p.1713, <https://doi.org/10.3390/electronics10141713>.

- [35] Kostopoulos, A., Chochliouros, I.P., Munaretto, D., Keuker, K., Temprado-Garriga, E., Fernandez Hidalgo, J., Catalan Cid, M., Khalifé, H., and Liberal, F. (2018, May): **Use Cases for 5G Networks Using Small Cells**. In: L. Iliadis, I. Maglogiannis and V. Plagianakos (Eds.) *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI) 2018, IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.520, pp.39-49. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-92016-0_4.
- [36] The Third Generation Partnership Project (3GPP) (2013, July): **Public Safety**, <http://www.3gpp.org/news-events/3gppnews/1455-Public-Safety>.
- [37] The Critical Communications Association (TCCA) (2017): **4G and 5G for Public Safety – Technology options (White Paper)**. Cambridgeshire, UK. Available at: <https://tcca.info/about-tcca/tcca-resources/whitepapers/>.
- [38] Bernal, I. (2016, March): **A Friendly Introduction to the Requirements and Supporting Technologies for 5G Cellular Networks**. *Revista Politecnica*, vol.37, no.1, pp.1-10. https://www.researchgate.net/publication/304644145_A_Friendly_Introduction_to_the_Requirements_and_Supporting_Technologies_for_5G_Cellular_Networks.
- [39] Shin, M., Shah, S.T, Chung, M.Y., Hasan, S.F., Seet, B.-C., and Joo Chong P.H. (2017, January): **Moving small cells in public safety networks**. In: Proceedings of the 2017 *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp.564-568, doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899559.
- [40] Hossain, M.I., Alzarrad, M.A., Wolfe, K., and Miah, S. (2020, January): **Small-Cell Installation in Transportation Infrastructure - A Literature Review. (Research Report No. FHWA-ICT-20-003)**. *Civil Engineering Studies: Illinois Center for Transportation* vol.20, no.4, <https://doi.org/10.36501/0197-9191/20-004>.
- [41] Chochliouros, I.P., Giannoulakis, I., Kourtis, T., Belesioti, M., Sfakianakis, E., Spiliopoulou, A.S., Bompetsis, N., Kafetzakis, E., Goratti, L., and Dardamanis, A. (2016, September): **A Model for an Innovative 5G-oriented Architecture, based on Small Cells Coordination for Multi-Tenancy and Edge Services**. In: Iliadis L., Maglogiannis I. (eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2016), IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.475, pp.666-675. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-44944-9_59.
- [42] Chen, R. (2021, August): **An Introduction to the 5G Small Cell**. LitePoint. Available at: <https://www.litepoint.com/blog/an-introduction-to-the-5g-small-cell/>
- [43] Mustakim, H.U. (2020, July): **5G Vehicular Network for Smart Vehicles in Smart City: A Review**. *COMPLETE Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication*, vol.1, no.1, pp.1-6, doi.org/10.52435/complete.v1i1.44.
- [44] Mavromatis, I., Tassi, A., Piechocki, R.G., and Nix, A. (2018, May): **Efficient V2V Communication Scheme for 5G mmWave Hyper-Connected CAVs**. In: Proceedings of the 2018 *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp.1-6, doi: 10.1109/ICCW.2018.8403780.

- [45] Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., and Mark, J.W. (2014, August): **Connected Vehicles: Solutions and Challenges**. *IEEE Internet of Things Journal*, vol.1, no.4, pp.289-299, doi: 10.1109/IIOT.2014.2327587.
- [46] Ullah, H., Gopalakrishnan Nair, N., Moore, A., Nugent, C., Muschamp P., and Cuevas, M. (2019, March): **5G Communication: An Overview of Vehicle-to-Everything, Drones, and Healthcare Use-Cases**. *IEEE Access*, vol.7, pp.37251-37268, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905347.
- [47] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2015, March): **3GPP TS 23.251 v13.1.0 (2015-03): "Network Sharing; Architecture and Functional Description (Release 13)"**. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.251/.
- [48] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2015, December): **3GPP TS 36.300 v13.2.0 (2015-12): "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); Overall Description; Stage 2 Release 13"**. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.300/.
- [49] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2016, January): **3GPP TS 32.130 v13.0.0 (2016-01): "Telecommunication management; Network Sharing; Concepts and Requirements (Release 13)"**. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/32_series/32.130/.
- [50] SESAME Project (Grant Agreement No.671596) (2016, April): **Deliverable 2.4: "Specification of the Infrastructure Virtualisation, Orchestration and Management - First Iteration"**.
- [51] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2014, December): **ETSI GS NFV-MAN 001 v1.1.1 (2014-12): "Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration"**. Available at: https://www.etsi.org › gs_nfv-man001v010101p.
- [52] Basta, A., Kellerer, W., Hoffmann, M., Hoffmann, K., Schmidt, E.-D. (2013, November): **A Virtual SDN-Enabled LTE EPC Architecture: A Case Study for S-/P-Gateways Functions**. In: Proceedings of the 2013 IEEE SDN Conference for Future Networks and Services (SDN4FNS), pp.1-7, doi: 10.1109/SDN4FNS.2013.6702532.
- [53] Al-Turjman, F.M., Imran, M., and Bakhsh, S.T. (2017, October): **Energy Efficiency Perspectives of Femtocells in Internet of Things: Recent Advances and Challenges**. *IEEE Access*, vol.5, pp.26808-26818, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773834.
- [54] Qutqut, M.H., Al-Turjman, F.M., and Hassanein, H.S. (2013, October): **HOF: A History-based Offloading Framework for LTE networks using mobile small cells and Wi-Fi**. In: Proceedings of the 38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks - Workshops, pp.77-83, doi: 10.1109/LCNW.2013.6758501.
- [55] J. Wan, J., Zou, C., Ullah, S., Lai, C., Zhou, M., and Wang, X. (2013, September-October): **Cloud-enabled wireless body area networks for pervasive healthcare**. *IEEE Network*, vol.27, no.5, pp.56-61, doi: 10.1109/MNET.2013.6616116.
- [56] Chowdhury, M.Z., Lee, S.Q., Ru, B.H., Park, N., and Jang, Y.M. (2011, November): **Service quality improvement of mobile users in vehicular environment by mobile femtocell**

