



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διαμοιρασμός Πόρων ως Υπηρεσία : Τεχνικές Προκλήσεις
και Λύσεις για Ασύρματα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς**

Διονυσία Π. Καλογεροπούλου

Επιβλέπων: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διαμοιρασμός Πόρων ως Υπηρεσία : Τεχνικές Προκλήσεις και Λύσεις για Ασύρματα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς

Διονυσία Π. Καλογεροπούλου

A.M.: ΜΟΠ414

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

Νοέμβριος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αναμενόμενη «έκρηξη» στην κίνηση δεδομένων που προέρχονται από ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, σε συνδυασμό με τη μετάβαση σε έναν «IoT κόσμο», καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη μίας νέας γενιάς δικτύων προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ολοένα αναδυόμενες ανάγκες των χρηστών. Το όραμα για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) θέτει στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος την ικανοποίηση τριών βασικών απαιτήσεων: την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ρυθμοαπόδοσης (throughput), την επίτευξη της ελάχιστης δυνατής καθυστέρησης (latency) και την παράλληλη εξυπηρέτηση μεγάλου όγκου συνδέσεων. Στην ικανοποίηση των εν λόγω απαιτήσεων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο η προτυποποίηση, η αρχιτεκτονική και οι τεχνολογίες δικτύου που θα υιοθετηθούν στα νέα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Ωστόσο, παράλληλα σημαντικό παράγοντα αποτελεί η αναγνώριση των αδυναμιών που φέρουν τα συστήματα προηγούμενων γενεών και η αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Το πρόβλημα των αναξιοποίητων δικτυακών πόρων έχει αναγνωριστεί από την επιστημονική κοινότητα και ήδη μελετώνται προτάσεις για την διευθέτησή του.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται μία εκτενής επισκόπηση των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 5^{ης} γενιάς (5G), ενώ στην πορεία μελετάται το ζήτημα της αποτελεσματικής κατανομής δικτυακών πόρων και προτείνεται ένα νέο πρωτόκολλο για τη διευθέτησή του. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά μελετώνται τα κίνητρα ανάπτυξης των 5G δικτύων, η πορεία προς την προτυποποίησή τους και οι απαιτήσεις που τίθενται. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται περιγραφή των ενδεχόμενων σεναρίων αρχιτεκτονικής, καθώς επίσης και των επικρατέστερων τεχνολογιών για την υποστήριξη της. Το κομμάτι της επισκόπησης της νέας γενιάς δικτύων ολοκληρώνεται με μία σύντομη αναφορά στα χρηματοδοτούμενα από την Ευρωπαϊκή Ένωση ερευνητικά προγράμματα που έχουν ως στόχο την διερεύνηση σχετικών λύσεων για τα επερχόμενα συστήματα. Στη συνέχεια τίθεται στο προσκήνιο το πρόβλημα ύπαρξης αναξιοποίητων ράδιο-πόρων και αναγνωρίζεται η ανάγκη για το διαμοιρασμό τους μεταξύ διαφορετικών παρόχων. Αφού γίνει μία σύντομη αναφορά σε υπάρχουσες σχετικές μελέτες, παρουσιάζεται εκτενώς το πρωτόκολλο «Διαμοιρασμού ράδιο-πόρων με Network-Centric προσέγγιση», το οποίο θέτει το τεχνολογικό υπόβαθρο για το πρωτόκολλο που προτείνεται μέσω της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται μία εναλλακτική σχεδίαση για το προαναφερθέν πρωτόκολλο, η οποία φέρει τον τίτλο «Διαμοιρασμός ράδιο-πόρων με Device-Centric προσέγγιση». Αφού πραγματοποιηθεί εκτενής παρουσίαση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, λαμβάνει χώρα μία σύγκριση μεταξύ της Network-Centric και Device-Centric προσέγγισης. Στη συνέχεια, αναγνωρίζονται οι πτυχές του θέματος διαμοιρασμού των ράδιο-πόρων που χρήζουν περαιτέρω επιστημονικής μελέτης. Τέλος, πραγματοποιείται προσομοίωση δικτύου με χρήση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου και αναλύονται τα αποτελέσματα της.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα κινητών επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Συστήματα επικοινωνιών πέμπτης γενιάς, Διαμοιρασμός ραδιο-πόρων, Δικτύωση βασισμένη στο λογισμικό, Προσέγγιση από την πλευρά του δικτύου, Προσέγγιση από την πλευρά της συσκευής, Προσομοίωση Δικτύου

ABSTRACT

The expected explosive increase in demand for wireless broadband services in combination with the Internet of Things (IoT) society, necessitates the development of a new network generation to meet the ever-emerging user needs. The 5th generation (5G) networks vision places under the spotlight three basic requirements that have to be met: the maximum possible throughput, the minimum possible latency and the support of massive device connectivity. Standardization, network architecture and network technologies play an important role in satisfying the aforementioned requirements. However, it is essential to identify the weaknesses of the previous generation systems and cope with them by proceeding with all the necessary improvements. The problem of unused network resources has been detected by the scientific community and there are already some proposals for tackling it.

As part of this thesis, an extensive review of the 5th generation mobile communications systems (5G) is carried out, while the issue of the efficient network resources allocation follows along with a new protocol proposal for its addressing. More specifically, the motivation for the 5G systems development, the standardization timeline and the requirements posed are first studied. Moreover, some possible architecture scenarios and the technologies that aim to be used in order to support them are examined as well. At the end of this review, we proceed with presenting the projects funded by the European Union for research in the 5G development filed. Subsequently, the problem of unused radio resources is set in the spotlight and the need for radio resource sharing between different network operators is pointed out. Having presented some relevant studies, we analyze the "Radio Resource Sharing with Network-Centric Approach" protocol, which sets the technical base and the idea of the new protocol that we introduce through this thesis. More specifically, an alternative approach regarding the aforementioned protocol is the "Radio Resource Sharing with Device-Centric Approach". After an extensive presentation of the new proposed protocol, a comparative analysis between Network-Centric and Device-Centric approaches takes place. Then, the radio resource sharing aspects that need further investigation and scientific research in the future are recognized. We end up with a network simulation based on the proposed protocol usage and proceed with a result analysis.

SUBJECT AREA: Mobile communications Networks

KEYWORDS: 5G Communication Systems, Radio Resource Sharing, Software Defined Networking (SDN), Network-centric approach, Device-centric approach, Network Simulation

Στην οικογένεια και τους φίλους μου για όλη τη στήριξη και την υπομονή τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Λάζαρο Μεράκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη του συγκεκριμένου θέματος εργασίας, καθώς επίσης και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθόλη τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Στη συνέχεια, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο δόκτορα Διονύση Ξενάκη για τη συνεχή καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία μας κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Salvatore Costanzo και τον δόκτορα Stefano Tennina για την υποστήριξη τους στο πειραματικό τμήμα, καθώς και τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Μαρία-Ευγενία Ξεζωνάκη για τη συνεργασία μας στο θεωρητικό κομμάτι.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	17
1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 5^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ (5G)	18
1.1 Εισαγωγή	18
1.1.1 Κίνητρα ανάπτυξης συστημάτων 5 ^{ης} γενιάς	18
1.1.2 Απαιτήσεις συστημάτων 5 ^{ης} γενιάς	24
1.2 Προτυποποίηση συστημάτων 5ης γενιάς	27
1.2.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU)	27
1.2.4 Ρυθμίσεις Φάσματος	29
1.2.5 Ερευνητικές ομάδες ανάπτυξης τεχνολογιών 5 ^{ης} γενιάς (5G)	30
1.2.6 Προκλήσεις	31
1.3 Αρχιτεκτονική συστημάτων 5^{ης} γενιάς	31
1.3.1 Τεχνολογίες συστημάτων 5 ^{ης} γενιάς	31
1.3.2 Σενάρια Αρχιτεκτονικής	34
1.3.2.1 Επισκόπηση των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών και λύσεων	35
1.3.2.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου	37
1.3.2.3 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην κεντρική διαχείριση πόρων και στις ετερογενείς τεχνολογίες	39
1.3.2.4 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου	41
1.3.3 Επίπεδα OSI συστημάτων 5ης γενιάς	43
1.3.4 Φάσμα Συχνότητων	45
1.4 Ανάλυση Κυρίαρχων Τεχνολογιών	48
1.4.1 mmWave	48
1.4.1.1 Ορισμός και Αναγκαιότητα	48
1.4.1.2 Δομή Συστημάτων mmWave	49
1.4.1.3 Πλεονεκτήματα mmWave	50
1.4.1.4 Προκλήσεις mmWave	50
1.4.2 Massive MIMO	53
1.4.2.1 Ορισμός	53
1.4.2.2 Πλεονεκτήματα Massive MIMO	54
1.4.2.3 Προκλήσεις Massive MIMO	56
1.4.3 Network Function Virtualization – NFV	58
1.4.3.1 Ορισμός	59
1.4.3.2 Αρχιτεκτονική NFV	60
1.4.3.3 Σενάρια Χρήσης	62

1.4.3.4	Οφέλη και προκλήσεις υιοθέτησης της NFV τεχνολογίας	63
1.4.4	Software Defined Networking – SDN	64
1.4.4.1	Ορισμός	65
1.4.4.2	Αρχιτεκτονική SDN	66
1.4.4.3	Το πρωτόκολλο Openflow	67
1.4.4.4	Σενάρια Χρήσης	68
1.4.4.5	Πλεονεκτήματα της SDN Αρχιτεκτονικής	69
1.4.4.6	Προκλήσεις	70
1.5	Χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα για την ανάπτυξη συστημάτων 5ης γενιάς.....	71
1.5.1	Horizon 2020	72
1.5.2	CROWD	73
1.5.3	TROPIC	74
1.5.4	METIS 2020	75
1.5.5	iJOIN	77
1.5.6	MOBILE CLOUD NETWORKING	77
1.5.7	PHYLAWS.....	78
1.5.8	COMBO	79
2.	ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΣ ΡΑΔΙΟ-ΠΟΡΩΝ ΜΕ NETWORK-CENTRIC ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	81
2.1	Ανάγκη για Διαμοιρασμό Ραδιο-πόρων μεταξύ διαφορετικών παρόχων	81
2.2	Σχετικές μελέτες.....	83
2.3	Παρουσίαση της υπάρχουσας network-centric προσέγγισης	86
2.3.1	Η υπάρχουσα πρόταση για τη δομή της αρχιτεκτονικής του δικτύου [79].....	86
2.3.2	Η ροή της σηματοδοσίας στη network-centric προσέγγιση.....	91
2.3.3	Στάδια απόφασης και ελέγχου στη ροή σηματοδοσίας της [79]	93
2.3.3.1	Φάση ενεργοποίησης (NV Triggering Phase)	94
2.3.3.2	Φάση απόφασης για το κατάλληλο σημείο σύνδεσης (NV Decision Phase)	95
2.3.3.3	Φάση παρακολούθησης SLA (SLA Monitor Phase)	96
2.3.3.4	Φάση αποδοχής συνδέσεων (NV Admission Control Phase)	96
3.	ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΣ ΡΑΔΙΟ-ΠΟΡΩΝ ΜΕ DEVICE-CENTRIC ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	97
3.1	Ανάγκη για μετάβαση σε device-centric προσέγγιση.....	97
3.2	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου για τη device-centric προσέγγιση.....	98
3.3	Ροή σηματοδοσίας στη device-centric προσέγγιση.....	101

3.4	Βασικά στάδια σηματοδότησης της device-centric προσέγγισης	105
3.4.1	Φάση παρακολούθησης SLA (NV SLA Monitor Phase)	105
3.4.2	Φάση ενεργοποίησης (NV Triggering Phase).....	106
3.4.3	Φάση απόφασης για το κατάλληλο σημείο σύνδεσης (NV Decision Phase).....	106
3.4.4	Φάση επιλογής id για τον UE (Id selection Phase).....	107
3.5	Βελτιστοποιήσεις στην προτεινόμενη σηματοδότηση	107
3.6	Συγκριτική ανάλυση των network-centric και device-centric προσεγγίσεων για το διαμοιρασμό ραδιο- πόρων	111
3.7	Ανοιχτές προκλήσεις και θέματα για μελλοντική έρευνα	113
3.7.1	Αυθεντικοποίηση, Αδειοδοτήσεις και Πολιτικές Χρέωσης (Authentication, Authorization and Accounting – AAA).....	114
3.7.2	Παρακολούθηση των SLAs.....	114
3.7.3	Προσαρμογή χρεώσεων φάσματος σε πραγματικό χρόνο – «Δημοπρασία» Φάσματος (Spectrum Auction) 115	115
3.7.4	Παρακολούθηση και έλεγχος μετρήσεων	115
3.7.5	Τεχνικές ενίσχυσης χρήσης SDN (SDN Enforcement Techniques)	115
3.7.6	Έλεγχος αποδοχής συνδέσεων με SDN (SDN-Aware Admission Control)	116
3.7.7	Σηματοδότηση από άκρο σε άκρο και βελτιστοποίηση.....	116
3.7.8	Θέματα ασφάλειας	116
3.7.9	Διάρκεια ζωής μπαταρίας UE	117
4.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 5G ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΥ ΡΑΔΙΟ-ΠΟΡΩΝ.....	118
4.1	Αρχιτεκτονική και Στοιχεία Δικτύου προσομοίωσης.....	118
4.2	Βασικές Τεχνικές Λεπτομέρειες Προσομοίωσης	120
4.3	Μέρος Α - Προσομοίωση με μεταβαλλόμενο φόρτο κυψέλης.....	120
4.4	Μέρος Β - Προσομοίωση με μεταβαλλόμενη πυκνότητα δικτύου	131
4.5	Γενικά Συμπεράσματα Προσομοίωσης	137
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	139
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	141
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	144

ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	150
----------------------	------------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4.1: Μέσω throughput για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου Α, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	121
Σχήμα 4.2: Κέρδη ως προς το μέσο throughput για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου Α, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης....	122
Σχήμα 4.3: Μέσω throughput για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	123
Σχήμα 4.4: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου Α, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	124
Σχήμα 4.5: Κέρδη ως προς το μέσο throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου Α, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	124
Σχήμα 4.6: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου Β, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	125
Σχήμα 4.7: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	126
Σχήμα 4.8: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου Α, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης....	127
Σχήμα 4.9: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	128
Σχήμα 4.10: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Α, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	129
Σχήμα 4.11: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Β, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	130
Σχήμα 4.12: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης.....	130
Σχήμα 4.13: Μέσω throughput για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου Α, αυξανόμενης της πυκνότητας δικτύου	132
Σχήμα 4.14: Μέσω throughput για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανόμενης της πυκνότητας δικτύου	132

Σχήμα 4.15: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου A, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου	133
Σχήμα 4.16: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου A, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου	134
Σχήμα 4.17: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs του Παρόχου A που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων B και Γ, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου.....	135
Σχήμα 4.18: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου A, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου	135
Σχήμα 4.19: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου B, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου	136
Σχήμα 4.20: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Γ, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου	136

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Πρόβλεψη της Cisco για την κίνηση δεδομένων κινητής μηνιαίως έως το 2019 [4].....	19
Εικόνα 1.2: Επίδραση της αύξησης των έξυπνων συσκευών και συνδέσεων στην κίνηση δεδομένων, σύμφωνα με τη Cisco [4].....	20
Εικόνα 1.3: Η χρήση του video θα αποτελεί περισσότερο από 69% της κίνησης δεδομένων έως το 2019 , σύμφωνα με τη Cisco [4]	21
Εικόνα 1.4: Οι εφαρμογές Cloud θα αντιστοιχούν στο 90% της κίνησης δεδομένων κινητής έως το 2019, σύμφωνα με τη Cisco [4]	22
Εικόνα 1.5: Μία σχηματική αναπαράσταση του Internet of Everything, σύμφωνα με τη Cisco [4].....	23
Εικόνα 1.6: Οι περιπτώσεις χρήσης των συστημάτων 5G και οι κυριότερες αντίστοιχες προκλήσεις [13]	27
Εικόνα 1.7: Παράμετροι ικανοποίησης IMT-2020 [58]	29
Εικόνα 1.8: πεδία έρευνας της 5G τεχνολογίας δικτύων [59]	31
Εικόνα 1.9: Τα συστήματα 5G θα βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες συστημάτων επικοινωνιών παλαιότερων γενεών	34
Εικόνα 1.10: Ετερογενές δίκτυο τριών βαθμίδων που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό μακροκυψελών, πικοκυψελών και φεμπτοκυψελών ως σταθμούς βάσης [8]	36
Εικόνα 1.11: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής όπου ένα τερματικό έχει πρόσβαση σε τέσσερις διαφορετικές RAT [14].....	37
Εικόνα 1.12: Η δομή ενός Ultra Dense Network, και οι διάφορες επιπρόσθετες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί [25]	38
Εικόνα 1.13: Η δομή μίας αρχιτεκτονικής βασισμένης σε κεντρική διαχείριση δεδομένων (URM), και οι διάφορες επιπρόσθετες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί [25]	40
Εικόνα 1.14: Η δομή μίας αρχιτεκτονικής βασισμένης σε εικονικοποίηση του δικτύου [25]	41
Εικόνα 1.15: Σύγκριση των επιπέδων του μοντέλου OSI με τη στοίβα πρωτοκόλλων του 5G [11].....	45

Εικόνα 1.16: Η χρήση του φάσματος από 10 GHz έως τα 100 GHz θα γίνει απαραίτητη στα επόμενα έτη [13]	46
Εικόνα 1.17: Χρήση του φάσματος στις ζώνες cmWave και mmWave για την τεχνολογία 5G.....	47
Εικόνα 1.18: Η μορφή ενός κυψελωτού συστήματος mmWave [36].....	49
Εικόνα 1.19: Η ετερογένεια που θα παρουσιάζουν στη δομή τους τα δίκτυα mmWave [33]	49
Εικόνα 1.20: Οι υπολογισμένες συνδέσεις των σταθμών βάσης με πραγματικές τοποθεσίες κτιρίων [7]	51
Εικόνα 1.21: Κάλυψη mmWave σε εξωτερικό χώρο παρόμοιο με γήπεδο ή στάδιο [7].	52
Εικόνα 1.22: Σύγκριση ρυθμού δεδομένων κυψελών για μία εφαρμογή Massive MIMO [40]	54
Εικόνα 1.23: Οι υπηρεσίες Massive MIMO που προσφέρονται στους χρήστες χρησιμοποιώντας 2048, 4096 και 8192 διατάξεις κεραιών (Antenna Arrays – AA) [40]	56
Εικόνα 1.24: Μοντελοποίηση συστήματος Massive MIMO με k χρήστες και N σταθμούς βάσης [42]	57
Εικόνα 1.25: Η μορφή των συστημάτων 5G όπως αναμένεται να διαμορφωθεί με τη χρήση της τεχνολογίας massive MIMO [37].....	58
Εικόνα 1.26: Δικτυακές συσκευές σε σενάριο κλασσικού και NFV δικτύου [52].....	59
Εικόνα 1.27: Αρχιτεκτονική NFV δικτύων [52]	60
Εικόνα 1.28: Αρχιτεκτονική SDN [75].....	66
Εικόνα 1.29: Η θέση του Openflow στην Αρχιτεκτονική SDN [76]	68
Εικόνα 1.30: Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του CROWD [47]	74
Εικόνα 1.31: Το σύστημα που προτείνεται από το πρόγραμμα TROPIC [46]	75
Εικόνα 1.32: Η δομή του ερευνητικού προγράμματος METIS 2020, βασισμένη σε WP και σε HT [43]	76
Εικόνα 2.1: Πληθώρα χρηστών προσπαθεί να εξυπηρετηθεί από δικτυακό πάροχο	82
Εικόνα 2.2: Η υπάρχουσα δομή της αρχιτεκτονικής ενός ετερογενούς 5G δικτύου που εξετάζεται στην [79]	87

Εικόνα 2.3: Η δομή της αρχιτεκτονικής όπως αναμένεται να διαμορφωθεί σύμφωνα με την [79]	89
Εικόνα 2.4: Η ροή της σηματοδότησης στο μοντέλο διαμοιρασμού ραδιο-πόρων της network-centric προσέγγισης [79].....	94
Εικόνα 3.1: Η δομή της αρχιτεκτονικής όπως προτείνεται να διαμορφωθεί με προσέγγιση από την πλευρά της συσκευής.....	100
Εικόνα 3.2: Η προτεινόμενη ροή σηματοδότησης για τη device-centric προσέγγιση	103
Εικόνα 3.3: Η ροή της σηματοδότησης device-centric προσέγγισης με βελτιστοποιήσεις (optimized).....	111

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Σύνοψη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των network-centric και device-centric προσεγγίσεων για το διαμοιρασμό ραδιο-πόρων	113
Πίνακας 4.1: Δομικά στοιχεία επιμέρους δικτύων προσομοίωσης	118
Πίνακας 4.2: Μεταβλητές δικτύου προσομοίωσης	119
Πίνακας 4.3: Κέρδη ως προς τη μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου A, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης	127

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία διενεργήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο ΔΠΜΣ Οικονομική και Διοίκηση Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων.

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 5^{ης} ΓΕΝΙΑΣ (5G)

1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση της πορείας προς τα συστήματα κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς 5G, των οποίων η ανάπτυξη αποτελεί πλέον επιτακτική ανάγκη για το άμεσο μέλλον, προκειμένου να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Οι απαιτήσεις αυτές περιγράφονται παρακάτω, ενώ επίσης αναλύονται οι οργανισμοί προτυποποίησης των δικτύων πέμπτης γενιάς καθώς και ενδεχόμενες αρχιτεκτονικές που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν από τα συστήματα 5G. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τεχνολογίες πάνω στις οποίες θα μπορούσε να βασιστούν τα μελλοντικά αυτά δίκτυα που αναμένεται να διαμορφωθούν, ενώ τέλος αξιολογείται η έρευνα που έχει χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για προγράμματα μελέτης και ανάπτυξης συστημάτων πέμπτης γενιάς.

1.1.1 Κίνητρα ανάπτυξης συστημάτων 5^{ης} γενιάς

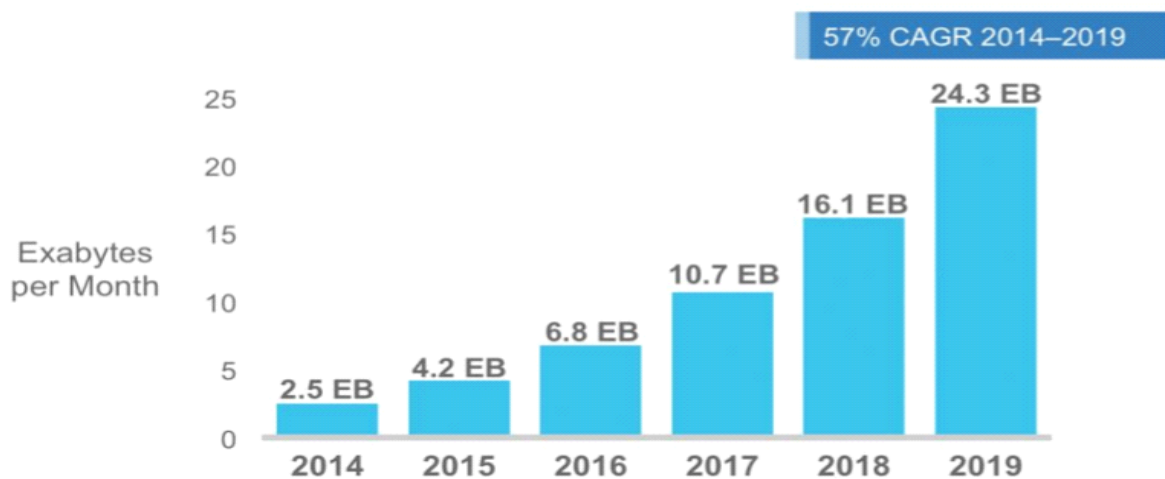
Η καινοτόμος και αποτελεσματική χρήση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (Information and Communication Technologies – ICT) καθίσταται όλο και πιο σημαντική στην κατεύθυνση βελτίωσης της παγκόσμιας οικονομίας [2], αφού η δυνατότητα της βιομηχανίας και των υπηρεσιών να ανταγωνίζονται και να εξελίσσονται εξαρτάται ολοένα και περισσότερο από αυτές [1]. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU), οι επενδύσεις σε ICTs μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην ανάκαμψη της οικονομίας, δεδομένων των ισχυρών εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν θετικά την οικονομία, των υψηλά πολλαπλασιαστικών κερδών ως ανταπόδοση των επενδύσεων, καθώς και των μειωμένων διαρροών [5]. Τα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι ενδεχομένως το πιο καθοριστικό στοιχείο στην παγκόσμια στρατηγική για τις ICTs, θέτοντας τα θεμέλια για πολλές άλλες βιομηχανίες. Είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους και πιο δυναμικούς τομείς παγκόσμια, λόγω της βελτίωσης που παρέχει στη δυνατότητα των ανθρώπων να επικοινωνούν μεταξύ τους [2].

Η εν λόγω επιτυχία των ασύρματων κινητών επικοινωνιών αντικατοπτρίζεται σε ταχύρρυθμα αναπτυσσόμενες τεχνολογικές καινοτομίες. Μέσα σε μόλις δύο δεκαετίες έγινε η μετάβαση από τα κινητά δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών τέταρτης γενιάς 4G - Long Term Evolution (4G - LTE) [3], τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν ρυθμούς δεδομένων έως 1 Gb/s για χαμηλή κινητικότητα και έως 100 Mb/s για υψηλή κινητικότητα. Τα συστήματα LTE και η εξέλιξή τους, δηλαδή τα συστήματα LTE-Advanced έχουν ήδη αναπτυχθεί και συνεχίζουν να εξελίσσονται παγκοσμίως [2]. Αξίζει να αναφέρουμε ότι σύμφωνα με τις ετήσιες αναφορές που εκδίδονται από τη Cisco, φαίνεται ότι περί το 2019, η τεχνολογία 4G θα ξεπεράσει τη χρήση των συνδέσεων 2G. Κάτι τέτοιο αναμένεται να συμβεί αφού, έχοντας από τη μία πλευρά τη ραγδαία εξάπλωση των εφαρμογών για κινητές συσκευές (mobile applications), την αναμενόμενη αύξηση των συνδέσεων στο Διαδίκτυο μέσω κινητών συσκευών, και από την άλλη πλευρά την ανάγκη για βέλτιστη διαχείριση του εύρους ζώνης και των υπόλοιπων πόρων του δικτύου, ευνοείται η ανάπτυξη και υιοθέτηση των 4G συστημάτων παγκοσμίως [4].

Εντούτοις, με την έκρηξη της κίνησης δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών, εγείρονται κάποιες προκλήσεις στις οποίες τα συστήματα 4G αδυνατούν να ανταποκριθούν. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την ανάγκη για μετάβαση σε μία τεχνολογία που θα ικανοποιεί τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου, υψηλότερη φασματική και ενεργειακή απόδοση και υψηλότερη κινητικότητα μέσω νέων ασύρματων εφαρμογών.

Φυσικά, η νέα τεχνολογία χρειάζεται να καλύψει και τις απαιτήσεις των ενσύρματων τμημάτων του δικτύου, στοχεύοντας σε μία πλήρως ολοκληρωμένη προσέγγιση. Το βήμα που αναμένεται να καλύψει τις παραπάνω απαιτήσεις θα είναι η τεχνολογία ασύρματων δικτύων επικοινωνιών πέμπτης γενιάς, 5G.

Βασιζόμενοι στις ετήσιες αναφορές της Cisco, έχουμε ποσοτικές αποδείξεις ότι η αλματώδης αύξηση της κίνησης των δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων είναι πραγματική και πρόκειται να συνεχιστεί [2]. Ήδη από το 2014, υπήρξε αύξηση στην κίνηση δεδομένων κατά ποσοστό 69% και αναμένεται να αυξηθεί στα 24.3 exabytes μηνιαίως μέχρι το 2019. Η κίνηση των δεδομένων κινητής θα ακολουθήσει συνολικό ετήσιο ρυθμό αύξησης (Compound Annual Growth Rate - CAGR) 57% από το 2014 έως το 2019 [4], όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



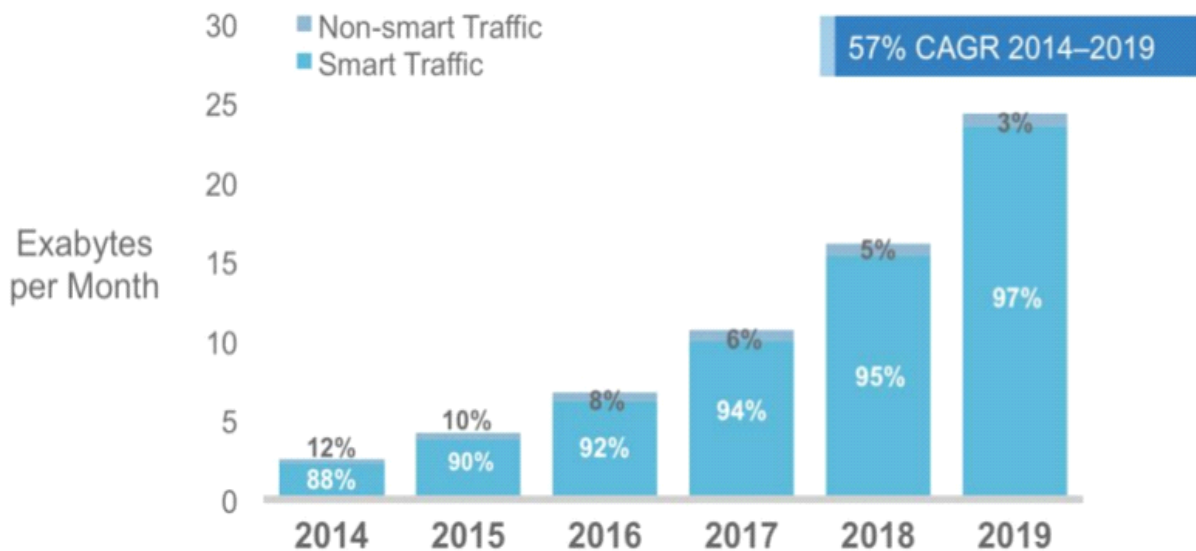
Εικόνα 1.1: Πρόβλεψη της Cisco για την κίνηση δεδομένων κινητής μηνιαίως έως το 2019 [4]

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην τελευταία αναφορά της Cisco (Φεβρουάριος 2015) φανερώουν επίσης την εκθετική αύξηση του αριθμού των συσκευών, η οποία θα συνεχιστεί στα επόμενα χρόνια. Υπάρχει μία θεαματική αύξηση στον αριθμό των χρηστών οι οποίοι γίνονται συνδρομητές σε κινητά ευρυζωνικά συστήματα κάθε χρόνο. Εξάλλου, ολοένα και περισσότεροι χρήστες επιζητούν γρηγορότερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο, πιο σύγχρονα κινητά τηλέφωνα και γενικά άμεση επικοινωνία με άλλους ανθρώπους και πρόσβαση σε πληροφορίες [2]. Κάθε έτος κάνουν την εμφάνισή τους στην αγορά αρκετές νέες συσκευές διαφόρων μορφών και με εξελιγμένες δυνατότητες και νοημοσύνη. Τα ισχυρότερα smartphones και laptops γίνονται πιο δημοφιλή στις μέρες μας, λόγω των επιπρόσθετων δυνατοτήτων πολυμέσων που διαθέτουν. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε μεγάλη αύξηση της παραγωγής και διάθεσης ασύρματων κινητών συσκευών και σχετικών υπηρεσιών. Επιπλέον, καθώς η χωρητικότητα των κινητών δικτύων βελτιώνεται και ο αριθμός των χρηστών με περισσότερες από μία συσκευές στην κατοχή τους αυξάνεται, οι πάροχοι είναι ολοένα και πιθανότερο να προσφέρουν πακέτα κινητής ευρυζωνικής συγκρίσιμα σε τιμή και ταχύτητα με αυτά της σταθερής ευρυζωνικής. Τα εν λόγω δεδομένα θα ενθαρρύνουν την αντικατάσταση της σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης από την κινητή ευρυζωνική, εκεί όπου η χρήση είναι ουσιαστικά υψηλότερη από το μέσο όρο [4].

Επιπροσθέτως, ο οργανισμός European Mobile Industry Observatory (EMO) κατέγραψε ότι έχει σημειωθεί ετήσια αύξηση στην κινητή ευρυζωνική από το 2006 κατά 92%. Έχει επίσης προβλεφθεί από τον παγκόσμιο οργανισμό Wireless World Research Forum (WWRF) ότι επτά τρισεκατομμύρια ασύρματες συσκευές θα εξυπηρετούν επτά δισεκατομμύρια χρηστών μέχρι το 2017. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι ο αριθμός των συνδέσεων σε δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών θα φτάσει χίλιες φορές τον παγκόσμιο

πληθυσμό [2], [5]. Σχεδόν μισό δισεκατομμύριο (497 εκατομμύρια) κινητές συσκευές και συνδέσεις προστέθηκαν το 2014, ενώ προβλέπεται ότι οι κινητές συσκευές και συνδέσεις θα αυξηθούν παγκοσμίως στα 11.5 δισεκατομμύρια έως το 2019 [4].

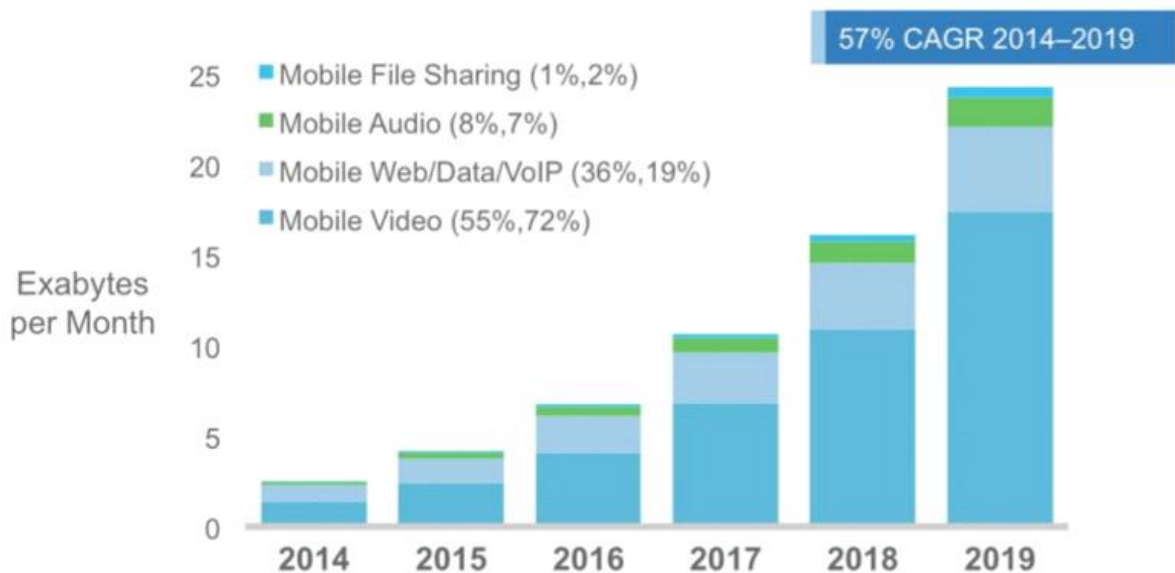
Η παρακάτω εικόνα δείχνει την επίπτωση της αύξησης των κινητών συσκευών και συνδέσεων στην παγκόσμια κίνηση δεδομένων. Συγκεκριμένα, η παγκόσμια κίνηση δεδομένων που θα προκληθεί από τις νέες έξυπνες συσκευές προβλέπεται να αυξηθεί από το 88% στο 97% έως το 2019.



Εικόνα 1.2: Επίδραση της αύξησης των έξυπνων συσκευών και συνδέσεων στην κίνηση δεδομένων, σύμφωνα με τη Cisco [4]

Αξιοσημείωτη είναι η κίνηση που μπορούν να προκαλέσουν αυτές οι νέου τύπου συσκευές αυξημένων δυνατοτήτων, των οποίων η χρήση εξαπλώνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Συγκεκριμένα, ένα μόνο smartphone μπορεί να δημιουργήσει τόση κίνηση όση και 37 τηλέφωνα βασικών λειτουργιών, ένα tablet τόση κίνηση όση και 94 τηλέφωνα βασικών λειτουργιών, ενώ ένας μόνο φορητός υπολογιστής (laptop) έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει τόση κίνηση όση 119 τέτοια τηλέφωνα [4].

Ένας άλλος παράγοντας εξαιρετικής σημασίας στην αύξηση της κίνησης δεδομένων τα επόμενα έτη είναι η ραγδαία αύξηση που θα σημειώσει η χρήση video, δεδομένων των υψηλότερων ρυθμών bit σε σχέση με άλλους τύπους εφαρμογών. Το video ήδη θεωρείται απαραίτητο από πολλούς χρήστες κινητών επικοινωνιών καθώς καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος της καθημερινότητας και των συνηθειών τους, με αποτέλεσμα να συνιστά τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην παγκόσμια κίνηση δεδομένων. Τα υψηλής ανάλυσης video αναμένεται να επικρατήσουν, ενώ παράλληλα η αναλογία του περιεχομένου που παρακολουθείται μέσω live streaming σε σύγκριση με το περιεχόμενο που μεταφορτώνεται αναμένεται να αυξηθεί. Το mobile video θα ακολουθήσει CAGR της τάξης του 66% μεταξύ του 2014 και του 2019. Πιο συγκεκριμένα, από το σύνολο των 24.3 exabytes μηνιαίως στο οποίο αναφέρθηκε ότι προβλέπεται να φτάσει η κίνηση δεδομένων έως το 2019, τα 17.4 exabytes αναμένεται να οφείλονται στη χρήση video, κάτι που υποδηλώνει ποσοστό μεγαλύτερο του 69% της συνολικής κίνησης [4].



Εικόνα 1.3: Η χρήση του video θα αποτελεί περισσότερο από 69% της κίνησης δεδομένων έως το 2019 , σύμφωνα με τη Cisco [4]

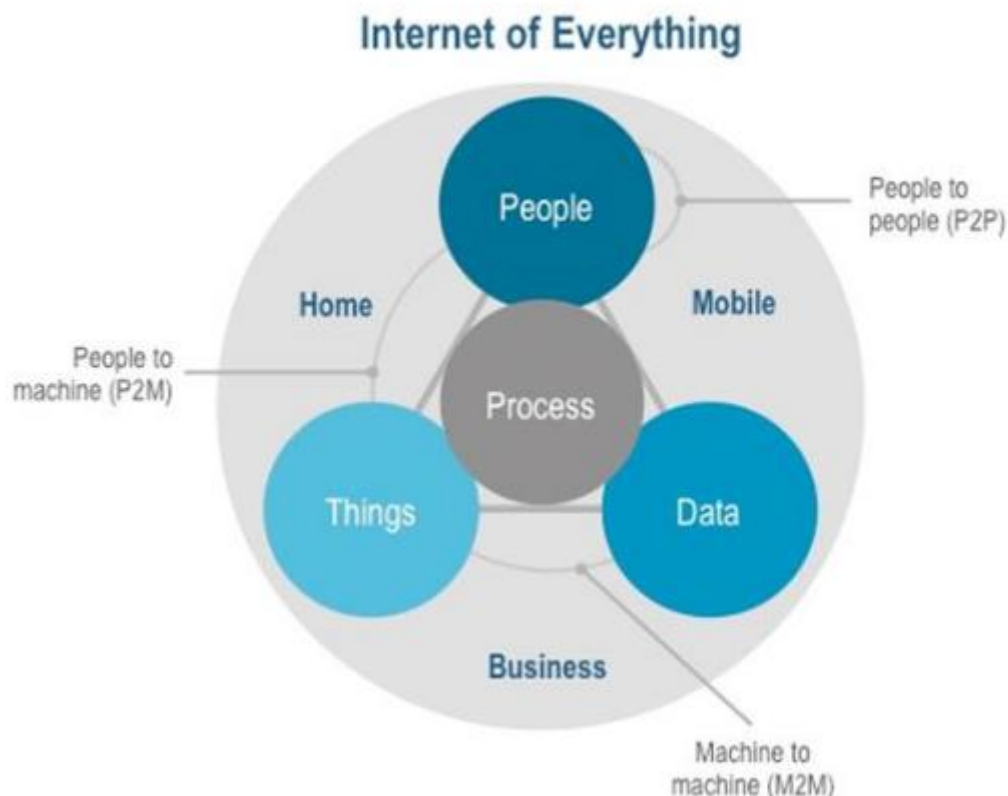
Δεδομένου ότι πολλές διαδικτυακές εφαρμογές video ανήκουν στην κατηγορία των εφαρμογών Cloud, η κίνηση Cloud ακολουθεί μία καμπύλη παρόμοια με του video και συνεπώς αναμένεται μία περαιτέρω αύξηση των εφαρμογών κινητής βασισμένων σε Cloud, οι οποίες παρουσιάζουν μοναδικά χαρακτηριστικά όσον αφορά στην καθυστέρηση και στο εύρος ζώνης. Σε αντίθεση με τις εφαρμογές και υπηρεσίες Cloud, οι κινητές συσκευές υπόκεινται σε περιορισμούς μνήμης και ταχύτητας, οι οποίοι αποτελούν τροχοπέδη για την παροχή πολυμεσικών εφαρμογών σε ικανοποιητικό βαθμό. Στην πραγματικότητα, οι πιο σύνθετες εφαρμογές (όπως αναγνώριση φωνής, navigation) συχνά μεταφορτώνονται σε έναν Cloud server, με σκοπό να απαλλαγθούν οι κινητές συσκευές από το βάρος της επεξεργασίας και το ενεργειακό κόστος. Οι εφαρμογές και υπηρεσίες Cloud (όπως το YouTube και το Spotify) επιτρέπουν στους χρήστες κινητής να ξεπεράσουν τους περιορισμούς της χωρητικότητας σε μνήμη και της ταχύτητας επεξεργασίας των κινητών συσκευών. Ενώ το γεγονός αυτό εξασφαλίζει αποτελεσματικά μεγαλύτερη λιτότητα στις λειτουργίες των smartphones ή των tablets, παράλληλα τονίζει την ανάγκη για μία αξιόπιστη, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι εφαρμογές Cloud υπολογίζεται να παράγουν έως και το 90% της συνολικής κίνησης δεδομένων κινητής παγκοσμίως έως το 2019 [4].