- network deployment*. In: Proceedings of the 2011 ICTC Conference, pp.194-198, doi: 10.1109/ICTC.2011.6082578.
- [57] Saeed, R.A., Chaudhari, B.S., and Mokhtar, R.A. (2012, January): **Femtocell Communications and Technologies: Business Opportunities and Deployment Challenges: Business Opportunities and Deployment Challenges**. IGI Global, Hershey, PA, US.
- [58] European Commission (2017): **Smart Grid and Meters**. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en
- [59] ABI Research (2012, July): **High Inventory and Low Burn Rate Stalls Femtocell Market in 2012**. ABI Research, New York, NY, US.
- [60] Zhao, J., Zheng, W., Wen, X., Chu, X., Zhang, H., and Lu, Z. (2014, March): **Game theory based energy-aware uplink resource allocation in OFDMA femtocell networks**. *International Journal on Distributed Sensor Networks*, vol.2014, Art. no.58158, <https://doi.org/10.1155/2014/658158>.
- [61] WAVES (2022): **Wireless Body Area Networks (WBANs)**. Ghent University, Belgium. Available at: <https://www.waves.intec.ugent.be/research/wireless/wbans>.
- [62] Wan, J., Zhang, D., Zhao, S., Yang, L.T., and Lloret, J. (2014, August): **Context-aware vehicular cyber-physical systems with cloud support: architecture, challenges, and solutions**. *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.8, pp.106-113, doi: 10.1109/MCOM.2014.6871677.
- [63] Wikipedia: **Mobile cloud computing**. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_cloud_computing.
- [64] Gholampooryazdi, B. Hämmäinen, H., Vijay, S., and Savisalo, A. (2017, November): **Scenario planning for 5G light poles in smart cities**. In: Proceedings of the 2017 Conference on Internet of Things Business Models, Users, and Networks, pp.1-7, doi: 10.1109/CTTE.2017.8260984.
- [65] Benseny, J., Walia, J., Hämmäinen, H., and Salmelin, J. (2019, September): **City strategies for a 5G small cell network on light poles**. In: Proceedings of the 2019 CTTE-FITCE: Smart Cities & Information and Communication Technology Conference (CTTE-FITCE), pp.1-6, doi: 10.1109/CTTE-FITCE.2019.8894825.
- [66] Yang, C., Liang, P., Fu, L., Cu, G., Huang, F., and Teng, F. (2022, May): **Using 5G in smart cities: A systematic mapping study**. *Intelligent Systems with Applications*, vol.14, pp.200065-200069, <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200065>.
- [67] Li, J., Nagalapur, K.K., Hammarberg, P., and Negusse, S. (2020, May): **This is how 5G NR for public safety could save lives**. Ericsson, Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/5/how-5g-for-public-safety-could-save-lives>.
- [68] Goratti, L., Costa, C.E., Pérez-Romero, J., Sallent, O., Ruiz, C., Betzler, A., Khodashenas, P.S., Vahid, S., Nasr, K.M., Abubakar, B., Whitehead, A., Belesioti, M., and Chochliouros, I.P. (2016, September): **Network Architecture and Essential Features for 5G: The SESAME**

- Project Approach.** In: Iliadis, L., Maglogiannis, I. (eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2016), IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.475, pp.676-685. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-44944-9_60.
- [69] SESAME (“*Small cEllS coordinAtion for Multi-tenancy and Edge services*”) H2020/5G-PPP Project (GA No. 671596), <http://www.sesame-h2020-5g-ppp.eu/Home.aspx>.
- [70] Ramiro, J., and Hamied, K. (2011, December): ***Self-Organizing Networks. Self-planning, self-optimization and Self-healing for GSM, UMTS and LTE***. Wiley, Hoboken.
- [71] Sánchez-González, J., Pérez-Romero, J., Agustí, R., and Sallent, O. (2016, September): ***On learning mobility patterns in cellular networks***. In: Iliadis, L., Maglogiannis, I. (eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2016), IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.475, pp.686-696. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-44944-9_61.
- [72] Bojic, D., Sasaki, E., Svijetic, N., Wang, T.T., Kuno, J., Lessmann, J., Schmid, S., Ishii, H., and Nakamura, S. (2013, September): ***Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software-defined management***. *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.9, pp.86-93, doi: 10.1109/MCOM.2013.6588655.
- [73] Huawei Technologies Co., Ltd. (2016): ***5G Network Architecture - A High Level Perspective***. Shenzhen, China. Available at: <https://www.huawei.com/en/technology-insights/industry-insights/outlook/mobile-broadband/insights-reports/5g-network-architecture>.
- [74] Fajardo, J.O., Liberal, F., Giannoulakis, I., Kafetzakis, M., Pii, V., Trajkovska, I., Bohnert, T.M., Goratti, L., Riggio, R., Lloreda, J.G., Khodashenas, P.S., Paolino, M., Bliznakov, P., Pérez-Romero, J., Meani, C., Chochliouros, I.P., and Belesioti, M. (2016, August): ***Introducing mobile edge computing capabilities through distributed 5G cloud enabled small cells***. *Mobile Network Applications*, vol.21, no.2, pp.564-574. Springer, <https://doi.org/10.1007/s11036-016-0752-2>.
- [75] Small Cell Forum (SFC) (2015, June): ***Virtualization for Small Cells: Overview (Document 106.05.1.01)***. Available at: <http://scf.io/doc/106>.
- [76] Small Cell Forum (SFC) (2016, June): ***Small Cell Virtualization Functional Splits and Use Cases (Document 159.07.02)***. Available at: <http://scf.io/doc/159>.
- [77] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2012, October): ***Network Functions Virtualisation - Introductory White Paper***. ETSI, Sophia-Antipolis, France. Available at: https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf.
- [78] Basta, A., Kellerer, W., Hoffmann, M., Hoffmann, K., and Schmidt, E.D. (2013, November): ***A virtual SDN-enabled LTE EPC architecture: a case study for S-/P-gateways functions***. *Presentation in IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS)*. Available in: <https://pdfs.semanticscholar.org/7022/8bc6e00cec350972ff0a58a8b684a61a0caf.pdf>.
- [79] Chourasia, S., Sivalingam, K.M. (2015, April): ***SDN based evolved packet core architecture for efficient user mobility support***. In: *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft-2015)*, pp.1-5, doi: 10.1109/NETSOFT.2015.7116148.