Εικόνα 1.4: Οι εφαρμογές Cloud θα αντιστοιχούν στο 90% της κίνησης δεδομένων κινητής έως το 2019, σύμφωνα με τη Cisco [4]

Ταυτόχρονα με την αυξανόμενη ζήτηση για video και εφαρμογές Cloud από τους χρήστες, πρόσφατα αρκετοί παγκόσμιοι πάροχοι κινητών επικοινωνιών ανακοίνωσαν την έναρξη διάθεσης της υπηρεσίας voice-over-Wi-Fi (VoWi-Fi). Η εν λόγω υπηρεσία μπορεί να προσφέρεται χωρίς να περιορίζεται από τις δυνατότητες υλικού της συσκευής, υπό την προϋπόθεση ότι η συσκευή διαθέτει ενεργοποιημένο Wi-Fi. Έτσι, το VoWi-Fi δύναται να είναι διαθέσιμο ακόμη και σε συσκευές χωρίς SIM, όπως τα Wi-Fi-only tablets.

Ένας ακόμη παράγοντας που οδηγεί στην αναγκαιότητα ανάπτυξης των συστημάτων επόμενης γενιάς 5G είναι οι προφανείς ενδείξεις αύξησης του Internet of Everything (IoE) και Internet of Things (IoT). Τα IoE και IoT αποτελούν ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων ή “πραγμάτων”, στα οποία ενσωματώνονται ηλεκτρονικά στοιχεία, λογισμικό, αισθητήρες και μονάδες συνδεσιμότητας, με σκοπό να επιτευχθεί υψηλότερης ποιότητας υπηρεσία ανταλλάσσοντας δεδομένα με τον κατασκευαστή, το διαχειριστή και/ή άλλες συνδεδεμένες συσκευές. Κάθε αντικείμενο είναι μοναδικά αναγνωρίσιμο μέσα από ένα ενσωματωμένο σε αυτό υπολογιστικό σύστημα και είναι ικανό να λειτουργεί μέσα στην ήδη υπάρχουσα υποδομή διαδικτύου. Το IoE επιτρέπει στους τελικούς χρήστες να έχουν πρόσβαση σε οποιοδήποτε περιεχόμενο και σε οποιαδήποτε συσκευή από οποιοδήποτε μέρος [4].



Εικόνα 1.5: Μία σχηματική αναπαράσταση του Internet of Everything, σύμφωνα με τη Cisco [4]

Υπάρχουν πολλές παράμετροι που ευνοούν την ανάπτυξη και εξάπλωση του IoE στην καθημερινότητα των χρηστών. Μία ξεκάθαρη ένδειξη της αύξησής του αποτελεί η χρήση των συνδέσεων μηχανής-προς-μηχανή (Machine-to-Machine - M2M). Ο όρος M2M αναφέρεται σε τεχνολογίες οι οποίες επιτρέπουν τόσο σε ασύρματα όσο και σε σταθερά συστήματα να επικοινωνούν με άλλες συσκευές του ίδιου τύπου [6]. Πιο συγκεκριμένα, M2M είναι η επικοινωνία μεταξύ μηχανών, η οποία επιτρέπει σε κάθε είδους συσκευές να μεταδίδουν πληροφορίες και να επικοινωνούν με κεντρικές εφαρμογές ελέγχου ή παροχής υπηρεσιών, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Οι συνδέσεις M2M χρησιμοποιούνται μέσα σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών σεναρίων, καθώς και σε σεναρία μεμονωμένων καταναλωτών. Παραδείγματα χρήσης της τεχνολογίας M2M είναι η διαχείριση εταιρικών πόρων, τα συστήματα συναλλαγών, οι συναγερμοί ασφαλείας που μπορούν να επικοινωνούν με τα κέντρα ελέγχου, οι ανελκυστήρες, οι εκτυπωτές, ο ιατρικός εξοπλισμός ελέγχου ασθενών από απόσταση. Οι δυνατότητες των M2M, όπως και των κινητών συσκευών, ακολουθούν μία εξέλιξη από τεχνολογίες 2G σε 4G τεχνολογίες.

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην ταχύρρυθμη υιοθέτηση του IoE είναι η εμφάνιση των wearable συσκευών, μία κατηγορία με υψηλή δυναμική και περιθώριο ανάπτυξης. Οι wearable συσκευές, όπως υπονοεί και το όνομά τους, είναι συσκευές οι οποίες μπορούν να φορεθούν από κάποιο άτομο και έχουν την ικανότητα να συνδέονται και να επικοινωνούν στο δίκτυο είτε απευθείας μέσω ενσωματωμένης κυψελωτής σύνδεσης, είτε μέσω άλλης συσκευής (κυρίως μέσω ενός smartphone) χρησιμοποιώντας Wi-Fi, Bluetooth, ή κάποια άλλη τεχνολογία.

Η τεχνολογία M2M αναδύεται ως παράγοντας - κλειδί για την αύξηση των συσκευών με δυνατότητα υποστήριξης του πρωτοκόλλου IPv6, οι οποίες θα φτάσουν τα 1.2 δισεκατομμύρια έως το 2019. Το IPv6 είναι κρίσιμος παράγοντας στην υποστήριξη του IoE σήμερα αλλά και στο μέλλον, λόγω της δυνατότητάς του για μεγάλη κλιμάκωση

διευθύνσεων IP και διαχείρισης σύνθετων δικτύων [4]. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξή του στην ανερχόμενη τεχνολογία 5G.

1.1.2 Απαιτήσεις συστημάτων 5^{ης} γενιάς

Η αναμενόμενη «έκρηξη» στην κίνηση ασύρματων δεδομένων, όπως περιγράφηκε νωρίτερα, σε συνδυασμό με τη μετάβαση σε έναν «IoT κόσμο», συνεπάγεται την ανάδειξη μίας σειράς από απαιτήσεις, τις οποίες επιβάλλεται να πληρούν τα ευρυζωνικά δίκτυα επόμενης γενιάς, προκειμένου να ικανοποιήσουν τις ολοένα αναδυόμενες ανάγκες των χρηστών. Οι εν λόγω απαιτήσεις εντοπίζονται κυρίως στις εξής περιοχές [7], [60], [61] :

- Αύξηση χωρητικότητας (capacity) – ρυθμών μετάδοσης
- Μείωση καθυστερήσεων (latency)
- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Υψηλή αξιοπιστία
- Υποστήριξη ποικίλων τύπων και μεγάλου όγκου τερματικών συσκευών
- Προσεγγίσεις διαχείρισης νέου φάσματος

Η προβλεπόμενη αύξηση της κίνησης δεδομένων κατά 10.000 φορές, εγείρει την ανάγκη για τη διαμόρφωση συστημάτων, τα οποία θα επιτυγχάνουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και υψηλότερα επίπεδα φασματικής πυκνότητας (spectral efficiency - bit/s/Hz/cell). Οι κατωτέρω στόχοι, τίθενται για τις μετρικές του ρυθμού μετάδοσης και αποτελούν πρόκληση για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς [7], [60]:

- Ο **αθροιστικός ρυθμός μετάδοσης**, δηλαδή, ο συνολικός όγκος δεδομένων που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο (bits/s/area), χρήζει αύξησης τουλάχιστον κατά 1000 φορές σε σχέση με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (4G).
- Ο **ρυθμός στα άκρα της κυψέλης**, με άλλα λόγια, ο χαμηλότερος ρυθμός που ένας χρήστης αναμένεται να απολαύσει εντός της εμβέλειας του δικτύου, απαιτείται να αυξηθεί τουλάχιστον κατά 100 φορές σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό στα 4G δίκτυα, κυμαινόμενος από 100 Mbps έως και 1Gbps. Το εύρος αυτό, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο φόρτος δικτύου και το μέγεθος της κυψέλης. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, γίνεται αναφορά για έναν ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό που θα δίνει τη δυνατότητα σε κάθε χρήστη να απολαύσει κατά το ελάχιστο υπηρεσίες, όπως ένα υψηλής ευκρίνειας και απευθείας μετάδοσης (live-streaming) video.
- Όσο για το **μέγιστο ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης**, δηλαδή, τον υψηλότερο ρυθμό που μπορεί να λάβει ένας χρήστης εντός του δικτύου, απαιτείται να κυμανθεί σε επίπεδα των δεκάδων Gbps.

Ωστόσο, οι ανωτέρω στόχοι, με τη σειρά τους, συνεπάγονται νέες προκλήσεις ως προς τη διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων και τη σχεδίαση των συστημάτων. Νέες υψηλότερες ζώνες θα πρέπει να αξιοποιηθούν προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα καναλιού, κάτι το οποίο παράλληλα ενέχει τον κίνδυνο μείωσης της ακτίνας κυψέλης και αύξησης του κόστους ανά περιοχή για τους παρόχους [60].

Παράλληλα, μία πληθώρα νέων και εντυπωσιακών εφαρμογών αναμένεται να υποστηριχθεί από τα δίκτυα νέας γενιάς, μεταξύ των οποίων συναντάται ο έλεγχος μη επανδρωμένων οχημάτων, η εξ αποστάσεως ιατρική παρακολούθηση και εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Γίνεται αντιληπτό ότι μια τέτοια κλάση εφαρμογών παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στις καθυστερήσεις, πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με

μία εφαρμογή ζωντανής μετάδοσης video υψηλής ευκρίνειας (high definition live-streaming). Προκειμένου να καταστεί εφικτή και αποτελεσματική η υποστήριξη των εν λόγω, τίθεται ως στόχος η μείωση της καθυστέρησης διαδρομής μετ' επιστροφής (roundtrip latency) κάτω του 1ms (στα 4G δίκτυα κυμαίνεται στα 15ms) και της διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter) κάτω των 20μs. Ένας τέτοιος στόχος θέτει σημαντικές προκλήσεις για τον σχεδιασμό τόσο του δικτύου πρόσβασης όσο και κορμού καθώς και για κάθε επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων. Οι διαδικασίες ελέγχου και σηματοδότησης (control plane), ο χρονοπρογραμματισμός και δέσμευση πόρων, η εγκαθίδρυση νέων συνδέσεων και πολλές ακόμη λειτουργίες απαιτείται να πραγματοποιούνται στον ελάχιστο δυνατό χρόνο [7], [60].

Το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας αποτελεί ένα μείζον ζήτημα παγκοσμίου ενδιαφέροντος, ειδικότερα δε για τον τομέα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών. Η μείωση της κατανάλωσης ισχύος καθώς και η αύξηση της ζωής μπαταρίας των συσκευών ανέκαθεν αποτελούσαν έναν εξαιρετικής σημασίας παράγοντα για τις κινητές επικοινωνίες, ο οποίος αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία όσο η δικτυακή υποδομή, οι συσκευές και οι παρεχόμενες υπηρεσίες εξελίσσονται. Ωστόσο, η αναμενόμενη αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης ανά σύνδεση, η εκθετική αύξηση στο πλήθος συσκευών και σταθμών βάσης, αναπόφευκτα θα επιφέρουν αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, γεγονός το οποίο απαιτεί την ανάπτυξη τεχνολογικών λύσεων προκειμένου να επιτευχθεί κατ' ελάχιστο διατήρηση της κατανάλωσης σε παρόμοια επίπεδα με αυτά των δικτύων προηγούμενης γενιάς, ενώ κατά βέλτιστο μείωση. Ενδεικτικά, αρκεί να αναφερθεί ότι κατά το 2012 το μεγαλύτερο δίκτυο κινητών επικοινωνιών είχε φτάσει σε επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας της τάξης των 14 δισεκατομμυρίων kWh με λειτουργία 1.1 εκατομμυρίου σταθμών βάσης [62]. Είναι, συνεπώς, αναμενόμενο ότι στα επόμενα έτη οι ενεργειακές απαιτήσεις θα εκτοξεύσουν στα ύψη τους αριθμούς αυτούς εγείροντας την ανάγκη για μία ιδιαίτερη μνεία, προκειμένου να ωφεληθούν τόσο οι πάροχοι, καθώς η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας ανεβάζει σημαντικά το ύψος των λειτουργικών εξόδων (OPEX) του δικτύου, όσο και οι χρήστες, προκειμένου να επιτευχθεί επιμήκυνση της διάρκειας ζωής μπαταρίας. Για τα δίκτυα επόμενης γενιάς, πιο συγκεκριμένα, τίθεται ως στόχος μία διάρκεια ζωής της μπαταρίας της τάξης των 10 ετών, η οποία εν μέρει μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την εξέλιξη της τεχνολογίας κατασκευής μπαταρίας, αλλά και μέσω της αποτελεσματικής διαχείρισης της κίνησης δεδομένων και σηματοδότησης [2], [7]. Ωστόσο δεν θα πρέπει να παραλειφθούν οι καταστροφικές επιπτώσεις, που μια δραματική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας, μπορεί να επιφέρει για το περιβάλλον. Εμμέσως, οι ενεργειακές απαιτήσεις των πολυάριθμων σταθμών βάσης που θα αξιοποιηθούν προκειμένου να εξυπηρετήσουν τη δικτυακή κίνηση, όχι μόνο θα βλάψουν οικονομικά τους παρόχους, αλλά και το περιβάλλον καθώς θα συντελέσουν στην αύξηση των επιπέδων εκπομπής CO₂ [2].

Από τη μία η τάση αύξησης των δικτυακών συσκευών ανά χρήστη (ένας χρήστης θα είναι κάτοχος πολλαπλών smartphones, tablets, laptops κ.α) και από την άλλη η άνθηση των M2M επικοινωνιών και η αναμενόμενη μετάβαση σε έναν «IoT κόσμο», συνεπάγονται την ανάγκη για υποστήριξη πολλών και διαφορετικών τύπων συσκευών και παράλληλα την αποτελεσματική διαχείριση ενός μεγάλου όγκου ταυτόχρονων συνδέσεων από τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών εκτιμάται ότι θα ανέλθει σε δισεκατομμύρια, ίσως και τρισεκατομμύρια κατά το 2020 [64], η δυνατότητα κλιμάκωσης των δικτύων αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία. Μία μέση μακροκυψέλη εκτιμάται ότι θα καλείται να υποστηρίξει έως και 10.000 συσκευές χαμηλών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, παράλληλα με τις όποιες και συσκευές υψηλών απαιτήσεων των κινητών χρηστών. Ως εκ τούτου, εγείρεται η ανάγκη τα δίκτυα να παρουσιάζουν ευελιξία, έτσι ώστε να είναι σε θέση να εξυπηρετούν εξίσου αποτελεσματικά από πολύ απλές συσκευές, που στέλνουν σποραδικά δεδομένα (όπως

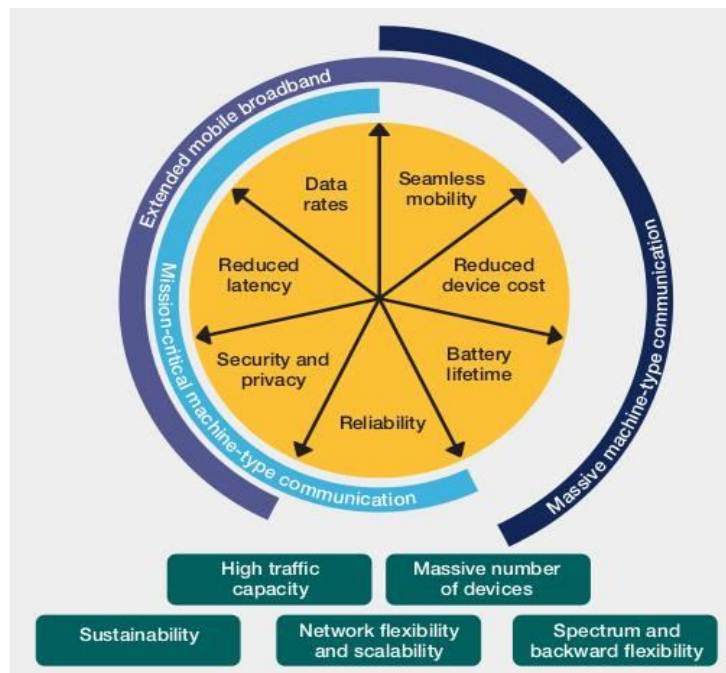
οι συσκευές αισθητήρων), έως συσκευές που αποστέλλουν μεγάλο όγκο δεδομένων (όπως τα laptops) με μεγάλη συχνότητα. Αλλαγές στη μεριά ελέγχου και σηματοδότησης (control plane) καθώς και στη διαχείριση του δικτύου κρίνονται αναγκαίες προκειμένου να υποστηριχθούν τα ανωτέρω.

Μια σημαντική πρόκληση, η οποία προκύπτει κυρίως ως επακόλουθο των ανωτέρω, συνίσταται στην αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων. Το φάσμα, αποτελώντας έναν ακριβό πόρο, επιβάλλεται να αξιοποιηθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται παροχή των προβλεπόμενων υπηρεσιών στο επιθυμητό επίπεδο ποιότητας και ποσότητας, αλλά παράλληλα να μην κατασπαταλάται. Η αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων/αναξιοποίητων τμημάτων του μη συνεχόμενου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων από τον τομέα των κινητών επικοινωνιών, αλλά και η μέριμνα για κατάταξη των υπηρεσιών και συσκευών σε κλάσεις απαιτήσεων προκειμένου να λειτουργούν υπό συγκεκριμένες φασματικές ζώνες αποτελούν μείζονος σημασίας στρατηγικές. Η απελευθέρωση επιπρόσθετων συχνοτήτων θα καταστήσει δυνατή την εξυπηρέτηση του μεγάλου όγκου κίνησης που θα δημιουργούν τα δισεκατομμύρια συνδεδεμένων συσκευών, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου. Ωστόσο, η αξιοποίηση του κατεχόμενου φάσματος θα πρέπει να πραγματοποιείται όχι μόνο ποσοτικά, αλλά και ποιοτικά. Περιπτώσεις χρήσης των δικτύων επόμενης γενιάς θα πρέπει να σκιαγραφηθούν, προκειμένου ανάλογα με τις απαιτήσεις σε όγκο και συχνότητα κίνησης δεδομένων, οι εμπλεκόμενες συσκευές να προβαίνουν σε χρήση διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων. Ως εκ τούτου ένα δίκτυο αισθητήρων θα πρέπει να κάνει χρήση διαφορετικών πομποδεκτών σε σχέση με συσκευές όπως τα smartphones και τα laptops. Παρόλα ταύτα, η θεωρία διαφέρει κατά πολύ από την πράξη, καθώς η διαθεσιμότητα των ζωνών συχνοτήτων ανά περιοχή, αλλά και η νομοθεσία κάθε κράτους θα πρέπει να εναρμονιστούν ως προς το πλαίσιο διάθεσης του φάσματος.

Τέλος, τα συστήματα επόμενης γενιάς επιβάλλεται να είναι αποτελεσματικά ως προς το κόστος, τόσο προς όφελος του παρόχου όσο και του τελικού χρήστη. Νέες λύσεις θα πρέπει να βρεθούν προκειμένου να επιτευχθούν χαμηλότερα κεφαλαιακά (Capital Expenditure - CAPEX) και λειτουργικά έξοδα (Operating Expenditure - OPEX) άρα και κερδοφορία για τους παρόχους, αλλά και χαμηλότερο μέσο έσοδο ανά χρήστη (Average revenue per user –ARPU).

Συνοψίζοντας, καθώς τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αναμένεται να γίνουν το επίκεντρο για την απομακρυσμένη επικοινωνία ανθρώπου με άνθρωπο, ανθρώπου με μηχανή και μηχανής με μηχανή, θα πρέπει να συναγωνίζονται και να ξεπεράσουν σε δυνατότητες τα δίκτυα οπτικών-σταθερών επικοινωνιών, τόσο ως προς την ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS), όσο και ως προς την αξιοπιστία. Ως εκ τούτου, τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα πρέπει να αγγίζουν ταχύτητες της τάξης των 10 Gb/s και οι καθυστερήσεις διαδρομής μετ' επιστροφής να μην ξεπερνούν το 1ms, ενώ θα υποστηρίζονται δισεκατομμύρια ταυτόχρονων συνδέσεων με συσκευές ποικίλων δυνατοτήτων και απαιτήσεων. Επιπρόσθετα, οι πάροχοι δικτύων θα πρέπει να μεριμνήσουν για την ορθή αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων με γνώμονα τις διακυμάνσεις στις απαιτήσεις μιας πληθώρας παρεχόμενων υπηρεσιών. Συνεπώς, το τμήμα του δικτύου πρόσβασης θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να κλιμακώνεται, να είναι ευέλικτο και παράλληλα εύρωστο, αξιόπιστο, αλλά και αποτελεσματικό από άποψη κατανάλωσης ενέργειας [64]. Τέλος, όσον αφορά στο δίκτυο κορμού θα πρέπει να είναι εξίσου ευέλικτο και εύρωστο προκειμένου να υποστηρίξει τις νέες απαιτήσεις που τίθενται.

Στην παρακάτω εικόνα περιγράφονται σχηματικά οι περιπτώσεις χρήσης και οι αντίστοιχες σε αυτές προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα συστήματα 5G.



Εικόνα 1.6: Οι περιπτώσεις χρήσης των συστημάτων 5G και οι κυριότερες αντίστοιχες προκλήσεις [13]

1.2 Προτυποποίηση συστημάτων 5ης γενιάς

Εξετάζοντας τις αναδυόμενες ανάγκες στον τομέα των κινητών επικοινωνιών προκύπτει μία σειρά απαιτήσεων, οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιηθούν μέσω της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU) αποτελεί τον οργανισμό που θέτει τις βάσεις για τον καθορισμό των παραμέτρων τις οποίες μια νέα τεχνολογία θα πρέπει να πληρεί προκειμένου να συναντήσει τις απαιτήσεις των χρηστών και της αγοράς. Κατέχει μία πλούσια ιστορία στην ανάπτυξη προτύπων για το τμήμα των ραδιο-διεπαφών (radio interfaces) δικτύων κινητών επικοινωνιών, με τα πλέον γνωστά συστήματα International Mobile Telecommunications (IMT) – 2000 και IMT-Advanced, πάνω στα οποία χτίστηκαν τα προηγμένα 3G δίκτυα και 4G δίκτυα αντίστοιχα, να αποτελούν χαρακτηριστικά δείγματα του έργου του οργανισμού [56].

1.2.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU)

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) αποτελεί τον εξειδικευμένο οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών που ασχολείται με ζητήματα που αφορούν τον τομέα των Τηλεπικοινωνιών. Η ITU δραστηριοποιείται στους τομείς των Ευρυζωνικών Δικτύων, των Ασύρματων Επικοινωνιών, της Δορυφορικής Μετεωρολογίας, της ραδιο-αστρονομίας και άλλους. Το φάσμα των λειτουργιών της είναι ιδιαίτερα ευρύ περιλαμβάνοντας δραστηριότητες όπως η ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών προτύπων παγκοσμίως εφαρμόσιμων, ο διαμοιρασμός του ραδιο-φάσματος, η ανάθεση δορυφορικών τροχιών και η βελτίωση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών.

Συνίσταται σε 4 τομείς, κάθε ένας από τους οποίους χειρίζεται από τη δική του σκοπιά της δραστηριότητες του οργανισμού. Οι εν λόγω τομείς είναι οι εξής:

- Τομέας Ράδιο-επικοινωνιών (ITU-R)
- Τομέας Τυποποίησης (ITU-T)

- Τομέας Ανάπτυξης (ITU-D)
- ITU TELECOM

1.2.2 International Mobile Telecommunications - 2020 (IMT-2020)

Μία συνήθης διαδικασία προτυποποίησης ξεκινά με τη σκιαγράφηση του «οράματος» και των προσδοκιών για μια νέα γενιά δικτύων, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στον προσδιορισμό των βασικών προδιαγραφών - στόχων ικανοποίησης. Η έναρξη των διαδικασιών μελέτης και προτυποποίησης της πέμπτης γενιάς δικτύων κινητών επικοινωνιών (5G) τοποθετείται το 2012 [56], όπου η ITU ξεκινά να αναπτύσσει το πρότυπο IMT-2020, με το «2020» να καταδεικνύει το έτος όπου τα 5G δίκτυα αναμένεται να διατεθούν εμπορικά. Με επίκεντρο και συντονιστή την ITU-R, ξεκίνησε ένα πλαίσιο έρευνας και ανάπτυξης του προτύπου σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ολοκλήρωση της μελέτης σχετικά με τις παραμέτρους που συνθέτουν το «όραμα» για τα 5G δίκτυα ολοκληρώθηκε στο Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference – WRC) του 2015, το οποίο έλαβε χώρα στη Γενεύη από τις 2 έως τις 27 Νοεμβρίου [57].

Ωστόσο, εκτός από την ITU-R σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των προδιαγραφών των 5G δικτύων διαδραματίζει και η ITU-T, η οποία επικεντρώνεται στην αναγνώριση των αναγκών προτυποποίησης σχετικά με το ενσύρματο τμήμα των 5G δικτύων. Βασισμένη στα ευρήματα ενός focus group (ομάδα μελέτης) πρόκειται να ευθυγραμμίσει τις απαιτήσεις που θα τεθούν με αυτές της ITU-R. Το εν λόγω group όντας ανοιχτό σε συμμετοχή, φέρνει κοντά ερευνητές, επιχειρήσεις και ειδικούς από όλο τον κόσμο, ώστε να συνεισφέρουν στον προσδιορισμό των απαιτήσεων. Τα αποτελέσματα όλων αυτών των ερευνών τροφοδότησαν τη διαδικασία καθορισμού του προτύπου, η οποία ξεκίνησε επίσημα στο τέλος του 2015 με το ITU-R WRC-15. Το WRC-* αποτελεί ένα παγκόσμιο συνέδριο το οποίο διοργανώνεται κάθε 3 με 4 χρόνια, προκειμένου να συζητηθούν κυρίως ζητήματα σχετικά με το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων και τα πρότυπα κινητών επικοινωνιών.

Ήδη, πληθώρα τεχνικών ομάδων ανά τον κόσμο, μελετούν και εργάζονται πάνω στην ανάπτυξη τεχνολογιών 5G, ενώ με βάση τους στόχους που θα τεθούν τελικά από την ITU αναμένεται να καταθέσουν τεχνολογικές λύσεις έως το τέλος του 2019. Ενδεικτικό παράδειγμα αυτής της διαδικασίας από το παρελθόν αποτελεί η κατάθεση των προτάσεων Long Term Evolution (LTE), έκδοση (release) 12, από τη 3rd Generation Partnership Project (3GPP) και WiMAX από το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ως τεχνολογίες δικτύων που πληρούν τις προδιαγραφές IMT-Advanced (4G), του προκατόχου του IMT-2020. Η ITU με τη σειρά της αναμένεται να λάβει προτάσεις από ομάδες εργασίας και οργανισμούς και να εξετάσει το βαθμό ικανοποίησης των 5G προδιαγραφών από αυτές.

1.2.3 Παράμετροι ικανοποίησης IMT-2020

Αν και η διαδικασία προτυποποίησης των 5G δικτύων απέχει πολύ ακόμη από την ολοκλήρωση της και η ερευνητική κοινότητα δεν έχει καταλήξει στο αν τα 5G θα αποτελούν ένα νέο δίκτυο ή απλά μία ισχυρή υπηρεσία, ήδη η ITU-R σε συνεργασία με τη βιομηχανία κινητών επικοινωνιών, ερευνητικές ομάδες και άλλα ενδιαφερόμενα μέρη έχει συμφωνήσει σε ένα σύνολο οκτώ παραμέτρων οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται από τα δίκτυα επόμενης γενιάς [58], [59] :

- Αντιλαμβανόμενος ρυθμός από τον χρήστη 100 Mbps (σε αστικά και ημιαστικά

- περιβάλλοντα) και 1 Gbps (σε κοντινή απόσταση από σταθμό βάσης)
- Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης 20 Gbps
- Υποστήριξη κινητικότητας έως και 500 km/h
- Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση μικρότερη του 1 ms
- Πυκνότητα συνδέσεων έως 1.000.000 ανά km²
- Ενεργειακή απόδοση 100 φορές υψηλότερη από αυτή των IMT-Advanced συστημάτων
- Φασματική απόδοση κατά 2/3/5 φορές μεγαλύτερη από αυτή των IMT-Advanced συστημάτων
- Χωρητικότητα κυψέλης 10 Mbps/km²

Στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες παράμετροι και αντίστοιχες τιμές τους για τα IMT-Advanced συστήματα.

Key Parameters	Values for 5G ⁺ from 21 th meeting	Reference value for IMT-Advanced
User Experienced Data Rate	100 Mbps – 1 Gbps [100 Mbps (urban/suburban), 1 Gbps (hotspots)]	10 Mbps (urban/suburban)
Peak Data Rate	20 Gbps	1 Gbps
Mobility	500 km/h	350 km/h
Latency	1 ms (radio interface)	10 ms (radio interface)
Connection Density	10 ⁶ per km ² (scenario required)	10 ⁵ per km ²
Energy Efficiency	100 x greater than IMT-Advanced (for network)	
Spectrum Efficiency	2/3/5 x greater than IMT-Advanced	
Area Traffic Capacity	10 Mbps/km ²	0.1 Mbps/km ²

Εικόνα 1.7: Παράμετροι ικανοποίησης IMT-2020 [58]

1.2.4 Ρυθμίσεις Φάσματος

Οι μελέτες και συζητήσεις για την απόδοση επιπρόσθετου φάσματος προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι που τίθενται για τις αποδόσεις των 5G δικτύων, αποτελούν εξέχουσας σημασίας διαδικασίες, οι οποίες εντάσσονται στο χρονοδιάγραμμα προτυποποίησης της ITU.

Στο WRC 2015 αναμένεται να αποφασιστεί η απόδοση περισσότερων των 500 MHz επιπρόσθετου φάσματος κάτω της συχνότητας των 6 GHz, προς χρήση για τα IMT-2020 συστήματα. Πιο συγκεκριμένα [59] :

- Φάσμα στη ζώνη χαμηλών συχνοτήτων (<1GHz) για κάλυψη σε σενάρια μακροκυψελών.
- Φάσμα στη ζώνη μεσαίων συχνοτήτων (1-3 GHz) για κάλυψη σε σενάρια μακρο/ μικροκυψελών.
- Φάσμα στη ζώνη υψηλών συχνοτήτων (3-6 GHz) για κάλυψη σε σενάρια μικρό/πίκο κυψελών.

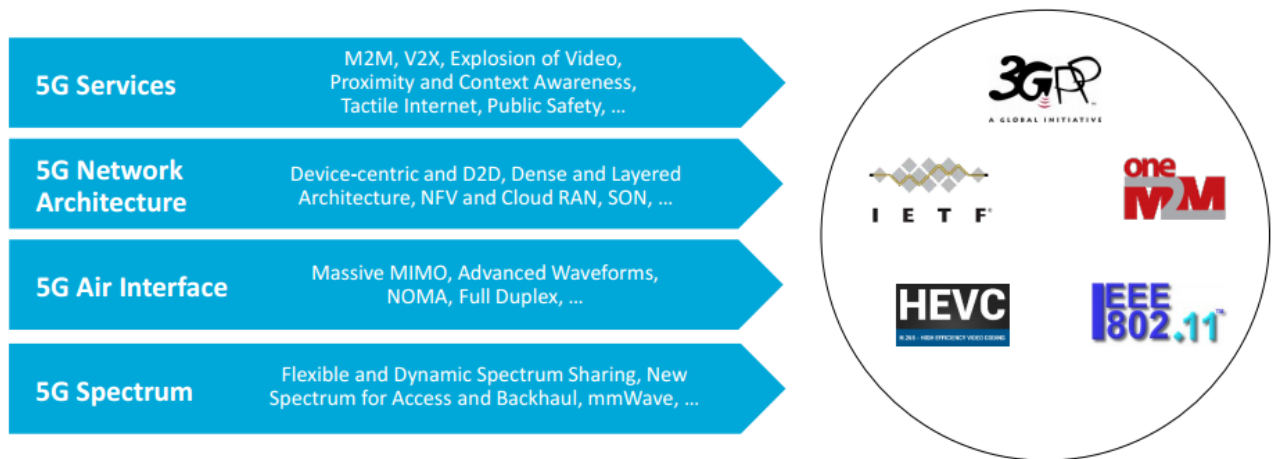
Ωστόσο, εκτός του προαναφερθέντος τμήματος του φάσματος, οι έρευνες για τα 5G δίκτυα συμπεριλαμβάνουν περιπτώσεις για λειτουργία των συστημάτων πάνω από τη συχνότητα των 6 GHz. Μια ανάλογη συζήτηση αναμένεται να πραγματοποιηθεί στο WRC 2019. Η λειτουργία των 5G συστημάτων σε ζώνες άνω των 6GHz είναι επόμενο να εγείρει προκλήσεις ως προς τη μοντελοποίηση των ασύρματων καναλιών, την κάλυψη, την υποστήριξη κινητικότητας και τη συνύπαρξη με τα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα. Ένα τέτοιο σενάριο μελετάται ήδη από την ITU και οργανισμούς, όπως η 3GPP,

ωστόσο είναι απαραίτητη η συνεργασία με τις Εθνικές Ρυθμιστικές Αρχές (ΕΡΑ) καθώς είναι αρμόδιες σε κρατικό επίπεδο για θέματα που αφορούν την απόδοση φάσματος [7].

1.2.5 Ερευνητικές ομάδες ανάπτυξης τεχνολογιών 5^{ης} γενιάς (5G)

Όπως διατυπώθηκε νωρίτερα, μία πληθώρα ερευνητικών ομάδων έχει εγκαθιδρυθεί ανά τον κόσμο προκειμένου να συμμετέχουν στις έρευνες για την υλοποίηση του «οράματος» των δικτύων 5^{ης} γενιάς και να τροφοδοτήσουν τη διαδικασία προτυποποίησης τους. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής [59] :

- **3GPP:** Η 3GPP κυριάρχησε στο παρελθόν προτείνοντας τη λύση των LTE-Advanced συστημάτων ως 4G τεχνολογία. Στην κατεύθυνση των 5G αναμένεται να καταθέσει μία πρόταση που θα πληρεί τις προδιαγραφές IMT-2020 επίσημα στην ITU τον Ιούνιο του 2019, ως μία γενική μορφή, και το Φθινόπωρο του 2020 σε λεπτομερή μορφή. Τα αποτελέσματα της μελέτης του οργανισμού θα αποτυπωθούν στις releases 15, 16 και στις μετέπειτα.
- **Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance:** Η NGMN Alliance μελετά και καταγράφει τις απαιτήσεις που εγείρονται από τη σκοπιά των παρόχων δικτύων προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των πελατών και της αγοράς από το έτος 2020 και ύστερα.
- **Small Cell Forum:** Το Small Cell Forum συνίσταται σε ένα σύνολο ομάδων μελέτης που ερευνούν την εξέλιξη των Wi-Fi συστημάτων, την εικονικοποίηση των δικτύων (virtualization), τα αυτό-οργανούμενα δίκτυα (Self Organising Networks - SON και small cell περιπτώσεις).
- **European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Industry Specification Groups (ISGs):** Τα ETSI ISGs επικεντρώνουν τις έρευνες τους στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως το millimeter Wave Transmission (mWT), το Mobile-Edge Computing (MEC) και το Network Function Virtualization (NFV).
- **Open Network Foundation (ONF):** Συνίσταται σε τεχνικές ομάδες, οι οποίες επικεντρώνουν τις έρευνες τους στις απαιτήσεις των Software Defined-Networks (SDNs). Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσει το πρότυπο OpenFlow προκειμένου να ικανοποιηθούν οι μελλοντικές εμπορικές ανάγκες, ενώ ερευνά νέα πρότυπα για την καλύτερη αξιοποίηση των SDNs.
- **Open Daylight:** Αποτελεί ένα έργο συνεργασίας ανοιχτού κώδικα (open source) με στόχο την επιτάχυνση της υιοθέτησης του λογισμικού για τις SDN και NFV τεχνολογίες.



Εικόνα 1.8: πεδία έρευνας της 5G τεχνολογίας δικτύων [59]

1.2.6 Προκλήσεις

Η διαλειτουργικότητα, η πλήρης κάλυψη/παρουσία και η δυναμικότητα αποτελούν τους κυριότερους στόχους, αλλά και τη βάση για τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές, κατασκευαστές και ρυθμιστές κατά το έργο της σχεδίασης τεχνολογιών και της προτυποποίησης των 5G δικτύων. Τα σενάρια χρήσης της νέας γενιάς δικτύων είναι πολυάριθμα και απαιτητικά από τη σκοπιά της κάλυψης, της ταχύτητας, των καθυστερήσεων και της ασφάλειας. Τα 5G δίκτυα θα πρέπει να είναι πανταχού παρόντα προσφέροντας κάλυψη ακόμη και στο πιο απομακρυσμένο σημείο. Παράλληλα, τεράστια πρόκληση αποτελεί ο συγκερασμός πληθώρας διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών υπό την σκέπη των 5G δικτύων, αλλά και της ετερογένειας από τη σκοπιά των συνδεδεμένων συσκευών.

Τέλος, σημαντική πρόκληση αποτελεί η επίτευξη αύξησης των ρυθμών μετάδοσης μέσω της δέσμευσης επιπρόσθετου φάσματος συχνοτήτων για την 5G τεχνολογία, η οποία με τη σειρά της εγείρει θέματα στην κατεύθυνση της διαχείρισης των ραδιο-διεπαφών και της κινητικότητας των χρηστών.

1.3 Αρχιτεκτονική συστημάτων 5^{ης} γενιάς

1.3.1 Τεχνολογίες συστημάτων 5^{ης} γενιάς

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι ξεκάθαρο ότι τα συστήματα πέμπτης γενιάς 5G βρίσκονται υπό συνεχή μελέτη, έτσι ώστε να μπορέσουν έγκαιρα να ανταποκριθούν στις ολοένα περισσότερες απαιτήσεις που θα δημιουργήσει η ραγδαία αύξηση της κίνησης δεδομένων στα επόμενα έτη. Παρ' όλα αυτά, η εμπορική διάθεση και εξάπλωσή τους αναμένεται περί το 2020. Συνεπώς, η δομή της αρχιτεκτονικής 5G δεν είναι ακόμη πλήρως καθορισμένη αλλά υπό διαμόρφωση. Υπάρχει όμως ήδη η εικόνα για τη μορφή της και τις απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτει, ενώ παράλληλα συνεχίζονται οι έρευνες για συγκεκριμένες τεχνολογίες που θα μπορούν να την εξυπηρετήσουν. Με άλλα λόγια, στη διαμόρφωση της αρχιτεκτονικής 5G θα παίξουν ρόλο οι τεχνολογίες που τελικά θα χρησιμοποιηθούν. Παρακάτω αναφέρεται ένας αριθμός τεχνολογιών που μελετώνται για την υλοποίηση των συστημάτων 5G :

- **Massive Multiple Input – Multiple Output (MIMO)** : Η τεχνολογία αυτή συμβάλλει στην αξιοποίηση μεγαλύτερου αριθμού κεραιών από τα τερματικά ή από κάποιο κόμβο που παρέχει πρόσβαση σε τερματικά. Το κύριο πλεονέκτημα που παρέχει είναι ότι οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού δεδομένων καθώς και σε μεγαλύτερη φασματική απόδοση. Για την υλοποίησή της απαιτείται εξελιγμένος σχεδιασμός των τερματικών κόμβων, καθώς και καλύτερη ενεργειακή απόδοση του υλισμικού υποστήριξης.
- **Caching** : Πρόκειται για μία τεχνική η οποία θα χρησιμεύσει ιδιαίτερα στη μεταφορά δεδομένων on demand, αφού άνω του 70% της κίνησης δεδομένων έως το 2020 θα δημιουργείται από τη χρήση video. Πολλές φορές συναντώνται αιτήσεις για το ίδιο περιεχόμενο, οι οποίες διεκπεραιώνονται εξατομικευμένα ανά χρήστη, κάτι που δε συμβάλλει στη μέγιστη απόδοση. Φέρνοντας όμως το περιεχόμενο πιο κοντά στον τερματικό χρήστη, μειώνεται ο χρόνος απόκρισης του δικτύου και ο φόρτος του, κάτι που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την αντιμετώπιση της κίνησης που θα δημιουργηθεί εντός των επόμενων ετών.
- **Cloud Computing** : Η συγκεκριμένη τεχνολογία βασίζεται σε διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου και επίσης επικεντρώνεται στη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των εν λόγω πόρων. Οι πόροι του Cloud συνήθως δεν διαμοιράζονται μόνο μεταξύ πολλών χρηστών, αλλά επίσης ανακατανέμονται δυναμικά σύμφωνα με τη ζήτηση. Το θετικό αυτής της προσέγγισης είναι ότι μεγιστοποιεί τη χρήση της υπολογιστικής ισχύος, με αποτέλεσμα την βέλτιστη περιβαλλοντική και ενεργειακή αξιοποίηση. Με το Cloud, πολλοί χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα μόνο εξυπηρετητή ώστε να ανακτούν και να ανανεώνουν τα δεδομένα τους χωρίς να προμηθεύονται άδειες για διαφορετικές εφαρμογές. Αξιοποιούνται οι κατανεμημένοι υπολογιστικοί πόροι και η ισχύς με τρόπο κεντρικής διαχείρισης, με σκοπό τη διεκπεραίωση λειτουργιών κρίσιμων για την ορθή διαχείριση των συνδέσεων του δικτύου [15].
- **FOG Networking and Computing** : Αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο τρόπο επεξεργασίας και μεταφοράς δεδομένων. Αποτελεί μία αρχιτεκτονική η οποία χρησιμοποιεί μία πληθώρα τερματικών χρηστών – πελατών ή συσκευών ώστε να διεκπεραιώσουν ένα επαρκές ποσοστό αποθήκευσης πληροφορίας, επικοινωνίας, ελέγχου, μετρήσεων και διαχείρισης του δικτύου. Σε σύγκριση με την τεχνολογία Cloud Computing, η τεχνολογία Fog δεν υπόκειται σε κεντρική διαχείριση και δίνει έμφαση στην εγγύτητα με τους τερματικούς χρήστες και στους στόχους τους, στην πυκνή γεωγραφική κατανομή, στην τοπική συγκέντρωση των πόρων και στη μείωση της καθυστέρησης για την επίτευξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Ένα ακόμα πλεονέκτημα του Fog είναι ότι υποστηρίζει το IoT ή IoE, που εξαπλώνεται με γρήγορους ρυθμούς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω [16].
- **Multi – point transmission** : Πρόκειται για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ ενός χρήστη και πολλών σημείων πρόσβασης του δικτύου.
- **Coordinated Multi – Point transmission/reception (CoMP)** : Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, όλοι όσοι λαμβάνουν δεδομένα μέσω του δικτύου συνδέονται μέσω ενός καναλιού, δηλαδή υπάρχει μία πιο κεντρική διαχείριση. Η απόδοση αυξάνεται καθώς οι δέκτες μπορούν να ανταλλάξουν δεδομένα απευθείας μεταξύ τους, αντί να γίνεται εξατομικευμένη αποστολή των δεδομένων σε κάθε χρήστη. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία εισάγεται η τεχνική της διαφορικής λήψης, στην οποία δυο ή περισσότερα αντίγραφα του αρχικού σήματος λαμβάνονται από ένα δέκτη, του οποίου οι κεραιές είναι τοποθετημένες σε θέσεις που απέχουν κάποια συγκεκριμένη απόσταση. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα στη λειτουργία του δικτύου και στην ανταλλαγή δεδομένων [17].
- **Μικρές κυψέλες (Small cells) – Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (Ultra Dense**

Networks - UDNs : Μία απλή αλλά εξαιρετικά αποδοτική μέθοδος για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου είναι η μείωση του μεγέθους των κυψελών. Τα δίκτυα πλέον περιλαμβάνουν πικοκυψέλες (με εμβέλεια μικρότερη των 100 μέτρων) και φεμπτοκυψέλες (με εμβέλεια παρόμοια με αυτή του WiFi) [7]. Οι μικροί κόμβοι πρόσβασης, με χαμηλή ισχύ μετάδοσης και χωρίς ακριβείς απαιτήσεις σχεδιασμού, θεωρείται ότι θα επεκταθούν και θα αναπτυχθούν ευρέως, καταλήγοντας σε Ultra Dense Networks (UDNs) [10].