- [80] 5G ESSENCE Project (Grant Agreement No.761592) (2019, November): **Deliverable 8.6: “Market analysis, roadmapping and business modelling report”**. Available at: https://www.5g-essence-h2020.eu/Portals/0/5G%20ESSENCE_%20Deliverable%208.6%20v1.1_Final.pdf?ver=2020-06-05-150256-150.
- [81] Global System for Mobile Communications Association (GSMA) (2016): **Improving wireless connectivity through small cell deployment. GSMA Booklet 2016**. Available at: https://www.gsma.com/publicpolicy/wp-content/uploads/2016/12/GSMA_Small_Cell_Deployment_Booklet.pdf.
- [82] World Health Organization (WHO): **Electromagnetic fields**. Available at: <https://www.who.int/health-topics/electromagnetic-fields>.
- [83] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2016, March): **3GPP TS 36.104 v12.11.0 (2016-03): “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); Base Station (BS) radio reception and transmission (Release 12)”**. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.104/.
- [84] Rappaport, T.S., Run, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G.N., Schulz, J.K., Samimi, M., and Gutierrez, F. (2013, May): **Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! IEEE Access**, vol.1, pp.335-349, doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [85] Maeder, A., Lalam, M., De Domenico, A., Pateromichelakis, E., Wüben, D., Bartelt, J., Fritzsche, R., and Rost, P. (2014, June): **Towards a flexible functional split for cloud-RAN networks**. In: Proceedings of the 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), pp.1-5, doi: 10.1109/EuCNC.2014.6882691.
- [86] Checko, A., Christiansen, H.L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M.S., and Dittmann, L. (2015, January): **Cloud RAN for Mobile Networks-A Technology Overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 17, no.1, pp.405-426, doi: 10.1109/COMST.2014.2355255.
- [87] Kostopoulos, A., Chochliouros, I.P., Giannoulakis, I., Kourtis, A., and Kafetzakis, E. (2018, June): **Small Cells-As-A-Service in 5G Networks**. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), pp.1-5, doi: 10.1109/BMSB.2018.8436701.
- [88] Chochliouros, I.P., Kostopoulos, A., Giannoulakis, I., Spiliopoulou, A.S., Belesioti, M., Sfakianakis, E., Kourtis, A., and Kafetzakis, E. (2017, November): **Using small cells for enhancing 5G network facilities**. In: Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN), pp.264-269, doi: 10.1109/NFV-SDN.2017.8169871.
- [89] Boccardi, F., Heath, R.W., Lozano, A., Marzetta, T.L., and Popovski, P. (2014, February): **Five disruptive technology directions for 5G. IEEE Communications Magazine**, vol.52, no.2, pp.74-80, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746.

- [90] Bernal, I. (2016): **A Friendly Introduction to the Requirements and Supporting Technologies for 5G Cellular Networks**. *Revista Politécnica (Quito)*, vol.37, no.1, pp.1-9.
- [91] Wannstrom, J. (2013, June): **Carrier Aggregation explained**. The Third Generation Partnership Project (3GPP). Available at: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>.
- [92] Dahlman, E., Parkvall, S., and Sköld, J. (2016): **4G: LTE-Advanced Pro and the Road to 5G - Third Edition**. Elsevier Ltd., <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01834-2>.
- [93] Mitola, J. (2000): **Cognitive Radio - An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio**, Diva (Ph.D. Dissertation). KTH Royal Institute of Technology, Kista, Sweden.
- [94] Federal Communication Commission (FCC) (2015, September): **Small Entity Compliance Guide Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band (FCC 15-47 GN Docket No. 12-354)**. Available at: <https://www.fcc.gov/document/commercial-operations-3550-3650-mhz-band>.
- [95] Global System for Mobile Communications (GSM) Alliance (GSMA) (2013): **Licensed Shared Access (LSA) and unlicensed Shared Access (USA)**. Available at: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2013/04/GSMA-Policy-Position-on-LSA-USA.pdf>.
- [96] Yang, W., Zhang, J., and Zhang, J. (2021, April): **On Performance of Ultra-Dense Neighborhood Small Cell Networks in Urban Scenarios**. *IEEE Communications Letters*, vol.25, no.4, pp.1378-1382, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3043205.
- [97] Qualcomm Technologies, Inc. (2013, February): **Neighborhood Small Cells for Hyper Dense Deployments: Taking HetNets to the Next Level**. Available at: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/qualcomm-research-neighborhood-small-cell-deployment-model.pdf>.
- [98] Bhushan, N., Li, J., Malladi, D., Gilmore, R., Brenner, D., Damnjanovic, A., Sukhavasi, R.T., Patel, C., and Geihofer, S. (2014, February): **Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G**. *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.2, pp.82-89, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736747.
- [99] Larsson, E.G., Edfors, O., Tufvesson, F., and Marzetta, T.L. (2014, February): **Massive MIMO for next generation wireless systems**. *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.2, pp.186-195, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [100] Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., & Ishii, H. (2013, February): **Future Steps of LTE-A: Evolution towards Integration of Local Area and Wide Area Systems**. *IEEE Wireless Communications*, vol.20, no.1, pp.12-18, doi: 10.1109/MWC.2013.6472194.
- [101] Wang, C.-X., Haider, F., Gao, X., You, X.-H., Yang, Y., Yuan, D., Aggoune, H.M., Haas, H., Fletcher, S., & Hepsaydir, E. (2014, February): **Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks**. *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.2, pp.122-130, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736752.

- [102] Akyildiz, I.F., Gutierrez-Estevez, D.M., Reayas, E.C. (2010, December): **The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced**. *Physical Communication*, vol.3, issue 4, pp.217-244, doi: 10.1016/j.phycom.2010.08.001.
- [103] Andrews, J.G. (2013, March): **Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift**. *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.3, pp.136-144, doi: 10.1109/MCOM.2013.6476878.
- [104] Marzetta, T.L. (2010, October): **Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.9, no.11, pp.3590-3600, doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [105] Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance (2015, February): **NGMN 5G White Paper**. Available at: <https://www.ngmn.org/work-programme/5g-white-paper.html>
- [106] NTT DoCoMo, Inc. (2014, July): **DoCoMo 5G White Paper: 5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies**. NTT DoCoMo, Inc. Available at: https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_Paper.pdf.
- [107] Chen, S., & Zhao, J. (2014, May): **The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication**. *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.5, pp.36-43, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815891
- [108] 4G Americas (2014, November): **Bringing Network Function Virtualization to LTE**. Available at: <https://www.5gamericas.org/bringing-network-function-virtualization-to-lte/>
- [109] Morillo, G., Bernal, I., & Mejia, D. (2014, August): **Aplicación para Control de Acceso a la Red para SDN**. *Revista Politécnica (Quito)*, vol.34, no.2, pp.27-33.
- [110] Wu, Y., Liu, T., Cao, M., Li, L., & Xu, W. (2018, July): **Pilot contamination reduction in massive MIMO systems based on pilot scheduling**. *Journal of Wireless Communications and Networking*, vol.21, doi: 10.1186/s13638-018-1029-1.
- [111] Elijah, O., Leow, C.Y., Rahman, T.A., Nunoo, S., and Iliya, S.Z. (2015, November): **A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO 5G system**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.18, no.2, pp.905-923, doi: 10.1109/COMST.2015.2504379.
- [112] Wang, H.-R., Wang, Y.-H., Huang, Y.-M., and Yang, L.-X. (2014, January): **Pilot contamination reduction in very large MIMO cellular network**. *Journal on Communications*, vol.29, no.2, pp.171-180, doi: 103969/j.issn.1000-436x.2014.01.004.
- [113] Zhao, J., Ni, S., Gong, Y., and Yang, Q. (2019, June): **Pilot contamination reduction in TDD-based massive MIMO systems**. *IET Communications*, <https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.5557>.
- [114] Marzetta, T.L., Caire G., Debbah M., and Mohammed S.K. (2013, August): **Special issue on massive MIMO**. *Journal of Communications and Networks*, vol.15, no.4, pp.333-337, doi: 10.1109/JCN.2013.000064.