- **Υποστήριξη διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technologies - RATs)** : Με τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, τα τερματικά θα έχουν πρόσβαση σε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες την ίδια στιγμή, δηλαδή θα συνδέονται σε αρκετές 5G RAT ή ζώνες συχνότητες ταυτόχρονα. Το τερματικό θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδυάζει διαφορετικές ροές από διαφορετικές τεχνολογίες.
- **Ετερογενή κυψελωτά δίκτυα (Heterogeneous Cellular Networks – HCNs)** : Τα εν λόγω δίκτυα αποτελούνται από Κ βαθμίδες από τυχαία κατανομημένους σταθμούς βάσης, όπου κάθε βαθμίδα μπορεί να διαφέρει σε σχέση με τις άλλες, από την άποψη της μέσης ισχύος μετάδοσης, του υποστηριζόμενου ρυθμού δεδομένων και της πυκνότητας σταθμών βάσης. Οι σταθμοί βάσης σε κάθε βαθμίδα μπορεί επίσης να διαφέρουν μεταξύ τους από τη σκοπιά των προαναφερθεισών παραμέτρων [8].
- **Νέο Physical Layer** : Περιλαμβάνει διαφορετικούς τρόπους συγχρονισμού και διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης του σήματος, οι οποίοι ξεφεύγουν από το OFDM.
- **Machine – to – Machine (M2M)** : Πρόκειται για κεντροποιημένα συστήματα, διαχειρίσιμα από ένα σταθμό βάσης ή μία κεντρική οντότητα διαχείρισης. Το πλεονέκτημα που προσφέρει είναι η αποφόρτωση (offload) του δικτύου. Επίσης, οι συσκευές μπορούν να στέλνουν δεδομένα που αφορούν σε τοπικά φαινόμενα, με τοπικό δηλαδή ενδιαφέρον, απευθείας μεταξύ τους.
- **Νέες μέθοδοι εντοπισμού δικτυακών κόμβων** : Η γνώση για την ακριβή θέση των κινητών τερματικών και δικτυακών κόμβων είναι σημαντική, γιατί με τον τρόπο αυτό, το δίκτυο δεν ορίζεται πλέον από συγκεκριμένους κανόνες και δικτυακές μεθόδους.
- **Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό (Software Defined Networking – SDN), Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (Network Functions Virtualization – NFV)** : Πρόκειται για το διαμοιρασμό πόρων εξοπλισμού και του φυσικού επιπέδου με διάφανο τρόπο προς το λογισμικό. Το δίκτυο εικονικοποιείται, δηλαδή το λογισμικό απομονώνεται από το υλικό. Κάτι τέτοιο επιτρέπει τη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.
- **Millimeter Wave (mmWave)** : Σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων, τα ραδιοκύματα έχουν μήκη κύματος από ένα έως δέκα millimeter. Λόγω του μικρότερου μήκους κύματος, είναι δυνατή η χρήση μικρότερων κεραιών, επιτυγχάνοντας την ίδια υψηλή κατευθυντικότητα και κέρδος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος για εφαρμογές point – to – multipoint καθώς και μεγαλύτερη επαναχρησιμοποίησή του. Επιπλέον, λόγω του γεγονότος ότι μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερα κανάλια φωνής ή πληροφορίες ευρυζωνικής χρησιμοποιώντας μία υψηλότερη συχνότητα για να μεταδώσει την πληροφορία, αυτό το φάσμα θα μπορούσε ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί με σκοπό να αντικαταστήσει ή συμπληρώσει τη λειτουργία των οπτικών ινών [19].
- **Carrier Aggregation** : Όπως αναφέρθηκε, οι ρυθμοί δεδομένων έως το 2020 θα έχουν σημειώσει ραγδαία αύξηση και θα πρέπει να υποστηρίζονται από τα συστήματα 5G. Για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δεδομένων χρειάζεται αύξηση του συνολικού εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται. Είναι απαραίτητο να

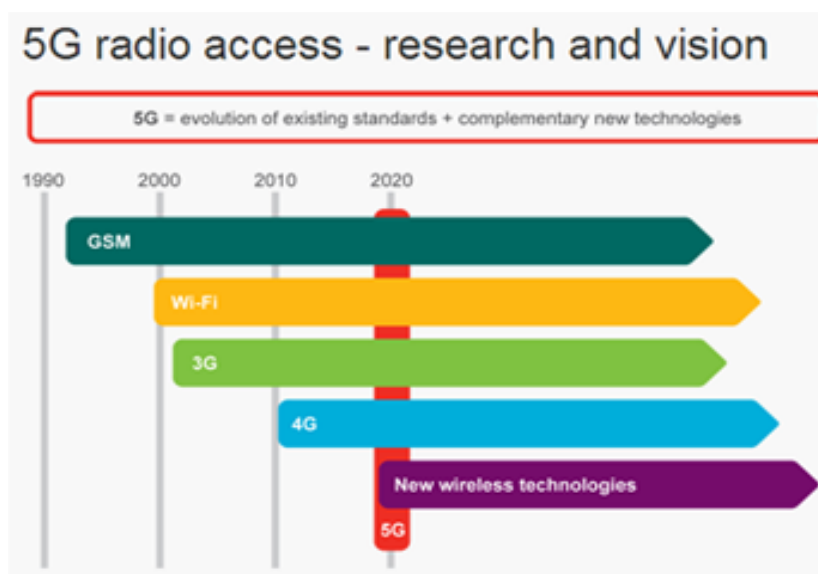
αυξηθεί το εύρος ζώνης για τη μετάδοση σε σχέση με εκείνο που μπορεί να υποστηριχθεί από μία απλή φέρουσα ή κανάλι. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η τεχνική Carrier Aggregation. Ο χρήστης και ο σταθμός βάσης μπορούν να αξιοποιούν φάσμα το οποίο βρίσκεται σε πολύ μακρινές ζώνες συχνοτήτων. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα να χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία φέρουσες και με αυτό τον τρόπο να αυξηθεί το συνολικό εύρος ζώνης για τη μετάδοση [18].

1.3.2 Σενάρια Αρχιτεκτονικής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα συστήματα πέμπτης γενιάς βρίσκονται υπό εξέλιξη και η δομή της αρχιτεκτονικής τους δεν είναι ακόμη πλήρως καθορισμένη, αλλά εξαρτάται από τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξή της. Στην ενότητα αυτή αναλύεται η αρχιτεκτονική 5G, η οποία αναμένεται να προκύψει με βάση το φυσικό της επίπεδο και τις τεχνολογίες που θα αναπτυχθούν πάνω σε αυτό.

Προκειμένου να καθοριστεί επακριβώς μία αρχιτεκτονική δικτύου, χρειάζεται να εξεταστούν δύο κύρια ζητήματα από τα οποία ουσιαστικά προκύπτει η δομή της αρχιτεκτονικής. Συγκεκριμένα, είναι απαραίτητο να αναγνωριστεί η μορφή του φυσικού επιπέδου της αρχιτεκτονικής αυτής, δηλαδή οι φυσικοί πόροι και οι συσκευές, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και οι τεχνολογίες που θα λειτουργήσουν πάνω από το φυσικό επίπεδο.

Ως προς το φυσικό επίπεδο της αρχιτεκτονικής 5G, είναι απίθανο να αποτελέσει μία νέα και ξεχωριστή τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technology - RAT), σε αντίθεση με τα συστήματα επικοινωνιών 2G, 3G και 4G. Πιο συγκεκριμένα, αναμένεται να είναι ένας συνδυασμός από ήδη υπάρχουσες RAT (συμπεριλαμβάνοντας εξελιγμένες εκδόσεις του LTE και του πρωτοκόλλου High Speed Packet Access - HSPA) τόσο στις αδειοδοτημένες όσο και στις μη αδειοδοτημένες ζώνες, και ενδεχομένως νέων δικτυακών οντοτήτων που θα προστεθούν για λειτουργίες 5G. Ως εκ τούτου, στα δίκτυα 5G θα μπορούσαν να υπάρξουν πολλοί τύποι σταθμών βάσης, οι οποίοι θα συντονίζονται μεταξύ τους [12]. Με άλλα λόγια, δεν προβλέπεται κάποια σημαντική αλλαγή στο φυσικό επίπεδο που θα δομήσει την αρχιτεκτονική 5G, σε σχέση με το φυσικό επίπεδο των αρχιτεκτονικών προηγούμενης γενιάς.



Εικόνα 1.9: Τα συστήματα 5G θα βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες συστημάτων επικοινωνιών παλαιότερων γενεών

Στην παραπάνω εικόνα αναπαρίσταται σχηματικά η εξέλιξη των αρχιτεκτονικών ανά γενιά συστημάτων, και φαίνεται σαφώς ότι τα συστήματα 5G θα χρησιμοποιούν και νέα στοιχεία αρχιτεκτονικής, τα οποία θα αναπτυχθούν για την υποστήριξή τους, όμως σε ένα μεγάλο ποσοστό θα βασίζονται σε ήδη υπάρχουσες υποδομές που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής των συστημάτων επικοινωνιών παλαιότερων γενεών, δηλαδή 2G, Wi-Fi, 3G και 4G.

Σχετικά με τις τεχνολογίες που πρόκειται να αναπτυχθούν πάνω από το φυσικό επίπεδο για τα συστήματα 5G, μπορούμε να προβούμε σε μία κατηγοριοποίηση αυτών με βάση τη βασική τους προσέγγιση. Οι πιο αναγνωρίσιμες κατηγορίες είναι οι παρακάτω :

- Οι τεχνολογίες που είναι βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου, όπως είναι τα UDNs. Ο σκοπός τους είναι να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις σε διεκπεραιωτική ικανότητα και καθυστέρηση, που φαίνεται ότι θα εμφανιστούν από το 2020 και έπειτα, αφού η πυκνοποίηση του δικτύου είναι ένας τρόπος να αυξηθεί η χωρητικότητα και ο ρυθμός δεδομένων. Έως το 2020, οι μικρές, πυκνά τοποθετημένες κυψέλες αναμένεται να διαχειρίζονται το μεγαλύτερο ποσοστό της κίνησης.
- Οι τεχνολογίες που είναι βασισμένες στην κεντρική διαχείριση των πόρων και στην πιθανή εκμετάλλευση ετερογενών τεχνολογιών, όπως είναι η τεχνολογία Κεντρικής Διαχείρισης Πόρων (Universal Resources Management – URM) και τα ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous Networks – HetNets).
- Οι τεχνολογίες που είναι βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου, όπως είναι η NFV και η SDN. Με την προσέγγιση αυτή η έμφαση δε δίνεται πλέον στις φυσικές δυνατότητες και στο υλικό, αλλά δημιουργούνται πόροι πάνω από το φυσικό επίπεδο. Επίσης, επαναπρογραμματίζεται η λειτουργία διεργασιών που εκτελούνται σε κάθε κόμβο, ώστε να υπάρχει δυνατότητα εικονικής διαχείρισης του δικτύου.

1.3.2.1 Επισκόπηση των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών και λύσεων

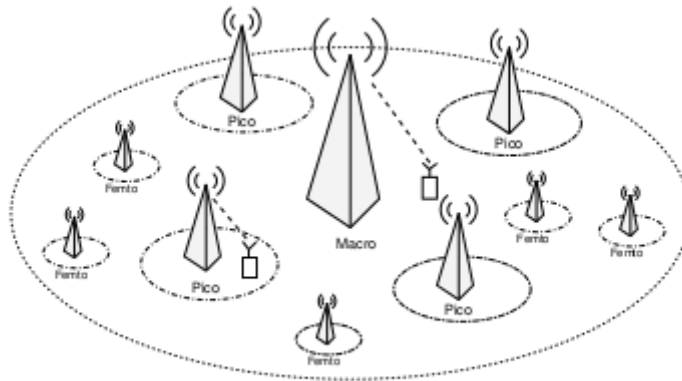
Έως σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών που μέχρι στιγμής εξυπηρετούν τις επικοινωνιακές ανάγκες των συνδρομητών. Μία προσέγγιση που έχει ακολουθηθεί είναι τα ετερογενή δίκτυα (HetNets) που αποτελούνται από Κ βαθμίδες από τυχαία κατανομημένους σταθμούς βάσης, όπου κάθε βαθμίδα μπορεί να διαφέρει σε σχέση με τις άλλες, από την άποψη της μέσης ισχύος μετάδοσης, του υποστηριζόμενου ρυθμού δεδομένων και της πυκνότητας σταθμών βάσης. Οι σταθμοί βάσης σε κάθε βαθμίδα μπορεί επίσης να διαφέρουν μεταξύ τους από τη σκοπιά των προαναφερθέντων παραμέτρων.

Για παράδειγμα, ένα τυπικό 3G ή 4G κυψελωτό δίκτυο ήδη διαθέτει :

- Κλασικούς σταθμούς βάσης που είναι υψηλής εμβέλειας και εγγυώνται σχεδόν καθολική κάλυψη,
- Πικοκυψέλες και κατανομημένες κεραίες οι οποίες έχουν μία μικρότερη περιοχή κάλυψης και χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη χωρητικότητα και παράλληλα να εξαλείψουν την πιθανότητα ύπαρξης περιοχών εκτός κάλυψης, και
- Φεμπποκυψέλες, οι οποίες έκαναν την εμφάνισή τους πιο πρόσφατα και ξεχωρίζουν για την κατανομή των τερματικών χρηστών σε αυθαίρετες τοποθεσίες, πολύ μικρή εμβέλεια και πιθανότητα να διατίθενται σε μία κλειστή ομάδα συνδρομητών.

Προφανώς η κάλυψη, ο ρυθμός και η αξιοπιστία που απολαμβάνουν οι κινητοί χρήστες σε τέτοιου είδους δίκτυα αναμένεται να είναι αρκετά διαφορετικά από ό,τι στα

παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα που χρησιμοποιούν γνωστά μοντέλα όπως το εξαγωνικό πλέγμα. Για παράδειγμα, στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα HetNet τριών βαθμίδων. Οι παραδοσιακοί σταθμοί βάσης (βαθμίδα 1) τυπικά έχουν μία πολύ υψηλότερη ισχύ μετάδοσης, αλλά χαμηλότερη πυκνότητα και προσφερόμενο ρυθμό από τις χαμηλότερες βαθμίδες 2 και 3 (πικοκυψέλες και φεμπτοκυψέλες) [8].

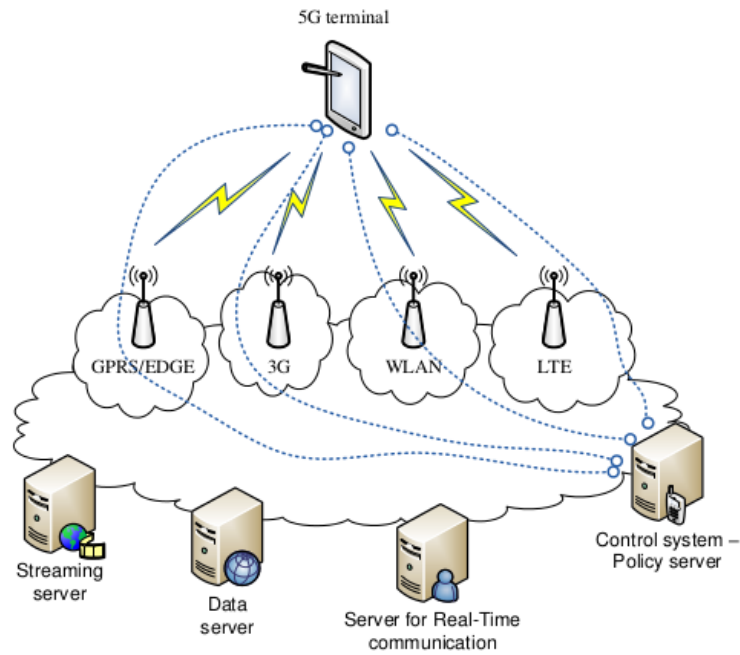


Εικόνα 1.10: Ετερογενές δίκτυο τριών βαθμίδων που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό μακροκυψελών, πικοκυψελών και φεμπτοκυψελών ως σταθμούς βάσης [8]

Επίσης, η αρχιτεκτονική των σημερινών δικτύων χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό flat architecture και του πλαισίου Evolved Packet Core (EPC). Το EPC είναι το βασισμένο σε IP δίκτυο κορμού που ορίζεται από τον οργανισμό 3GPP για χρήση από τεχνολογίες LTE καθώς και από άλλες τεχνολογίες πρόσβασης. Ο στόχος του EPC είναι να παρέχει απλοποιημένη όλη την IP αρχιτεκτονική δικτύου κορμού ώστε να προσφέρει αποτελεσματικά πρόσβαση σε διάφορες υπηρεσίες. Το EPC αποτελείται απαραίτητως από την ενότητα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME) και πύλες για δρομολόγηση των δεδομενογραμμάτων [9].

Μία ακόμη προσέγγιση που ακολουθείται στα σημερινά δίκτυα και θα αποτελέσει βάση για τα συστήματα 5G είναι η πολλαπλή συνδεσιμότητα, όπου τα τερματικά συνδέονται σε αρκετές RATs ή ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα. Αναμένεται ότι τα συστήματα που την παρούσα στιγμή υλοποιούνται σε αδειοδοτημένες ζώνες (όπως το LTE-Advanced) θα παίξουν κυρίαρχο ρόλο στην υποστήριξη του 5G. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από μία τερματική συσκευή του χρήστη και έναν αριθμό ανεξάρτητων, αυτόνομων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο πρόσβασης. Καθεμία από τις τεχνολογίες του δικτύου πρόσβασης αντιμετωπίζεται ως ο IP σύνδεσμος με τον εξωτερικό διαδικτυακό κόσμο εντός καθενός από τα τερματικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι θα πρέπει να υπάρχει διαφορετική ραδιο - διεπαφή για κάθε RAT στο κινητό τερματικό. Τα τερματικά έχουν πρόσβαση σε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες την ίδια στιγμή, και το τερματικό πρέπει να είναι σε θέση να συνδυάζει διαφορετικές ροές από διαφορετικές τεχνολογίες. Κάθε δίκτυο είναι υπεύθυνο να διαχειρίζεται την κινητικότητα των χρηστών, ενώ το τερματικό κάνει την τελική επιλογή (βασισμένη σε ανοιχτό έξυπνο λογισμικό, εγκατεστημένο στο κινητό τηλέφωνο) μεταξύ διαφορετικών ασύρματων / κινητών παρόχων δικτύου πρόσβασης για μία δεδομένη υπηρεσία [12], [13], [14].