- [115] Lu, L., Li, G.Y., Swindlehurst, A.L., Ashikhmin, A., and Zhang, R. (2014, October): **An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges**. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol.8, no.5, pp.742-758, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [116] Voudouris, K.N., Chochliouros, I.P., Tsiakas, P., Mor, A., Agapiou, G., Aloush, A., Belesioti, M., and Sfakianakis, E. (2009, May): **Developing an Innovative Multi-Hop Relay Station Software Architecture in the Scope of the REWIND European Research Program**. In: Proceedings of the *1st International Conference of Mobile and Lightweight Wireless Systems (MOBILIGHT 2009)*, pp.160-172, https://doi.org/10.1007/978-3-642-03819-8_16.
- [117] Chochliouros, I.P., Whitehead, A., Sallent, O., Pérez-Romero, J., Spiliopoulou, A., Spiliopoulou, A., and Dardamanis, A. (2017, August): **Inclusion of “Self-x” Properties in the SESAME-Based Wireless Backhaul for Support of Higher Performance**. In: Boracchi, G., Iliadis, L., Jayne, C., Likas, A. (eds.) *Engineering Applications of Neural Networks. EANN 2017. Communications in Computer and Information Science*, vol.744. pp.716-727, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-65172-9_60.
- [118] Hu, Y.C., Patel, M., Sabella, D., Sprecher, N. and Young, V. (2015, September): **ETSI White Paper No. 11: Mobile Edge Computing - A key technology towards 5G, First edition**. European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia-Antipolis, France. Available at: https://www.etsi.org/images/files/etsiwhitepapers/etsi_wp11_mec_a_key_technology_towards_5g.pdf.
- [119] Flint, D. (2016, August): **The Role of Small Cells in IoT and M2M**. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/role-small-cells-iot-m2m-david-flint>.
- [120] Kumar, N., Nidhi, K.N., and Acharya, S. (2016, February): **A survey on SDN: an unprecedented approach in networking**. *International Journal of Engineering and Computer Science*, vol.5, no.22, pp.15668-15672, doi: 10.18535/ijecs/v5i2.3
- [121] Damnjanovic, A., Montojo, J., Wei, J., Ji, T., Luo, T., Vajapeyam, M., Yoo, T., Song, O., and Majjadi, D. (2011, June): **A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks**. *IEEE Wireless Communications*, vol.18, no.3, pp.10-21, doi: 10.1109/MWC.2011.5876496.
- [122] Sui, Y., Vihriala, J., Papadogiannis, A., Sternad, M., Yang, W., and Svensson, T. (2013, June): **Moving cells: a promising solution to boost performance for vehicular users**. *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.6, pp.62-68, doi: 10.1109/MCOM.2013.6525596.
- [123] Shah, B., Dalwadi, G., Shah, H., and Kothari, N. (2018, January): **Power-efficient LTE MACRO eNodeB: A comprehensive survey**. *Telecommunications and Radio Engineering*, vol.77, issue 16, pp.1441-1462, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i16.40.
- [124] Hwang, R.-H., Peng, M.C., Cheng, K.-C. (2019, July): **QoS-Guaranteed Radio Resource Management in LTE-A Co-Channel Networks with Dual Connectivity**. *Applied Sciences*, vol.9, issue 15, p.3018, <https://doi.org/10.3390/app9153018>.
- [125] Ali, K., Nguyen, H.X., Shah, P., Vien, Q.-T., and Bhuvanandaram, N. (2016, April): **Architecture for public safety network using D2D communication**. In: Proceedings of

- the 2016 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pp.206-211, doi: 10.1109/WCNCW.2016.7552700.
- [126] Huang, J., Fang, D., Ye, F., Hu, R.Q., and Qian, Y. (2018, June): **A Relay Selection Scheme to Prolong ConnectionTime for Public Safety Communications**. In: Proceedings of the 2018 *IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp.1-6, doi: 10.1109/VTCSpring.20188417847.
- [127] Abbanet (2022, February): **Small Cells, femtocells, the future of Telecommunication**. Available at: <https://abbanet.com.ng/malesuada-proin-libero-nunc-consequat-interdum/>.
- [128] Storck, C.R., and Duarte-Figueiredo, F. (2020): **A Survey of 5G Technology Evolution, Standards, and Infrastructure Associated With Vehicle-to-Everything Communications by Internet of Vehicles**. *IEEE Access*, vol.8, pp.11759-117614, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004779
- [129] Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance Ltd. (2018): **V2X White Paper**. Available at: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/V2X_white_paper_v1_0-1.pdf.
- [130] 5G Americas (2018, March): **Cellular V2X Communications Towards 5G – White Paper**. Available at: https://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/2018_5G_Americas_White_Paper_Cellular_V2X_Communications_Towards_5G_Final_for_Distribution.pdf
- [131] Chen, S., Hu, J., Shi, Y., Peng, Y., Fang, J., Zhao, R., and Zhao, L. (2017, July): **Vehicle-to-Everything (V2X) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G**. *IEEE Communications Standards Magazine*, vol.1, no.2, pp.70-76, doi: 10.1109/MCOMSTD.2017.1700015.
- [132] Kutila, M., Pyykonen, P., Huang, O., Deng, W., Lei, W., and Pollakis, E. (2019, May): **C-V2X supported automated driving**. In: Proceedings of the *IEEE 2019 International Conference on Communications, Workshops (ICC Workshops 2019)*, pp.1-5, doi: doi: 10.1109/ICCW.2019.8756871.
- [133] Guevara, L., and Auat Cheen, F. (2020, August): **The Role of 5G Technologies: Challenges in Smart Cities and Intelligent Transportation Systems**. *Sustainability (MDPI)*, 12(16), 6469, doi: 10.3390/su12166469.
- [134] Ahad, M., Paiva, S., Tripathi, G., and Feroz, N. (2020, October): **Enabling technologies and sustainable smart cities**. *Sustainable Cities and Society*, vol.61, pp.102301-102342, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102301>.
- [135] Wlodarczak, P. (2017): **Smart Cities – Enabling Technologies for Future Living**. In: Karakitsiou, A., Migdalas, A., Rassaia, S., Pardalos, P. (eds.) *City Networks. Springer Optimization and Its Applications*, vol.128, pp.1-16. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65338-9_1.
- [136] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., and Zorzi, M. (2014, February): **Internet of Things for Smart Cities**. *IEEE Internet Things Journal*, vol.1, no.1, pp.22-32, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.