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά ένα παράδειγμα, στο οποίο επιθυμούμε να έχουμε πρόσβαση σε τέσσερις διαφορετικές RAT. Είναι απαραίτητο να έχουμε τέσσερις διαφορετικές διεπαφές στο κινητό τερματικό, και να τις διατηρούμε όλες ενεργές την ίδια στιγμή, με σκοπό να είναι λειτουργική αυτή η μορφή αρχιτεκτονικής [14].

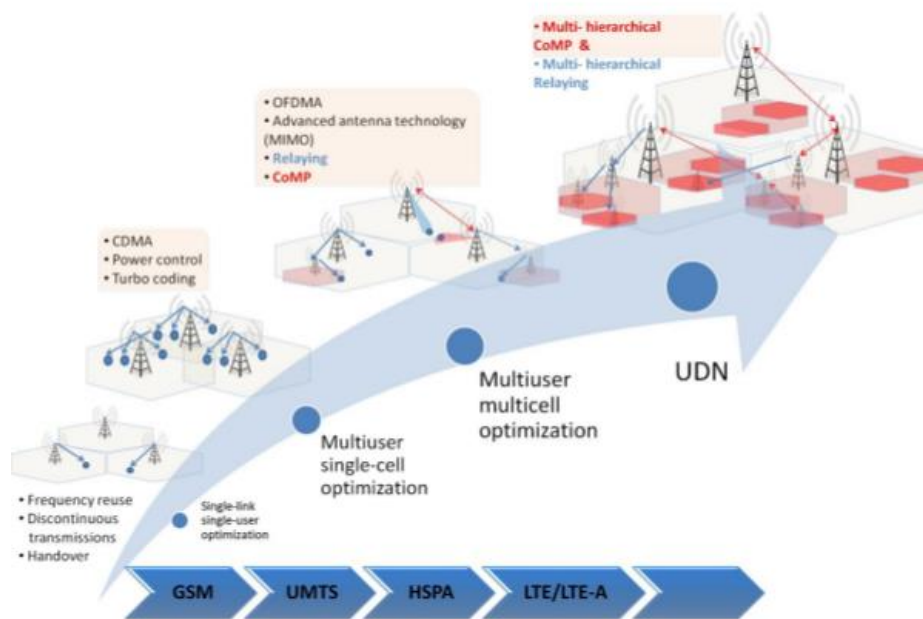


Εικόνα 1.11: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής όπου ένα τερματικό έχει πρόσβαση σε τέσσερις διαφορετικές RAT [14]

1.3.2.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου

Προκειμένου να διευθετηθούν οι προκλήσεις που προκύπτουν από τις ανάγκες του χρήστη και να υποστηριχθούν τα διαφορετικά σενάρια που αναμένεται να προκύψουν, προβλέπεται μία συνεχής εξέλιξη των υφιστάμενων λειτουργιών. Η πυκνοποίηση του δικτύου είναι απαραίτητη ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε διεκπαιρευτική ικανότητα και καθυστέρηση, που φαίνεται ότι θα εμφανιστούν από το 2020 και έπειτα, αφού είναι ένας τρόπος να αυξηθεί η χωρητικότητα και ο ρυθμός δεδομένων. Από αυτή την ημερομηνία και μετά θα είναι απαραίτητη η εγκατάσταση εξαιρετικά πυκνών μικρών κυψελών [9].

Μία απλή αλλά εξαιρετικά αποδοτική μέθοδος για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου είναι η μείωση του μεγέθους των κυψελών. Τα δίκτυα πλέον εξελίσσονται με ταχύτατους ρυθμούς, ώστε να συμπεριλάβουν εμφωλευμένες μικρές κυψέλες όπως τις πικοκυψέλες (με εμβέλεια μικρότερη των 100 μέτρων) και τις φεμπτοκυψέλες (με εμβέλεια παρόμοια με αυτή του WiFi), καθώς και συστήματα κατανομημένων κεραιών. [7]. Οι μικροί κόμβοι πρόσβασης, με χαμηλή ισχύ μετάδοσης και χωρίς ακριβείς απαιτήσεις σχεδιασμού, θεωρείται ότι θα επεκταθούν και θα αναπτυχθούν ευρέως, καταλήγοντας σε ένα UDN. Αυτή η προσέγγιση θα βελτιώσει τη φασματική απόδοση, μειώνοντας την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, καθώς και εκφορτώνοντας την ασύρματη κίνηση, και άρα απελευθερώνοντας ραδιο - πόρους στο δίκτυο πρόσβασης [10].



Εικόνα 1.12: Η δομή ενός Ultra Dense Network, και οι διάφορες επιπρόσθετες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί [25]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, τα UDNs χρησιμοποιούνται ήδη σε κάποιο βαθμό από τα προηγούμενα συστήματα επικοινωνιών και θα συνεχίσουν την εξέλιξή τους ώστε να χρησιμοποιηθούν και από τα συστήματα 5G. Έως τώρα υποβοηθούνταν από τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, MIMO, Relaying και CoMP και αποτελούνταν από συσκευές και κυψελωτούς σταθμούς βάσης (μικρούς και μεγαλύτερους). Τα UDNs συνεχίζουν να αναπτύσσονται, ώστε πλέον στα συστήματα 5G να υπάρξουν εξελιγμένες δυνατότητες επικοινωνίας πολλών χρηστών προς πολλά σημεία, επικοινωνίες M2M και συσκευής-προς-συσκευή (Device-to-Device - D2D), και γενικώς εκμετάλλευση των κοντινών επικοινωνιών, καθώς και προηγμένες τεχνολογίες multi-hierarchical CoMP και multi-hierarchical Relaying.

Πάνω σε αυτή την κατηγορία αρχιτεκτονικών, όπως για παράδειγμα τα UDNs, μπορούμε να ενσωματώσουμε διάφορες τεχνολογίες. Ένα παράδειγμα είναι οι επικοινωνίες M2M, οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν μία τεχνολογία η οποία επιτρέπει τόσο σε ενσύρματα όσο και ασύρματα συστήματα να επικοινωνούν με άλλες συσκευές ίδιου τύπου. Οι επικοινωνίες M2M θεωρούνται ως ένα αναπόσπαστο τμήμα του ανερχόμενου IoT και επιφέρουν αρκετά οφέλη στη βιομηχανία και γενικότερα στις επιχειρήσεις, αφού έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών [6]. Παρόμοια περίπτωση αποτελούν και οι επικοινωνίες device-to-device (D2D). Πρόκειται ουσιαστικά για την επικοινωνία των χρηστών στα κυψελωτά δίκτυα με μειωμένη ή και καμία παρέμβαση σταθμού βάσης [22]. Πάνω στις αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου μπορεί επίσης να υλοποιηθεί και η τεχνολογία Coordinated Multi-Point transmission/reception (CoMP), που θεωρείται ως ένας τρόπος για τη βελτίωση της κάλυψης και της διεκπεραιωτικής ικανότητας. Σύμφωνα με αυτή, όταν μία κινητή συσκευή βρίσκεται στην άκρη μίας κυψέλης, ενδεχομένως λαμβάνει σήματα από πολλές κυψέλες. Αντίστοιχα, η μετάδοση της συσκευής μπορεί να λαμβάνεται σε πολλές κυψέλες. Συνεπώς, εάν η μεταδιδόμενη σηματοδότηση από πολλές κυψέλες είναι συγχρονισμένη, η απόδοση του συστήματος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά [23].

Οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην πυκνοποίηση του δικτύου παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία περιλαμβάνουν μειωμένη εκπομπή ενέργειας και

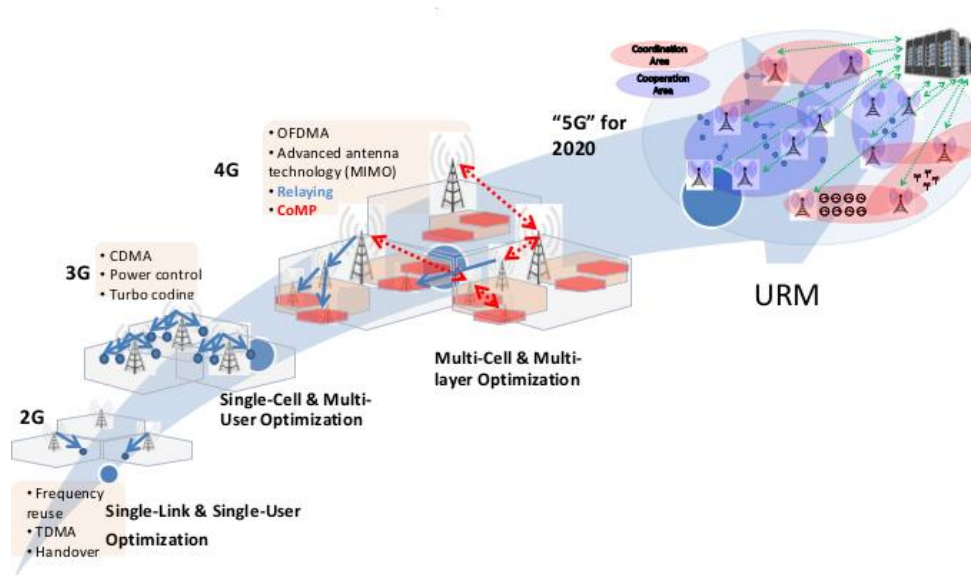
μειωμένες παρεμβολές, καθώς επίσης και ομαδική μετάδοση και διασύνδεση κάθε δικτυακού κόμβου άμεσα με όλους τους υπόλοιπους (mesh networking). Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρουν οι αρχιτεκτονικές αυτές είναι η αναβαθμισμένη ασφάλεια που παρέχεται λόγω της απουσίας ενδιάμεσης δρομολόγησης δικτύου, όπως και η αυξημένη χωρητικότητα μέσω της εκφόρτωσης όπου είναι απαραίτητο. Όμως, οι αρχιτεκτονικές αυτές δεν είναι απαλλαγμένες μειονεκτημάτων, τα οποία πρέπει να μελετηθούν αναλυτικά.

Για παράδειγμα, απαιτούνται νέα μοντέλα μετάδοσης, καθώς και αναλυτικά μοντέλα συστήματος ώστε να αναπτυχθούν αλγόριθμοι δρομολόγησης και επεξεργασίας σήματος στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο ζεύξης. Κάποια ακόμη αποτελέσματα τα οποία πρέπει να επιτευχθούν ώστε να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που εγείρονται από την εν λόγω κατηγορία αρχιτεκτονικών είναι η μείωση των παρεμβολών αλλά και η διαχείριση κινητικότητας, αφού μία τυπική κινητή συσκευή θα βρίσκεται υπό την κάλυψη πολλών μικρών κυψελών. Συνεπώς, ο καθορισμός του προτύπου και του φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία. Επίσης, οι μικρές κυψέλες θα πρέπει να είναι σε θέση να αδρανούν όταν δεν εξυπηρετούν κάποια κινητή συσκευή, ώστε να εξοικονομούν ενέργεια. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης σε τέτοιου είδους αρχιτεκτονικές θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελούν αυτόνομα λειτουργίες αυτο-οργάνωσης.

1.3.2.3 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην κεντρική διαχείριση πόρων και στις ετερογενείς τεχνολογίες

Η δεύτερη κατηγορία αρχιτεκτονικών βασίζεται στην κεντρική διαχείριση των πόρων του δικτύου, γνωστή ως URM. Ως προς το φυσικό επίπεδο, η κατηγορία αυτή δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην πυκνοποίηση του δικτύου, όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Θα διαθέτει δηλαδή τους ήδη υπάρχοντες κυψελωτούς σταθμούς βάσης (είτε μικρούς είτε μεγαλύτερους), καθώς και κινητές συσκευές. Ο εξοπλισμός του φυσικού επιπέδου είναι και εδώ κυψελωτός, με άλλα λόγια λειτουργεί σε αδειοδοτημένο φάσμα.

Στις αρχιτεκτονικές της κατηγορίας URM υπάρχει επιπροσθέτως και μία κεντρική οντότητα, η οποία αναλαμβάνει να επεξεργάζεται και να διαχειρίζεται όλους τους πόρους. Εκτός από την κεντρική οντότητα διαχείρισης των πόρων που διαθέτουν οι αρχιτεκτονικές URM, μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν μία cell-less τεχνολογία, η οποία βασίζεται στην τεχνική κατανεμημένης εισόδου – κατανεμημένης εξόδου (Distributed Input-Distributed Output - DIDO). Αυτή επιτρέπει σε κάθε χρήστη να χρησιμοποιεί τον πλήρη ρυθμό δεδομένων του διαμοιραζόμενου φάσματος ταυτόχρονα με όλους τους άλλους χρήστες μέσω ενός επεξεργαστή δεδομένων κεντρικής διαχείρισης, ο οποίος μειώνει και τις παρεμβολές. Οι διαφορές των αρχιτεκτονικών URM σε σχέση με αυτές που βασίζονται στην πυκνοποίηση του δικτύου έγκεινται επομένως όχι στο φυσικό επίπεδο, αλλά στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται πάνω από αυτό.



Εικόνα 1.13: Η δομή μίας αρχιτεκτονικής βασισμένης σε κεντρική διαχείριση δεδομένων (URM), και οι διάφορες επιπρόσθετες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί [25]

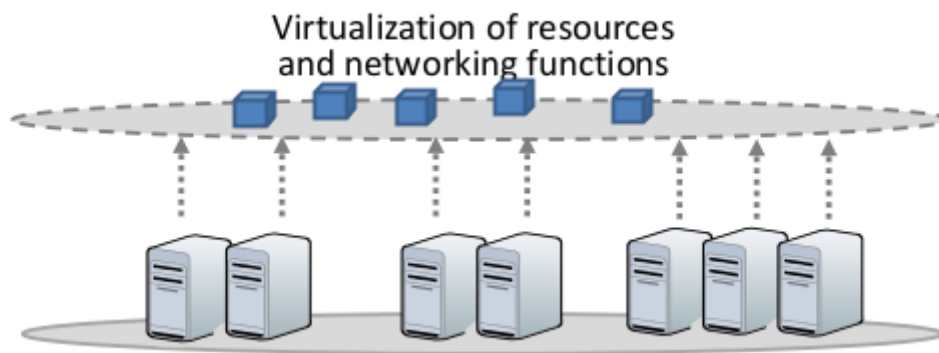
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι στην ταχεία εξέλιξη προς τα δίκτυα 5G, οι αρχιτεκτονικές URM διαφοροποιούνται σε επίπεδο τεχνολογιών που χρησιμοποιούν, καθώς εάν εστιάσουμε στο τμήμα της εικόνας για τα δίκτυα 5G, βλέπουμε την ύπαρξη κεντρικής οντότητας που συλλέγει όλες τις πληροφορίες για τους πόρους του δικτύου και τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ τους, και διαχειρίζεται όλες τις υπόλοιπες οντότητες των δικτύων.

Και στις αρχιτεκτονικές URM μπορεί να ενσωματωθεί ένα εύρος τεχνολογιών. Κάποιες από αυτές είναι οι επικοινωνίες M2M και D2D, όπως και οι τεχνολογίες CoMP και η cell-less architecture, οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω. Εκτός αυτών, μπορεί πιθανώς να γίνει εκμετάλλευση των HetNets. Από την άποψη του χρήστη ή των εφαρμογών χρήστη, ένα ετερογενές σύστημα ή ετερογενές δίκτυο θεωρείται ως ένα ενοποιημένο δίκτυο που θα τοποθετήσει τη σύνδεση με τους εξυπηρετητές εφαρμογών εντός και εκτός του δικτύου του διαχειριστή. Στα ετερογενή ασύρματα δίκτυα η προσέγγιση που είναι σχεδιασμένη για τους χρήστες είναι η "always best connected" [14]. Τα συστήματα 5G πρόκειται να χρησιμοποιούν πολλούς περισσότερους σταθμούς βάσης, που θα λειτουργούν σε ένα HetNet, συνδυάζοντας μακροεγκαταστάσεις με μικρότερους σταθμούς βάσης και χρησιμοποιώντας μία σειρά από ραδιο - τεχνολογίες [9].

Η τεχνολογία URM διαθέτει ως σημαντικό πλεονέκτημα ότι εάν επιτευχθεί η υλοποίησή της, προφανώς επιτυγχάνεται αυτόματα και το βέλτιστο αποτέλεσμα, αφού έχουμε τη δυνατότητα διατήρησης πληροφορίας για οτιδήποτε συμβαίνει στο δίκτυο, κεντρικής διαχείρισης των πόρων και δυνατότητα ελέγχου όλων των συσχετίσεων του δικτύου. Όμως, το μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι ότι σε περιπτώσεις μεγάλης εμβέλειας, δεν είναι δυνατό να διατηρείται πληροφορία για οποιονδήποτε χρήστη, σήμα, ή γενικώς οντότητα μέσα στο δίκτυο. Για τη διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερης πληροφορίας, είναι αναγκαία η ύπαρξη μεγάλου δικτύου κορμού, κάτι που σημαίνει ότι οι καθυστερήσεις στο δίκτυο θα είναι αυξημένες. Επίσης, για τον ίδιο σκοπό απαιτείται μεγάλος βαθμός σηματοδότησης και κατανάλωση πολλής επεξεργαστικής ισχύος. Συνεπώς, το μοντέλο URM καθίσταται μη επεκτάσιμο, εάν δεν επιλυθούν τα μειονεκτήματά του.

1.3.2.4 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου

Η τρίτη κατηγορία αρχιτεκτονικών προσεγγίσεων για τα συστήματα 5G είναι εκείνες οι οποίες βασίζονται στην εικονικοποίηση του δικτύου. Ο όρος «εικονικοποίηση του δικτύου» (network virtualization) αναφέρεται στη διαδικασία του συνδυασμού της λειτουργικότητας και των πόρων υλικού (hardware) και λογισμικού (software) του δικτύου σε μία ενιαία διοικητική οντότητα βασισμένη στο λογισμικό, δηλαδή ένα εικονικό δίκτυο [24]. Συγκεκριμένα, η εικονικοποίηση του δικτύου είναι η δυνατότητα προσομοίωσης συσκευών υλικού εξοπλισμού, όπως έναν εξυπηρετή (server), συσκευή αποθήκευσης ή δικτυακό πόρο με τη χρήση λογισμικού. Όταν εφαρμόζεται σε δίκτυο, η εικονικοποίηση δημιουργεί μία βασισμένη στο λογισμικό εικόνα των δικτυακών πόρων υλικού και λογισμικού. Οι αρχιτεκτονικές αυτής της κατηγορίας βασίζονται δηλαδή στη δημιουργία μίας εικονικής έκδοσης, η οποία δεν αποτελεί την ίδια τη φυσική συσκευή, αλλά συμπεριφέρεται και παρουσιάζεται στο χρήστη ως η πραγματική συσκευή. Συνεπώς, εικονικό πόρο αποκαλούμε μία αφαιρετική απεικόνιση ενός IT πόρου ο οποίος χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές ώστε να επιτύχει το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα χωρίς την παρουσία του πραγματικού πόρου [26].



Εικόνα 1.14: Η δομή μίας αρχιτεκτονικής βασισμένης σε εικονικοποίηση του δικτύου [25]

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι αρχιτεκτονικές που αντιστοιχίζονται στην εν λόγω κατηγορία. Όλη η λειτουργικότητα διαχωρίζεται από το hardware και προσομοιώνεται ως ένα «εικονικό στιγμιότυπο» (virtual instance), με την ικανότητα να λειτουργεί ακριβώς όπως θα λειτουργούσε η παραδοσιακή λύση του hardware. Οι φυσικές συσκευές δικτύου είναι υπεύθυνες απλώς για την προώθηση των πακέτων, ενώ το εικονικό δίκτυο (δηλαδή το software) παρέχει μία ευφυή αφαίρεση η οποία διευκολύνει την ανάπτυξη και τη διαχείριση των δικτυακών λειτουργιών και των υποκείμενων δικτυακών πόρων [27].

Η εικονικοποίηση του δικτύου και η διαχείριση των πόρων μέσω λογισμικού, όπως περιγράφουμε, υλοποιείται κυρίως από τις τεχνολογίες NFV και SDN.

Η NFV είναι μία τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να εικονικοποιήσει δικτυακές λειτουργίες που έως τώρα εκτελούνταν από ιδιόκτητο, ειδικά αφιερωμένο για την τεχνολογία αυτή hardware [26]. Είναι ουσιαστικά ένα σενάριο δικτυακής αρχιτεκτονικής το οποίο προτείνει τη χρήση τεχνολογιών σχετικών με τις τεχνικές εικονικοποίησης της βιομηχανίας Πληροφορικής και Επικοινωνιών ώστε να εικονικοποιηθούν ολόκληρα τμήματα λειτουργιών των δικτυακών κόμβων. Η NFV μπορεί δυναμικά να επηρεάσει οποιαδήποτε δικτυακή λειτουργία που υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί πάνω σε hardware σχεδιασμένο ειδικά για αυτήν και να τη διαχωρίσει από αυτό. Μόλις γίνει αφαιρετική, η λειτουργία μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μία οντότητα λογισμικού, και

επίσης μπορεί να μετακινηθεί ή να αντιγραφεί σε μία άλλη υπολογιστική πλατφόρμα ή hardware [28].