- [137] Mehmood, Y., Ahmad, F., Yaqoob, I., Adnane, A., Imran, M., and Guizani, S. (2017, September): **Internet-of-Things-Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges**. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.9, pp.16-24, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600514.
- [138] Weber, T. (2022, June): **How 5G Small Cells Improve IoT Coverage**. Available at: <https://www.emnify.com/blog/5g-small-cell>.
- [139] Chowdhury, T.I., and Mowla, M.M. (2021): **Design of a novel multi-clustered 5G network for IoT applications**. In: *Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*, 2021, pp.109-112, doi: 10.1109/ICEEE54059.2021.9718802.
- [140] Ullo, S.L., and Sinha, G.R. (2020): **Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors**. *Sensors*, vol.20, no.11, pp.3113, <https://doi.org/10.3390/s20113113>.
- [141] Shafique, K., Khawaja, B .A., Sabir, F. Qazi, F., and Mustaqim, M. (2020, January): **Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios**. *IEEE Access*, vol.8, pp.23022-23040, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [142] Ejaz, W., Anpalagan, A., Imran, M.A., Jo, M., Naeem, M., Qaisar, S.B., and Wang, W. (2016): **Internet of Things (IoT) in 5G wireless communications**. *IEEE Access*, vol.4, pp.10310-10314, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2646120.
- [143] Niyato, D., Maso, M., Kim, M.I., Xhafa, A., Zorzi, M., and Dutta, A. (2017, February): **Practical perspectives on IoT in 5G networks: From theory to industrial challenges and business opportunities**. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.2, pp.68-69, 10.1109/MCOM.2017.7842414.
- [144] Sayed, E., Ahmed, A., Yousef, M.E. (2019, August): **Internet of things in Smart Environment: Concept, Applications, Challenges, and Future Directions**. *World Scientific News*, vol.134, pp.1-51. Available at: <http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2019/06/WSN-1341-2019-1-51-1.pdf>.
- [145] Nizetić, S., Solić, P., López-de-Ipiña González-de-Artaza, D., and Patrono, L. (2020, November): **Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future**. *Journal of Cleaner Production*, vol.274, p.122877, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>.
- [146] Lee, I., and Lee, K. (2015, July): **The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises**. *Business Horizons*, vol.58, no.4, pp.431-440, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>.
- [147] Chandrasekhar, V., Andrews, J.G., and Gatherer, A. (2008, September): **Femtocell networks: a survey**. *IEEE Communications Magazine*, vol.46, no.9, pp.59-67, doi: 10.1109/MCOM.2008.4623708.

- [148] Bao, N.K., Joung, S., and Park, M. (2015, October): **A new access mode for femtocells in 5G networks**. In: *Proceedings of the 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp.1368-1370, doi: 10.1109/ICTC.2015.7354817.
- [149] Claussen, H., Ho, L.T.W., and Samuel, L.G. (2008, May): **An Overview of the Femtocell Concept**. *Bell Labs Technical Journal*, vol.3, no.1, pp.221-245, doi: 10.1002/bltj.20292.
- [150] Ur Rehman, M., and Ali Safdar, G. (2018, April): **The Road Ahead for LTE Femtocells**. In: *LTE Communications and Networks: Femtocells and Antenna Design Challenges*, Wiley, pp.322-331, doi: 10.1002/9781119385271.ch12.
- [151] SmartGrid.Gov: **What is Smart Grid?** US Department of Energy. Available at: https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html
- [152] Bou-Harb, E., Fachkha, C., Pourzandi, M., Debbabi, M. and Assi, C. (2013, January): **Communication security for smart grid distribution networks**. *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.1, pp.42-49, doi: 10.1109/MCOM.2013.6400437.
- [153] Al-Janabi, S., Al-Shourbaji, I., Shojafar, M., and Shamshirband, S. (2017, July): **Survey of main challenges (security and privacy) in wireless body area networks for healthcare applications**. *Egyptian Informatics Journal*, vol.18, issue 2, pp.113-122, <https://doi.org/10.1016/j.eij.2016.11.001>.
- [154] Saeed, R., (ed.) (2012): **Femtocell Communications and Technologies: Business Opportunities and Deployment Challenges: Business Opportunities and Deployment Challenges**. IGI Global, Hershey, PA, USA.
- [155] Petracca, M., Bocchino, S., Azzarà, A., Pelliccia, R., Ghibaudi, M., and Pagano, P. (2013, March): **WSN and RFID Integration in the IoT scenario: an Advanced Safety System for Industrial Plants**. *Journal of Communications Software and Systems*, vol.9, no.1, pp.104-113, doi: 10.24138/jcomms.v9i1.162
- [156] Yeh, S.P., Talwar, S., Lee, S.C., and Kim, H. (2008, October): **WiMAX femtocells: a perspective on network architecture, capacity, and coverage**. *IEEE Communications Magazine*, vol.46, no.10, pp.58-65, doi: 10.1109/MCOM.2008.4644120.
- [157] Sahin, M.E., Guvenc, I., Jeong, M.-R., and Arslan, H. (2009, December): **Handling CCI and ICI in OFDMA femtocell networks through frequency scheduling**. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.55, no.4, pp.1936-1944, doi: 10.1109/TCE.2009.5373753.
- [158] Munoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., Valero, I., and Oñate, E. (2021, July): **Methodological-technological framework for Construction 4.0**. *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol.28, pp.689-711, <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09455-9>.
- [159] Schönbeck, P., Löfsjögård, M., and Ansell, A. (2020, September): **Quantitative Review of Construction 4.0 Technology Presence in Construction Project Research**. *Buildings*, vol.10, no.10, p.173, <https://doi.org/10.3390/buildings10100173>.