Το SDN είναι μία προσέγγιση για τη δικτύωση υπολογιστών η οποία επιτρέπει στους διαχειριστές των δικτύων να διαχειρίζονται τις δικτυακές υπηρεσίες μέσω αφαίρεσης της λειτουργικότητας χαμηλότερου επιπέδου. Αυτό επιτυγχάνεται αποσυνδέοντας το control plane (δηλαδή το σύστημα που παίρνει αποφάσεις για την κατανομή της κίνησης) από το data plane (δηλαδή τα υποκείμενα συστήματα που προωθούν την κίνηση στον επιλεγμένο προορισμό). Το SDN με άλλα λόγια αποτελεί μία αρχιτεκτονική η οποία κάνει αφαιρετική την υποκείμενη υποδομή του δικτύου, ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί ως εικονική οντότητα [26]. Επιτρέπει τον προγραμματισμό της NFV υποδομής για την υποστήριξη της ανάπτυξης νέων δικτυακών λειτουργιών σε διάφορα περιβάλλοντα.

Μία συγκεκριμένη εφαρμογή του NFV είναι η τεχνολογία του Cloud – Radio Access Network (Cloud – RAN ή C – RAN), το οποίο αποτελεί μία νέα κυψελωτή αρχιτεκτονική δικτύου για τη μελλοντική υποδομή των κινητών δικτύων. Το C-RAN θεωρείται ως μία αρχιτεκτονική εξέλιξη βασισμένη στην κλασική αρχιτεκτονική καταμεμημένων σταθμών βάσης. Βασίζεται σε πολλές τεχνολογικές πρακτικές των ασύρματων και οπτικών επικοινωνιών. Τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής C-RAN που είναι διαφορετικά από άλλες κυψελωτές αρχιτεκτονικές δικτύου είναι οι κεντροποιημένες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, έμφυτη υποστήριξη συνεργατικών ραδιοτεχνολογιών και ικανότητα εικονικοποίησης σε πραγματικό χρόνο [20]. Η τεχνολογία C - RAN απαιτεί εξειδικευμένο hardware στα κέντρα δεδομένων, ώστε να ικανοποιεί τις αυστηρές απαιτήσεις για πραγματικό χρόνο στα κινητά δίκτυα [10].

Οι αρχιτεκτονικές της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, γεγονός που τις καθιστά πολλά υποσχόμενες για την υποστήριξη των συστημάτων πέμπτης γενιάς. Στα πλεονεκτήματά της ανήκουν τα παρακάτω :

- Η μείωση των CAPEX και OPEX για τους διαχειριστές δικτύου μέσω μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας και μειωμένου κόστους εξοπλισμού (δηλαδή δικτυακών συσκευών όπως δρομολογητές, firewalls και εξοπλισμό ασφάλειας) [26].
- Ευελιξία, επεκτασιμότητα και ασφάλεια [29].
- Ταχεία ανάπτυξη νέων καινοτόμων υπηρεσιών, μέσω μείωσης του χρόνου που απαιτείται για να φτάσουν στην αγορά.
- Εξαιρετική απλοποίηση των δικτυακών λειτουργιών, αφού το λογισμικό μπορεί δυναμικά να μεταφέρεται σε διάφορες τοποθεσίες μέσα στο δίκτυο όπως απαιτείται, χωρίς ανάγκη εγκατάστασης νέου εξοπλισμού.
- Οι εικονικοποιημένες λειτουργίες μπορούν να είναι διαχειρίσιμες από εγκαταστάσεις λογισμικού απομονωμένες από το υλικό.
- Η ενοποίηση πολλών δικτυακών λειτουργιών που εκτελούνται σε servers βασισμένους στα βιομηχανικά πρότυπα θα επιτύχει σημαντική μείωση ενέργειας [30].
- Δυνατότητα αφαίρεσης, ώστε να απλοποιηθεί η χρήση των υποκείμενων πόρων.

Απομόνωση μεταξύ των δικτυακών συσκευών, ώστε να διαχωριστούν οι χρήσεις των υποκείμενων πόρων [31].

Οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην εικονικοποίηση του δικτύου παρουσιάζουν και αυτές μία σειρά από μειονεκτήματα, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους. Ένα από αυτά είναι ότι δεν υπάρχει πλήρης απομόνωση μεταξύ των διάφορων δικτυακών συσκευών. Αυτό σημαίνει ότι μία ενδεχόμενη απροσδόκητη συμπεριφορά μίας υπηρεσίας θα μπορούσε να επηρεάσει άλλες συνυπάρχουσες υπηρεσίες. Εγείρονται επίσης κάποια προβλήματα ασφάλειας, κάτι που προκαλεί υποβάθμιση της απόδοσης

άλλων υπηρεσιών. Επιπλέον, όσο πιο ετερογενές είναι το δικτυακό περιβάλλον, τόσο πιο σύνθετη γίνεται η παροχή ενός ισοδύναμου εικονικοποιημένου σεναρίου. Επιπροσθέτως, ένα ζήτημα εξαιρετικής σημασίας που πρέπει σίγουρα να επιλυθεί είναι η διασφάλιση της διαλειτουργικότητας, έτσι ώστε οι διαχειριστές του δικτύου να μην περιορίζονται σε μία συγκεκριμένη επιλογή προμηθευτή [32]. Τέλος, υπάρχει περιορισμός στην επεκτασιμότητα του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι οι απαιτήσεις των χρηστών από το δίκτυο επίσης περιορίζονται, αφού είναι δύσκολο για τους παρόχους να προσφέρουν περισσότερο από το διαθέσιμο εξοπλισμό [31].

1.3.3 Επίπεδα OSI συστημάτων 5ης γενιάς

Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα επίπεδα του μοντέλου διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (Open Systems Interconnection - OSI), όπως αναμένονται να διαμορφωθούν εκ νέου με την εξάπλωση των συστημάτων πέμπτης γενιάς 5G σύμφωνα με τις έρευνες [11] και [14]. Στα πλαίσια του φυσικού επιπέδου συμπεριλαμβάνεται στην επόμενη υποενότητα μία αναλυτική περιγραφή του νέου φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί για τα συστήματα 5G, εφόσον το φάσμα που ήδη χρησιμοποιείται δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες που θα δημιουργηθούν. Σημειώνεται ότι οι ονομασίες και η ορολογία που χρησιμοποιούνται πηγάζουν από τις προαναφερθείσες ερευνητικές εργασίες.

- **Open Wireless Architecture Layer ([11])**: Τα δύο πρώτα επίπεδα του OSI (OSI layer 1 και OSI layer 2), τα οποία αντιστοιχούν στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο ζεύξης, καθορίζουν τις ραδιοτεχνολογίες μέσω των οποίων παρέχεται πρόσβαση στο διαδίκτυο με περισσότερους ή λιγότερους μηχανισμούς υποστήριξης ποιότητας υπηρεσίας, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την τεχνολογία πρόσβασης. Τα δύο αυτά επίπεδα του OSI στα 5G κινητά δίκτυα θα συγχωνευθούν σε ένα επίπεδο, το Open Wireless Architecture (σύμφωνα με την έρευνα [11]), το οποίο θα είναι το πρώτο της στοίβας πρωτοκόλλων [11], [14].
- **Network layer** : Όσον αφορά στο επίπεδο δικτύου, το οποίο βρίσκεται πάνω από τα δύο πρώτα επίπεδα του OSI, πρόκειται να είναι IP (Internet Protocol) στο σημερινό κόσμο επικοινωνίας, είτε IPv4 είτε IPv6, ανεξαρτήτως της ραδιοτεχνολογίας. Η IPv4 (έκδοση 4 του IP) είναι παγκοσμίως διαδεδομένη, αν και αντιμετωπίζει κάποια προβλήματα, όπως περιορισμένο χώρο διεύθυνσεων και μπορεί εύκολα να παρέχει υποστήριξη για την ποιότητα υπηρεσίας ανά ροή. Τα θέματα αυτά διευθετούνται στην έκδοση IPv6, με κόστος όμως τη σημαντικά μεγαλύτερη κεφαλίδα πακέτου. Επίσης, η κινητικότητα παραμένει ακόμα πρόβλημα προς επίλυση. Υπάρχει Mobile IP πρότυπο καθώς και πολλές λύσεις μικρο - κινητικότητας. Όλα τα κινητά δίκτυα θα χρησιμοποιούν Mobile IP στα συστήματα 5G, και κάθε κινητό τερματικό θα αποτελεί ξένο πράκτορα (Foreign Agent - FA), διατηρώντας την διεύθυνση πρόνοιας (Care of Address - CoA) και επιλέγοντας ανάμεσα στη σταθερή IPv6 διεύθυνσή του και στην CoA διεύθυνση για το τρέχον ασύρματο δίκτυο. Στην περίπτωση όπου μία κινητή συσκευή συνδέεται σε αρκετά κινητά ή ασύρματα δίκτυα την ίδια στιγμή, θα διατηρεί διαφορετικές διευθύνσεις IP για καθεμία από τις ραδιο - διεπαφές, ενώ καθεμία από αυτές τις IP διευθύνσεις θα είναι διεύθυνση CoA για τον FA που είναι τοποθετημένος στο κινητό τηλέφωνο. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να υπάρχει διαχωρισμός του επιπέδου δικτύου σε δύο υπο - επίπεδα στα κινητά 5G, και πιο συγκεκριμένα :
 - Κατώτερο επίπεδο δικτύου (Lower network layer), για κάθε διεπαφή
 - Ανώτερο επίπεδο δικτύου (Upper network layer), για το κινητό τερματικό.

Αυτό οφείλεται στον αρχικό σχεδιασμό του Διαδικτύου, όπου το σύνολο της δρομολόγησης βασίζεται σε IP διευθύνσεις, οι οποίες θα πρέπει να είναι διαφορετικές σε κάθε IP δίκτυο σε όλο τον κόσμο. Το ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) μεταξύ των Upper και Lower επιπέδων δικτύου θα διατηρεί τεχνικές μετάφρασης διευθύνσεων από τη μορφή διευθύνσεων Upper δικτύου (IPv6) σε διαφορετικές IP διευθύνσεις Lower δικτύου (IPv4 or IPv6), και αντιστρόφως. Ο σκοπός του IP είναι να εξασφαλίσει αρκετά δεδομένα ελέγχου (στην κεφαλίδα IP) για τη σωστή δρομολόγηση των IP πακέτων [14].

- **Open Transport Protocol Layer ([11])** : Τα κινητά και ασύρματα δίκτυα διαφέρουν από τα ενσύρματα όσον αφορά στο επίπεδο μεταφοράς. Σε όλες τις εκδόσεις του TCP, η παραδοχή είναι ότι τα χαμένα τμήματα οφείλονται στη συμφόρηση δικτύου, ενώ αντίθετα στα ασύρματα δίκτυα οι απώλειες μπορεί να συμβούν εξαιτίας υψηλότερου ρυθμού σφαλμάτων (bit error rate - BER) στη ραδιο - διεπαφή. Επομένως, αναμένονται τροποποιήσεις και προσαρμογή του TCP για τα κινητά και τα ασύρματα δίκτυα, τα οποία αναμεταδίδουν τα χαμένα ή κατεστραμμένα TCP τμήματα μόνο πάνω από την ασύρματη ζεύξη. Κρίνεται σκόπιμο για τα κινητά τερματικά 5G να διαθέτουν επίπεδο μεταφοράς το οποίο θα μπορεί να ληφθεί και να εγκατασταθεί. Τέτοιου είδους κινητές συσκευές θα έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν έκδοση η οποία στοχεύει σε μία συγκεκριμένη ασύρματη τεχνολογία εγκατεστημένη στους σταθμούς βάσης. Η ονομασία που δίνεται για τις παραπάνω προδιαγραφές από την έρευνα [11] είναι Open Transport Protocol – OTP.
- **Application (service) layer** : Από τη σκοπιά των εφαρμογών, το κυριότερο αίτημα από το κινητό τερματικό 5G είναι να παρέχεται ευφυής διαχείριση ποιότητας υπηρεσίας για μία ποικιλία από δίκτυα. Σήμερα, στην κινητή τηλεφωνία οι χρήστες χειροκίνητα επιλέγουν την ασύρματη διεπαφή για συγκεκριμένη υπηρεσία Διαδικτύου, χωρίς να έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν ιστορικό ποιότητας υπηρεσίας ώστε να επιλέξουν την καλύτερη ασύρματη σύνδεση για μία δεδομένη υπηρεσία. Τα τηλέφωνα 5G θα παρέχουν δυνατότητα για έλεγχο ποιότητας υπηρεσίας και αποθήκευση δεδομένων μετρήσεων σε βάσεις δεδομένων που θα διατηρούν πληροφορίες στο κινητό τερματικό. Οι παράμετροι της ποιότητας υπηρεσίας, όπως η καθυστέρηση, οι απώλειες, το εύρος ζώνης και η αξιοπιστία θα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων στο 5G κινητό τηλέφωνο με σκοπό να χρησιμοποιηθούν από ευφυείς αλγόριθμους που θα εκτελούνται στο κινητό τερματικό ως διεργασίες, οι οποίες τελικά θα προσφέρουν την καλύτερη ασύρματη σύνδεση για τη ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας και τους περιορισμούς σε κόστος. Το επίπεδο αυτό θα είναι και το ανώτερο στη στοίβα πρωτοκόλλων του 5G [11].

OSI Layers	5G Mobile Networks Layers
Application Layer	Application (Service)
Presentation Layer	
Session Layer	Open Transport Protocol
Transport Layer	
Network Layer	Upper Network Layer
	Lower Network Layer
Datalink Layer	Open Wireless Architecture
Physical Layer	

Εικόνα 1.15: Σύγκριση των επιπέδων του μοντέλου OSI με τη στοίβα πρωτοκόλλων του 5G [11]

Στην παραπάνω εικόνα συνοψίζεται η σύγκριση των επιπέδων του μοντέλου OSI σε σχέση με τα επίπεδα πρωτοκόλλων που θα διαμορφωθούν για τα συστήματα 5G. Είναι εμφανές ότι κάποια επίπεδα θα συγχωνευτούν, δημιουργώντας μία στοίβα πρωτοκόλλων με νέα επίπεδα για το 5G, όπως περιγράφηκαν και παραπάνω.

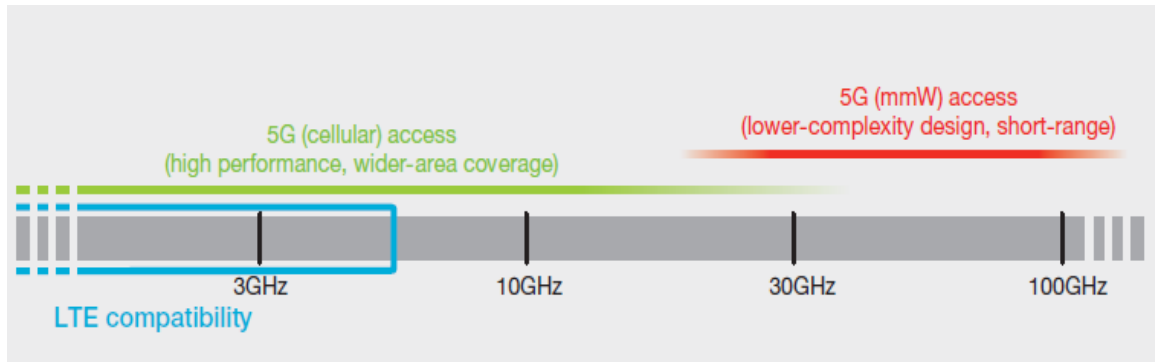
1.3.4 Φάσμα Συχνοτήτων

Από όλα τα στοιχεία τα οποία επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα 5G δίκτυα θα διαχειριστούν την αναμενόμενη αύξηση στην κίνηση δεδομένων, ένα από τα πιο κρίσιμα είναι το επιπρόσθετο φάσμα για κινητές και ασύρματες επικοινωνίες. Κατά παράδοση, τα κυψελωτά συστήματα αναπτύσσονταν αποκλειστικά σε αδειοδοτημένο φάσμα. Η προσέγγιση αδειοδότησης παίζει – και θα συνεχίσει να παίζει στο μέλλον – ένα σημαντικό ρόλο στο έλεγχο των παρεμβολών και στην εγγύηση κάλυψης. Παρ’ όλα αυτά, ειδικά σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, τα μελλοντικά συστήματα θα πρέπει να υποστηρίζουν ένα υψηλότερο βαθμό ευελιξίας του φάσματος [13]. Περισσότερο ραδιο – φάσμα για τα κινητά δίκτυα είναι ζωτικής σημασίας ώστε να ικανοποιηθεί η αυξημένη ζήτηση σε χωρητικότητα και κάλυψη. Νέο φάσμα θα χρειαστεί να διατεθεί και να μπει σε χρήση άμεσα. Χωρίς επαρκές φάσμα, κοινότητες εκτός της εμβέλειας των ενσύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων δε θα μπορούν να επωφεληθούν από τις μελλοντικές υπηρεσίες των συστημάτων 5G. Η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος μπορεί να επεκταθεί υιοθετώντας νέες ζώνες συχνοτήτων και χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο φάσμα πιο αποτελεσματικά (τόσο από την άποψη της συχνότητας όσο και αναφορικά με το πότε και πού χρησιμοποιείται) [9].

Το μη αδειοδοτημένο φάσμα, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της χωρητικότητας, κατά προτίμηση σε συνδυασμό με το αδειοδοτημένο φάσμα για σηματοδότηση ελέγχου και τη διαχείριση κινητικότητας. Η ευελιξία μπορεί επίσης να βελτιωθεί μέσω της χρήσης τμήματος του φάσματος που έως σήμερα δε χρησιμοποιούνταν για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, στην οποία το κυψελωτό σύστημα μπορεί να έχει πρόσβαση στο παραδοσιακό φάσμα που σε άλλη περίπτωση κατανέμεται για χρήση σε άλλες, μη τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες [13].

Έως και σήμερα, το φάσμα για τις κινητές επικοινωνίες έχει επικεντρωθεί μόνο σε εύρος συχνοτήτων κάτω των 6 GHz. Παρ’ όλα αυτά, προκειμένου να εκπληρωθούν οι

μακροπρόθεσμες απαιτήσεις που θα δημιουργηθούν από την κίνηση δεδομένων, δηλαδή οι απαιτήσεις στο χρονικό πλαίσιο 2020-2030, και ίσως ακόμα σημαντικότερα, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα πολύ μεγάλα εύρη ζώνης μετάδοσης που χρειάζονται για να παρέχουν αποτελεσματικά ρυθμούς δεδομένων πολλών Gbps, το εύρος λειτουργίας για την ασύρματη πρόσβαση νέας γενιάς χρειάζεται να επεκταθεί σε υψηλότερες συχνότητες άνω των 10GHz. Το φάσμα άνω των 10 GHz και δυνητικά έως τα 100 GHz θα γίνει απαραίτητο.



Εικόνα 1.16: Η χρήση του φάσματος από 10 GHz έως τα 100 GHz θα γίνει απαραίτητη στα επόμενα έτη [13]

Έτσι, το σύνολο του φάσματος από 10GHz έως τα 100GHz – που συμπεριλαμβάνει το φάσμα του εύρους millimeter wave (mmWave) – εξετάζεται για χρήση από τα κινητά συστήματα επικοινωνίας 5G. Υπό αυτές τις συνθήκες, οποιαδήποτε έρευνα και ανάπτυξη προσεγγίσεων σε σχέση με την ασύρματη πρόσβαση 5G θα πρέπει να μεριμνά για το σύνολο του φάσματος : εκείνου κάτω από 1GHz έως και εκείνο που περιλαμβάνει τις ζώνες συχνότητας mmWave.

Τα συστήματα για χαμηλές και υψηλές ζώνες συχνότητας σχεδιάζονται με διαφορετικό τρόπο. Οι παραδοσιακές ζώνες συχνότητας απαιτούν μεγαλύτερη έμφαση στην φασματική απόδοση για μεγάλες περιοχές (συμπεριλαμβάνοντας τα κέρδη από πυκνότερες και πιο αποτελεσματικές εγκαταστάσεις μικρών κυψελών) επειδή το φάσμα είναι ανεπαρκές. Όμως, στις νέες ζώνες συχνότητας, και ειδικά στη ζώνη mmWave, δεν υπάρχει ανάγκη για καλό συντονισμό της χρήσης του φάσματος προκειμένου να επιτευχθεί εξαιρετικά υψηλή φασματική απόδοση, αφού τεράστια τμήματα γειτονικού φάσματος είναι διαθέσιμα σε αυτές τις υψηλότερες συχνότητες [13].