- [160] Xiang, Y., Xu, B., Su, T., Brach, C., Mao, S.S., and Geimer, M. (2021, September): **5G meets construction machines: Towards a smart working site**. In: Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Computing and Communications Applications and Technologies (I3CAT), pp.1-7, doi: 10.1109/I3CAT53310.2021.9629426.
- [161] Jin, R., Zhang, H., Liu, D., and Yan, X. (2020, October): **IoT-based detecting, locating and alarming of unauthorized intrusion on construction sites**. *Automation in Construction*, vol.118, p.103278, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103278>.
- [162] Kanan, R., Elhassan, O., and Bensalem, R. (2018, April): **An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies**. *Automation in Construction*, vol.88, pp.73-86. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.033>.
- [163] Tang, N., Hu, H., Xu, F., and Zhu, F. (2019, March): **Personalized safety instruction system for construction site based on Internet technology**. *Safety Science*, vol.116, pp.161-169, doi: 10.1016/j.ssci.2019.03.001.
- [164] Pixelplex (2022): **How Can AR/VR Benefit the Construction Industry?** Available at: <https://pixelplex.io/blog/ar-vr-in-construction/>
- [165] Reja, V.K., and Varghese, K. (2019, July): **Impact of 5G technology on IoT applications in construction project management**. In: Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2019), pp.209-217, doi: 10.22260/ISARC2019/0029.
- [166] Louis, J., and Dunston, P.S. (2018, October): **Integrating IoT into operational workflows for real-time and automated decision-making in repetitive construction operations**. *Autom. Constr*, vol.94, pp.317-327, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.005>.
- [167] Sartipi, F. (2020, July): **Influence of 5G and IoT in construction and demolition waste recycling - conceptual smart city design**. *Journal of Construction Materials*, vol.4-1, pp.1-9, doi: 10.36756/JCM.v1.4.1
- [168] Rao, S.K., and Prasad, R. (2018, May): **Impact of 5G technologies on smart city implementation**. *Wireless Personal Communications*, vol.100, no.1, pp.161-176, doi: 10.1007/s11277-018-5618-4.
- [169] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592, <https://www.5g-essence-h2020.eu/>.
- [170] Oladejo, S.O., and Falowo, O.E. (2017, October): **5G network slicing: A multi-tenancy scenario**. In: Proceedings of the 2017 Global Wireless Summit (GWS), pp.88-92, doi: 10.1109/GWS.2017.8300476.
- [171] Kostopoulos, A., Chochliouros, I.P., Giannoulakis, I., Kourtis, A., and Kafetzakis E. (2018, June): **Small Cells-as-a-Service in 5G Networks**. In: Proceedings of the IEEE 2018 International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB 2018), pp.1-4, doi: 10.1109/BMSB.2018.8436701.

- [172] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Lazaridis, P., Kourtis, M.-A., Zaharis, Z. and Kostopoulos, A. (2020, May): **Combined 5G-based Video Production and Distribution in a Crowded Stadium Event**. In: I. Maglogiannis, L. Iliadis and E. Pimenidis. (Eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI) 2020 IFIP WG 12.5 International Workshops: MHDW and 5G-PINE 2020, IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.585, pp.35-46. Springer Nature Switzerland AG, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49190-1_4.
- [173] Chochliouros, I.P., Giannoulakis, I., Kourtis, T., Belesioti, M. Sfakianakis, E., Spiliopoulou, A.S., Bompetsis, N., Kafetzakis, E., Goratti, L., and Dardamanis, A. (2016, September): **A Model for an innovative 5G-related Architecture, based on Small Cells Coordination for Multi-Tenancy and Edge Services**. In: L. Iliadis, I. Maglogiannis (Eds.) *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI) 2016, IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.475, pp.666-675. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-44944-9_59.
- [174] Chochliouros, I.P., Kostopoulos, A., Giannoulakis, I., Spiliopoulou, A.S., Belesioti, M., Sfakianakis, E., Kourtis, A., and Kafetzakis, E. (2017, November): **Using small cells for enhancing 5G networks**. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Network Function Virtualisation and Software-Defined Networks (NFV-SDN 2017)*, pp.264-269, doi: 10.1109/NFV-SDN.2017.8169871.
- [175] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2018, May): **Deliverable 5.1: “Planning and Demonstration for Network Services: Use Case 1”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [176] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2019, March): **Deliverable 5.2: “Prototypes of Network Services and Integration Planning for Use Case 1”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [177] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2019, November): **Deliverable 5.3: “Integrated Pilot and Evaluation Report for Use Case 1”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [178] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2018, February): **Deliverable 2.2: “Overall System Architecture and Specifications”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [178] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2018, November): **Deliverable 2.3: “Alignment with 5G-PPP Phase-1 Technologies and Final Architecture”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [179] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2018, May): **Deliverable 6.1: “Planning and Demonstration for Network Services: Use Case 2”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>

- [180] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2019, March): **Deliverable 6.2: “Prototypes of Network Services and Integration Planning for Use Case 2”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [181] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2017, November): **Deliverable 2.1: “System Use Cases and Requirements”**. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [182] Kumbhar, A., Koohifar, F., Güvenç, I., and Mueller, B. (2017, September): **A Survey on Legacy and Emerging Technologies for Public Safety Communications**. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol.19, no.1, pp.97-124, doi: 10.1109/COMST.2016.2612223.
- [183] Baldini, G., Karanasios, S., Allen, D., and Vergar, F. (2014): **Survey of Wireless Communication Technologies for Public Safety**. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol.16, no.2, pp.619-641, doi: 10.1109/SURV.2013.082713.00034.
- [184] Ergul, P., Shah, G.A., Canberk, B., and Akan, O.B. (2016, April): **Adaptive and cognitive communication architecture for next-generation PPDR systems**. *IEEE Communications Magazine*, vol.54, no.4, pp.92-100, doi: 1109/MCOM.2016.7452272.
- [185] Fantacci, R., Gei, F., Marabissi, D., and Micciullo, L. (2016, April): **Public safety networks evolution toward broadband: Sharing infrastructures and spectrum with commercial systems**. *IEEE Communications Magazine*, vol.54, no.4, pp.24-30, doi: 10.1109/MCOM.2016.7452262.
- [186] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Lazaridis, P.I., Zacharis, Z.D., Spada, M.-R., Pérez-Romero, J, Blanco, B., Khalifé, H., Ebrahimi Khaleghi, E., and Kourtis, M.-A. (2021, May): **5G for the Support of Public Safety Services**. *Wireless Personal Communications, (Journal: Small Condensed 11277)*, Article No.8473, pp.1-28, Springer, doi: 10.1007/s11277-021-08473-5.
- [187] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2019, September): **3GPP TR21.916 v0.1.0 (2019-09): “Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items”**. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.916/
- [188] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2022, September): **3GPP TR21.916 v1.0.0 (2022-09): “Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 17 Description; Summary of Rel-17 Work Items”**. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.917/
- [189] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2022, September): **3GPP TS 22.281 V16.0.0 (2018-09): “Mission critical video services (Release 16)”**. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3018>
- [190] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2018, December): **3GPP TS 22.282 V16.4.0 (2018-12): “Mission critical data services (Release 16)”**. Available at:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3019>

- [191] Ericsson: *Journey to Mission Critical 4G and 5G*. Available at: <https://www.ericsson.com/en/mission-critical-communications>.
- [192] Koiza, N. (2021, February): *Are 5G Networks a Game Changer for Mission-Critical Communications?* Available at: <https://www.rmediagroup.com/Features/FeaturesDetails/FID/1045>.
- [193] Guldbbrand, M. (2019, May): *Unleash the drones! How can drone use case save lives?* Ericsson, Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/5/drone-use-cases-emergency-critical-sectors>
- [194] Ericsson (2019, October): *Canadian drone text uses LTE network to deliver defibrillators*. Available at: <https://www.ericsson.com/en/news/2019/10/defibrillators-delivered-via-lte-enabled-drones-in-canada>
- [195] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2018, May): *Deliverable 7.1: "Planning and Demonstration for Network Services: Use Case 3"*. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [196] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2019, April): *Deliverable 7.2: "Prototypes of Network Services and Integration Planning for Use Case 3"*. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [197] 5G ESSENCE (Embedded Network Service for 5G Experiences) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement No.761592 (2019, November): *Deliverable 7.3: "Integrated Pilot and Evaluation Report for Use Case 3"*. Available at: <https://www.5g-essence-h2020.eu/Deliverables.aspx>
- [198] Harmon, R.R., Cadro-Leon, E.G., and Bhide, S. (2015, August): *Smart cities and the Internet of Things*. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), pp.485-494, doi: 10.1109/PICMET.2015.7273174.
- [199] Kaluarachchi, Y. (2022, March): *Implementing Data-Driven SMART City Applications for Future Cities*. *Smart Cities*, vol.5, no.2, pp.455-474, <https://doi.org/10.3390/smartcities5020025>.
- [200] Mora, L., Bolici, R., and Deakin, M. (2017, March): *The First Two Decades of Smart-City Research: A Bibliometric Analysis*. *Journal of Urban Technology*, vol.24, no.2, pp.3-27, doi: 10.1080/10630732.2017.1285123.
- [201] Woetzel, J., Remes, J., Boland, B., Lv, K., Sinha, S., Strube, G., Means, J., Law, J., Cadena, A., and Von Der Tann, V. (2018): *Smart Cities: Digital Solutions for a More Livable Future*. McKinsey & Company, Boston, MA, USA.
- [202] Moir, E., Moonen, T., and Clerk, G. (2014): *What are Future Cities? Origins, Meanings and Uses*. Government Office for Science, London, UK. Available at:

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/337549/14-820-what-are-future-cities.pdf

- [203] Desouza, K.C., Hunter, M., Jacob, B., and Yigitcanlar, T. (2020, September): **Pathways to the making of prosperous smart cities: An exploratory study on the best practice**. *Journal of Urban Technology*, vol.27, issue 3, pp.3-32, <https://doi.org/10.1080/10630732.2020.1807251>.
- [204] West, D.M. (2016, December): **Achieving Sustainability in a 5G World**. Available at: https://www.brookings.edu/wpcontent/uploads/2016/11/gs_20161201_smartcities_paper.pdf.
- [205] Chen, H., Yuan, L., and Jing, G. (2020, October): **5G Boosting Smart Cities Development**. In: *Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM)*, pp.154-157, doi: 10.1109/AIAM50918.2020.00038.
- [206] Shehab, M.J., Kassem, I., Kutty, A.A., Kucukvar, M., Onat, N., and Khattab T. (2022, January): **5G Networks Towards Smart and Sustainable Cities: A Review of Recent Developments, Applications and Future Perspectives**. *IEEE Access*, vol.10, pp.2987-3006, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3139436.
- [207] Mendoza, J.J.I., Campoverde, M.J.I., Lima, D.R.M., Jumbo, R.M.S., and Conde-Zhingre, L.E. (2022, June): **The 5G Mobile Network and Its Contribution Towards Smart Cities**. In: *Proceedings of the 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, pp.1-7, doi: 10.23919/CISTI54924.2022.9820204.
- [208] Mouftah, H.T., Erol-Kantarci, M., and Rehmani, M.H. (2018, October): **5G and D2D Communications at the Service of Smart Cities**. In: *Transportation and Power Grid in Smart Cities: Communication Networks and Services*, Wiley, 2019, pp.147-169, doi: 10.1002/9781119360124.ch5.
- [209] Albino, V., Berardi, U., and Dangelico, R.M. (2015, February): **Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives**. *Journal of Urban Technology*, vol.22, no.1, pp.3-21, doi: 10.1080/10630732.2014.942092
- [210] Alkandari, A., Alnasheet, M., and Alshekhly, I.F. (2012, January): **Smart Cities: Survey**. *Journal of Advanced Computer Science and Technology Research*, vol.2, no.2, pp.79-90. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268423317_Smart_Cities_Survey.
- [211] 5G-DRIVE (“5G Harmonised Research and trials for service Evolution between EU and China”) H2020 Project, Grant Agreement No.814956, <https://5g-drive.eu/>.
- [212] 5G-DRIVE (5G Harmonised Research and trials for service Evolution between EU and China) H2020 Project, Grant Agreement No.814956 (2021, March): **Deliverable 2.3: “Final report of Architecture and Use Case Implementation”**. Available at: <https://5g-drive.eu/resources-and-results/project-deliverables/#1550748879645-81a6ae86-b82a>.
- [213] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Lazaridis, P., Zaharis, Z., Kourtis, M.-A., Kuklinski, S. Tomazewski, L., Arvanitosis, D., and Kostopoulos, A. (2021, June): **V2X Communications for the Support of GLOSA and Intelligent Intersection Applications**. In: I. Maglogiannis, J.

Macintyre and L. Iliadis. (Eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI) 2021 IFIP WG 12.5 International Workshops: 5G-PINE 2021, AI-BIO 2021, DAAI 2021, DARE 2021, EEAI 2021 and MHDW 2021; IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.628, pp.138-152. Springer Nature Switzerland AG, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79157-5_13.

- [214] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2020, November): **ETSI TS 103 723 V1.2.1 (2020-11): “Intelligent Transport Systems (ITS); Profile for LTE-V2X Direct Communication”**. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103700_103799/103723/01.02.01_60/ts_103723v010201p.pdf
- [215] European Commission (2016, November): **Communication on “A European strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility”, COM(2016) 766 final, 30.11.2016**. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0766>.
- [216] Global System for Mobile Communications Association (GSMA) (2019): **Connecting Vehicles - Today and In the 5G Era with C-V2X - White Paper 2019**. Available at: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2019/08/Connecting-Vehicles-Today-and-in-the-5G-Era-with-C-V2X.pdf>
- [217] Shrivastava, P., Ashai, S., Jaroli, A., and Gohil, S. (2012, July-August): **Vehicle-to-Road-Side-Unit Communication Using WiMAX**. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol.2, issue 4, pp.1653-1655. Available at: https://www.ijera.com/papers/Vol2_issue4/JN2416531655.pdf
- [218] Kaiwartya, O., Abdullah, A.H., Cao, Y., Altameem, A., Prasad, M., Lin, C.-T., and Liu, X. (2016, September): **Internet of vehicles: Motivation, layered architecture, network model, challenges, and future aspects**. *IEEE Access*, vol.4, pp.5356-5373, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2603219.
- [219] Wang, J., Shao, Y., Ge, Y., and Yu, R. (2019, January): **A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing**. *Sensors 2019*, vol.19, no.2, p.334, <https://doi.org/10.3390/s19020334>
- [220] Molina-Masegosa, R., and Gozalvez, J. (2017, December): **LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications**. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.12, no.4, pp.30-39, doi: 10.1109/MVT.2017.2752798.
- [221] Mei, J., Zheng, K., Zhao, L., Teng, Y., and Wang, X. (2018, March): **A latency and reliability guaranteed resource allocation scheme for LTE V2V communication systems**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.17, no.6, pp.3850-3860, doi: 10.1109/TWC.2018.2816942.
- [222] Vinel, A., Lan, L., and Lyamin, N. (2015, August): **Vehicle-to-vehicle communication in C-ACC/platooning scenarios**. *IEEE Communications Magazine*, vol.53, no.8, pp.192-197, doi: 10.1109/MCOM.2015.7180527.
- [223] Tahir, M.N., Mäenpää, K., and Hippel, M. (2020, September): **Pedestrian Motion Detection & Pedestrian Communication (P2I & V2P)**. In: Proceedings of the 2020 International

Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), pp.1-3, doi: 10.23919/SoftCOM50211.2020.9238338.

- [224] He, S., Li, J., and Qiu, T.Z. (2017, January): **Vehicle-to-Pedestrian Communication Modeling and Collision Avoiding Method in Connected Vehicle Environment**. *Transportation Research Record*, vol.2621, no.1, pp.21-30. Available at: <https://doi.org/10.3141/2621-03>.
- [225] Alalewi, A., Dayoub, I., and Cherkaoui, S. (2021, July): **On 5G-V2X Use Cases and Enabling Technologies: A Comprehensive Survey**. *IEEE Access*, vol. 9, pp.107710-107737, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3100472.
- [226] Naik, G., Choudhury, B., and Park, J.-M. (2019, May): **IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications**. *IEEE Access*, vol.7, pp.70169-70184, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
- [227] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kostopoulos, A., Agapiou, G., Lazaridis, P.I., Zacharis, Z.D., Chen, T., Dardamanis, A., Kourtis, M.-A., Agapiou, M., Herzog, U., and Ladid, L. (2021): **C-V2X Communications for the Support of Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Use Case**. *Journal of Telecommunications and Information Technology (JTIT) 2/2021*; pp.93-106, doi: 10.26636/jtit.2021.152321.
- [228] Imran, I.M., Alzarrad, M.A., Wolfe, K., and Miah S. (2020, January): **Small-Cell Installation in Transportation Infrastructure - A Literature Review**. Illinois Centre of Transportation, Available at: <https://apps.ict.illinois.edu/projects/getfile.asp?id=9079>.
- [229] Lasier, D., & VanDonkelaar, J. (2017): **Small cell communications pole, system, and method. United States Patent No. US 9.837.698 B2**. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/95/5e/a8/7aa98470ca0307/US9837698.pdf>.
- [230] Adedoyin, M.A., and Falowo, O.E. (2020, January): **Combination of Ultra-Dense Networks and Other 5G Enabling Technologies: A Survey**. *IEEE Access*, vol.8, pp.22893-22932, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969980.
- [231] Elberg, E.W.R. (2017): **Smart street lighting as a smart city platform applications and connectivity best practices**. Navigant Research. Available at: <https://en.sekorm.com/doc/2187681.html>.
- [232] Gholampooryazdi, B., Hämmäinen, H., Vijay, S. and Savisalo, A. (2017, November): **Scenario planning for 5G light poles in smart cities**. In: *Proceedings of the 2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*, pp. 1-7, doi: 10.1109/CTTE.2017.8260984.
- [233] Lapham, J. (2015, July): **Street Light Small Cells Revolution in Mobile Operator Network Economics**. Signal Research Group. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/street-light-small-cells-revolution-mobile-operator-james/>.
- [234] Grandinetti, P., Canudas-de-Wit, C., and Garin, F. (2019, May): **Distributed Optimal Traffic Lights Design for Large-Scale Urban Networks**. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.27, no.3, pp.950-963, doi: 10.1109/TCST.2018.2807792.

- [235] National League of Cities (NLC) (2018): **Small Cell Wireless Technology in Cities**. Available at: https://www.nlc.org/wp-content/uploads/2018/08/CS_SmallCell_M_AG_FINAL.pdf.
- [236] SESAME (“Small Cells coordinAtion for Multi-tenancy and Edge services”) H2020/5G-PPP Project, Grant Agreement (GA) No.671596, <https://5g-ppp.eu/sesame/>.
- [237] MarketsandMarkets (2019, February): **Small Cell 5G Network Market**. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/small-cell-market-216204568.html>.
- [238] Small Cell Forum (SFC) (2016, May): **Small Cell Deployments Market Status Report**.
- [239] Small Cell Forum (SFC) (2016, February): **Multi-operator market drivers. (Document number SFC017)**. Available at: <https://scf.io/en/documents/017 - Multi-Operator Market Drivers.php>.
- [240] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kourtis, A., Giannoulakis, I., Kourtis, M.-A., Kafetzakis, E., Vasilaki, E., Agapiou, M., and Iosifidis, M. (2018, May): **Enhancing Network Management via NFV, MEC, Cloud Computing and Cognitive Features: The “5G ESSENCE” Modern Architectural Approach**. In: Iliadis L., Maglogiannis I. and Plagianakos, V. (Eds.) *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI) 2018, IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.520, pp.1-12. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-92016-0_5.
- [241] Chochliouros, I.P., Giannoulakis, I., Spiliopoulou, A.S., Belesiotti, M., Sfakianakis, E., Kostopoulos, A. and Kourtis, A. (2017, June): **A novel architectural concept for enhanced 5G network facilities**. In: *MATEC Web of Conferences, CSCC-2017*, vol.125, no.03012, pp.1-7, doi: 10.1051/mateconf/20171250.
- [242] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2014, December): **NFV Management and Orchestration - An Overview, GS NFV-MAN 001 v1.1.1**. ETSI, https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv-man/001_099/001/01.01.01_60/gs_nfv-man001v010101p.pdf.
- [243] Small Cell Forum (SCF) (2016, June): **Small Cells and 5G Evolution: A Topic Brief. (Document number SFC055)**. Available at: http://scf.io/en/documents/055_Small_cells_and_5G_evolution_a_topic_brief.php.
- [244] Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Agapiou, G., Belesiotti, M., Kourtis, M.-A., Iosifidis, M., Agapiou, M., and Lazaridis, P. (2019, May): **Inclusion of Telemetry and Data Analytics in the Context of the 5G ESSENCE Architectural Approach**. In: J. MacIntyre, I. Maglogiannis, L. Iliadis and E. Pimenidis. (Eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI) 2019 IFIP WG 12.5 International Workshops: MHDW and 5G-PINE 2019, IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT)*, vol.560, pp.46-59, Springer Nature Switzerland AG, doi: 10.1007/978-3-030-19909-8_4.