Έως ένα ορισμένο εύρος συχνότητας, η ραδιο - επαφή μπορεί να κατασκευαστεί με χρήση των ίδιων σχεδιαστικών αρχών που έχουν υιοθετηθεί από τις σύγχρονες κυψελωτές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης για κάλυψη πλήρους περιοχής, και βασιζόμενη σε τεχνολογία RF υψηλής απόδοσης. Για τις υψηλότερες ζώνες συχνότητας τα χαρακτηριστικά διάδοσης και τα θέματα υλοποίησης συνηγορούν υπέρ μιας πιο απλοποιημένης δομής ραδιο – διεπαφής, στοχεύοντας στην επικοινωνία μικρής εμβέλειας για τις εξαιρετικά πυκνές εγκαταστάσεις. Μέχρι τη στιγμή που η ασύρματη πρόσβαση επόμενης γενιάς θα φτάσει στην αγορά, το LTE θα είναι ήδη εξαιρετικά αναπτυγμένο σε αδειοδοτημένο φάσμα κάτω των 6.5GHz. Για την ομαλή εισαγωγή των δυνατοτήτων ευρείας περιοχής των δικτύων 5^{ης} γενιάς, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η διατήρηση της συμβατότητας με το LTE για αυτές τις ζώνες συχνότητας, καθώς με τον τρόπο αυτό θα υποστηρίζεται η συνύπαρξη με τις υπάρχουσες παλαιότερου τύπου LTE συσκευές.

Η οικονομική προσιτότητα είναι επίσης κρίσιμη, οπότε η εναρμόνιση των ζωνών ραδιοσυχνότητας θα είναι σημαντική για να επιτρέψει την κλιμάκωση της οικονομίας. Αυτό επίσης θα ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές κατά μήκος των ορίων των κυψελών.

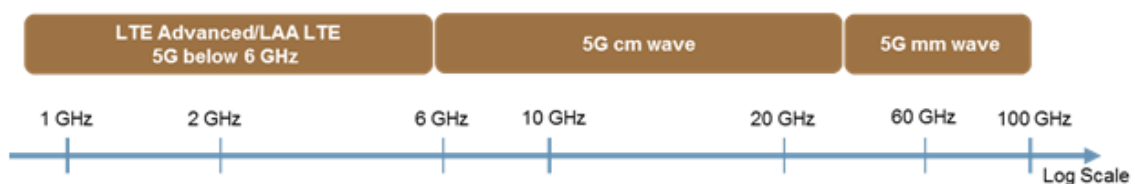
Σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο, προβλέπονται τέσσερις τρόποι ώστε να διασφαλιστεί ότι η έλλειψη φάσματος δεν εμποδίζει την ανάπτυξη :

- Επιπρόσθετο εναρμονισμένο φάσμα πρέπει να διατεθεί και να χρησιμοποιηθεί.
- Η χρήση 100 MHz επιπρόσθετου φάσματος κάτω του 1 GHz θα παρέχει βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση σε μη αστικές περιοχές.
- Η χρήση 500 MHz επιπρόσθετου φάσματος μεταξύ του 1 και των 5 GHz θα παρέχει υψηλότερη χωρητικότητα για δεδομένα.
- Το φάσμα θα πρέπει να αφιερωθεί στην κινητή ευρυζωνική σε μία τεχνολογικά ουδέτερη βάση.

Μέσα στα επόμενα χρόνια, οι βασικές ζώνες που ορίστηκαν για τις 3GPP τεχνολογίες των 900, 1800, 2100 και 2600 MHz θα χρησιμοποιηθούν για νέα δίκτυα. Το μακροπρόθεσμο όραμα είναι η συνένωση της μετάδοσης (broadcast) και ευρυζωνικών υπηρεσιών σε κοινά δίκτυα πολυμέσων η οποία καλύπτει την εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων (ultra – high frequency, UHF) ζώνη κάτω των 700 MHz (472-694 MHz). Οι εγκαταστάσεις μικρών κυψελών θα παίξουν ένα ρόλο μεγάλης σημασίας στα υψηλής χωρητικότητας hotspots, και το φάσμα για αυτά θα μπορούσε να προέρχεται από τη ζώνη των 3500 MHz (3400-3800 MHz), όπου χρησιμοποιείται ποσό φάσματος της τάξης των 400 MHz για σταθερή ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση και δορυφορικές υπηρεσίες. Επιπροσθέτως, άλλα μικρότερα τμήματα φάσματος μπορούν να διατεθούν πριν από το 2020, είτε αποκλειστικά, είτε χρησιμοποιώντας νέες μεθόδους διαμοιρασμού φάσματος.

Οι μη αδειοδοτημένες ζώνες όπως εκείνη των 5 GHz, ή στο μέλλον εκείνη των 60 GHz, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν επιπρόσθετες επιλογές για εκφόρτωση της κίνησης, χωρίς να εγγυώνται για την ποιότητα υπηρεσίας. Το αποτέλεσμα είναι ότι έως 1.5 GHz από το σπανιότερο φάσμα κάτω των 6 GHz μπορεί να γίνει διαθέσιμο εντός της τρέχουσας δεκαετίας. Τουλάχιστον 1 GHz από αυτό θα είναι παραδοσιακό αποκλειστικό φάσμα, ενώ οι νέες τεχνικές διαμοιρασμού φάσματος μπορούν να ξεκλειδώσουν περισσότερο φάσμα για χρήση από την κινητή ευρυζωνική.

Μία άλλη δυνατή προσέγγιση για τα συστήματα 5G θα μπορούσε να χρησιμοποιεί επικοινωνίες mmWave (καθώς και ζώνες centimeter που προηγουμένως δε χρησιμοποιούνταν) για το δίκτυο κορμού και το δίκτυο πρόσβασης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.17: Χρήση του φάσματος στις ζώνες cmWave και mmWave για την τεχνολογία 5G

Η επικοινωνία σε υψηλές συχνότητες δεν είναι κατάλληλη για την παροχή κάλυψης μεγάλης εμβέλειας, και οι νέες ευκαιρίες στην περιοχή του mmWave δε θα αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές κατανομές ζωνών συχνοτήτων. Όμως, με 10 GHz του εύρους ζώνης διαθέσιμα στη ζώνη των 70-85 GHz, αυτό το φάσμα μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση μεγάλων όγκων κίνησης μικρών κυψελών [9].

1.4 Ανάλυση Κυρίαρχων Τεχνολογιών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται με περαιτέρω λεπτομέρειες κάποιες από τις βασικότερες τεχνολογίες που πρόκειται να εξυπηρετήσουν τα συστήματα 5G. Σημαντικότερες θεωρούνται οι mmWave, Massive MIMO αλλά και οι τεχνολογίες βασισμένες στην εικονικοποίηση NFV και SDN.

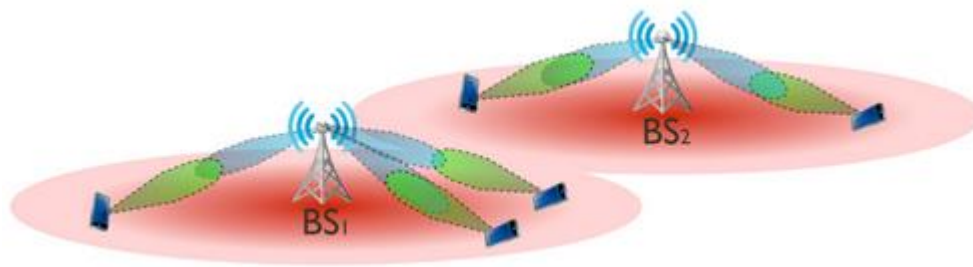
1.4.1 mmWave

1.4.1.1 Ορισμός και Αναγκαιότητα

Τα επίγεια ασύρματα συστήματα επικοινωνιών έχουν σε μεγάλο βαθμό περιορίσει τη λειτουργία τους στο σχετικά μικρό φάσμα των μικροκυματικών (microwave) συχνοτήτων, το οποίο εκτείνεται από αρκετές εκατοντάδες MHz σε μερικά GHz και αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από λίγα εκατοστά έως και ένα μέτρο. Ωστόσο, η εν λόγω φασματική ζώνη – η οποία συχνά αποκαλείται “beachfront spectrum”— είναι σχεδόν πλήρως απασχολημένη, κυρίως κατά τις ώρες αιχμής. Ανεξάρτητα από την αποτελεσματικότητα της πύκνωσης του δικτύου και της μείωσης του φόρτου, η αύξηση του διατιθέμενου εύρους ζώνης κρίνεται απαραίτητη. Παρόλο που η χρήση του beachfront εύρους ζώνης μπορεί να γίνει σημαντικά πιο αποδοτική εκσυγχρονίζοντας τις διαδικασίες κατανομής του φάσματος, ο μοναδικός τρόπος για πλήρη κάλυψη των αναδυόμενων αναγκών είναι η αξιοποίηση νέων τμημάτων του φάσματος, και πιο συγκεκριμένα η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων [7].

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, ευτυχώς τεράστια ποσά σχετικά αδρανούς φάσματος υπάρχουν στη ζώνη με ονομασία mmWave (30 έως 300 GHz). Ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον εκδηλώνεται στα κυψελωτά συστήματα για τις ζώνες mmWave, όπου τα διαθέσιμα εύρη ζώνης είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά των σημερινών κυψελωτών δικτύων [7], [19].

Ο χαρακτηρισμός της ITU για τη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από 30 έως 300 GHz είναι Ζώνη Εξαιρετικά Υψηλών Συχνοτήτων (Extremely high frequency - EHF). Τα ραδιοκύματα στην εν λόγω ζώνη παρουσιάζουν μήκη κύματος από 1 έως 10 mm, εξού και το όνομα millimetre wave band, με συντομογραφία mmWave ή mmW. Σε σύγκριση με τις χαμηλότερες ζώνες, τα ραδιοκύματα σε αυτή τη ζώνη έχουν υψηλή ατμοσφαιρική εξασθένιση καθώς απορροφώνται από τα αέρια της ατμόσφαιρας εξαιτίας της βροχής, του χιονιού ή της ομίχλης (αναλόγως με το τμήμα της ζώνης για το οποίο πρόκειται). Επομένως, δε χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις. Έχουν μικρή εμβέλεια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για επίγεια επικοινωνία σε κάποιες εφαρμογές μικρής απόστασης έως περίπου ένα χιλιόμετρο [19]. Ωστόσο, χάρη στο μικρό μήκος κύματος, οι μικρότερες κεραίες ενδέχεται να διαθέτουν πολύ μικρές ακτίνες, κάτι που κάνει ευκολότερη την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων, όπως επίσης και το σχεδιασμό του δικτύου και τη διαχείριση των παρεμβολών. Πρόκειται για την υψηλότερη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων σε πρακτική εφαρμογή σήμερα [35]. Η μορφή ενός συστήματος mmWave απεικονίζεται παρακάτω.



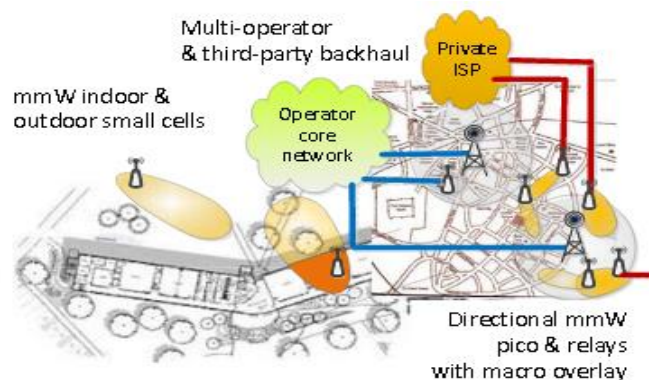
Εικόνα 1.18: Η μορφή ενός κυψελωτού συστήματος mmWave [36]

1.4.1.2 Δομή Συστημάτων mmWave

Ο κύριος λόγος για τον οποίο το φάσμα στις ζώνες mmWave παραμένει αχρησιμοποίητο είναι ότι μέχρι πρόσφατα είχε κριθεί ακατάλληλο για κινητές επικοινωνίες, εξαιτίας των μη ευνοϊκών ιδιοτήτων διάδοσης, όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Η κυρίαρχη αντίληψη ήταν επομένως ότι αυτές οι συχνότητες, και συγκεκριμένα η εκτενής μη αδειοδοτημένη ζώνη κοντά στα 60 GHz, ήταν κατάλληλες κυρίως για μετάδοση πολύ μικρής εμβέλειας. Συνεπώς, η έμφαση είχε δοθεί στο WiFi καθώς και στις σταθερές - ασύρματες εφαρμογές στις ζώνες των 28 GHz, 38 GHz, 71 έως 76 GHz και 81 έως 86 GHz. Παρ' όλα αυτά, τα εμπόδια που σχετίζονται με τη μετάδοση θεωρείται όλο και περισσότερο ότι μπορούν να ξεπεραστούν [7].

Χάρη στο μικρό μήκος κύματος, οι αντίστοιχες διατάξεις που θα υποστηρίζουν την τεχνολογία mmW μπορούν στην πραγματικότητα να φιλοξενήσουν περισσότερα στοιχεία από ότι οι σημερινές κυψελωτές διατάξεις και μπορούν να προσφέρουν αρκετό κέρδος, ώστε να αντισταθμίζονται οι απώλειες και να διασφαλίζεται υψηλός λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio – SNR) στον παραλήπτη [36].

Λόγω των έμφυτων περιορισμών της mmWave μετάδοσης, όπως τα blockages, τα κυψελωτά mmWave συστήματα δε μπορούν από μόνα τους να παρέχουν ομοιόμορφη, ισχυρή και υψηλή χωρητικότητα για ένα ευρύ φάσμα εγκαταστάσεων. Συνεπώς, τα δίκτυα mmWave θα είναι εκ φύσεως ετερογενή, με το βαθμό της ετερογένειάς τους να είναι ανάλογος της πυκνότητάς τους. Τα κυψελωτά mmWave συστήματα θα χρειάζεται να συνυπάρχουν και να συνεργάζονται με τις συμβατικές μικροκυματικές κυψέλες και να περιλαμβάνουν επιπροσθέτως πολύ μικρές κυψέλες και πληθώρα από αναμεταδότες. Επίσης, προκειμένου να παρέχεται κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους και να χρησιμοποιείται αποδοτικά το φάσμα, οι διαχειριστές των δικτύων μπορούν να διαμοιράζονται μεταξύ τους το δίκτυο κορμού και το φάσμα, σε πολύ πιο σημαντικό βαθμό από ότι στις τρέχουσες εγκαταστάσεις [33].



Εικόνα 1.19: Η ετερογένεια που θα παρουσιάζουν στη δομή τους τα δίκτυα mmWave [33]

1.4.1.3 Πλεονεκτήματα mmWave

Οι συχνότητες στη ζώνη mmWave ανοίγουν ένα νέο ορίζοντα για τις κυψελωτές επικοινωνίες, ο οποίος υπόσχεται υπηρεσίες υψηλής ποιότητας και υψηλού ρυθμού δεδομένων σε συνδυασμό με περαιτέρω κέρδη [33]. Λόγω του πολύ μεγάλου εύρους ζώνης στη ζώνη συχνοτήτων mmWave, οι εν λόγω επικοινωνίες έχουν προταθεί ώστε να αποτελέσουν ένα σημαντικό τμήμα των 5G κινητών δικτύων, προκειμένου να προσφέρουν υπηρεσίες επικοινωνιών πολλών Gigabit ανά δευτερόλεπτο και video εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης [34], [36].

Ειδικότερα, το μεγαλύτερο τμήμα της τρέχουσας έρευνας έχει επικεντρωθεί στις ζώνες των 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz και στην E-ζώνη (71 έως 76 GHz και 81 έως 86 GHz). Το φάσμα αυτό θα μπορούσε δυνητικά να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει ή να συμπληρώσει τη λειτουργία των οπτικών ινών [19]. Οι τεχνολογίες mmWave μπορούν επίσης να θεωρηθούν ενεργειακά αποδοτικές λύσεις για ασύρματες επικοινωνίες, κάτι που τις καθιστά ισχυρό υποψήφιο για τα συστήματα επόμενης γενιάς.

Με την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης δεδομένων κινητής, τα 5G δίκτυα θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την τεράστια ποσότητα φάσματος στις ζώνες mmWave, ώστε να αυξήσουν σε σημαντικό βαθμό τη χωρητικότητα [34], κάτι που θα μπορούσε να αποτελέσει λύση για τα μειονεκτήματα των αρχιτεκτονικών βασισμένων στην κεντρική διαχείριση πόρων του δικτύου (URMs).

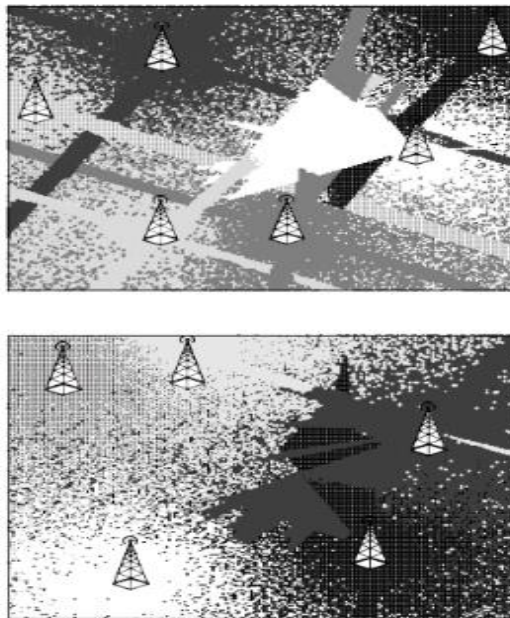
1.4.1.4 Προκλήσεις mmWave

Παρά τα ανωτέρω πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία mmWave, εγείρονται κάποιοι προβληματισμοί σχετικά με την αποδοτικότητά της. Καταρχάς, υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ των επικοινωνιών mmWave και των άλλων υπαρχόντων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, από την άποψη των υψηλών απωλειών μετάδοσης, της κατευθυντικότητας και της ευαισθησίας στο blocking. Συνεπώς, παρά τη δυναμική των επικοινωνιών mmWave, αυτά τους τα χαρακτηριστικά θέτουν αρκετές προκλήσεις ώστε να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι δυνατότητές τους. Στις προκλήσεις αυτές συμπεριλαμβάνονται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και ο σχεδιασμός συστήματος, η διαχείριση των παρεμβολών, η χωρική επαναχρησιμοποίηση και οι τεχνικές αντιμετώπισης του blockage που πρέπει να χρησιμοποιηθούν [34]. Η εδραίωση των κυψελωτών συστημάτων mmWave στην πράξη απαιτεί σωστή αντιμετώπιση των σφαλμάτων καναλιού και των χαρακτηριστικών διάδοσης των ζωνών υψηλών συχνοτήτων [36].

Παρακάτω κατηγοριοποιούμε αναλυτικότερα τις προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα κυψελωτά συστήματα mmWave, προκειμένου να μπορέσουν να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματά τους για τη χρήση τους από τα συστήματα 5G :

- **Ζητήματα μετάδοσης** : Σχετικά με τη μετάδοση mmWave για την κυψελωτή επικοινωνία στα 5G συστήματα, τα κύρια θέματα υπό εξέταση είναι τα παρακάτω:
 - Απώλειες διαδρομής : Όσο οι κεραιές συρρικνώνονται με την αύξηση της συχνότητας, προοδευτικά όλο και περισσότερες από αυτές πρέπει να προστίθενται στην αρχική περιοχή. Η κύρια πρόκληση είναι να συγχρονιστούν οι φάσεις του μεγάλου αυτού πλήθους των κεραιών ώστε να κατευθύνουν και/ή να συλλέγουν ενέργεια με παραγωγικό τρόπο.

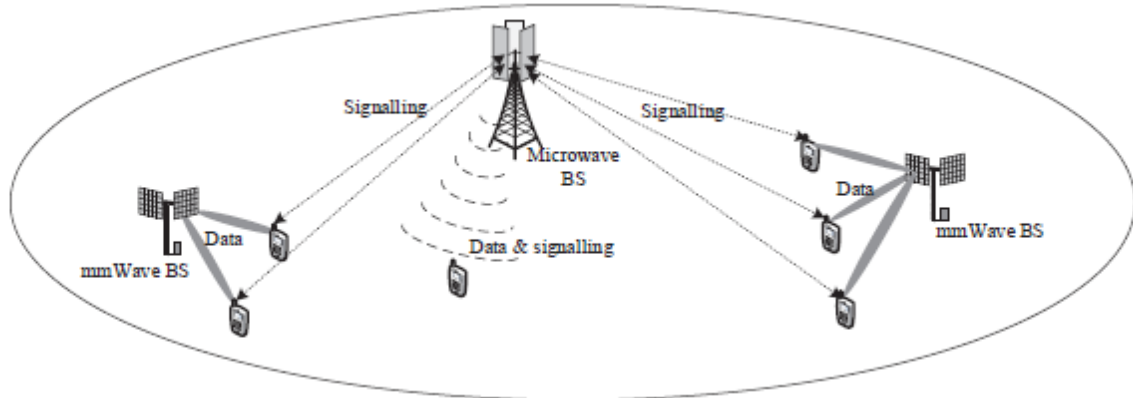
- Απορρόφηση από την ατμόσφαιρα και τη βροχή : Οι επικοινωνίες mmWave αντιμετωπίζουν τεράστιες απώλειες μετάδοσης σε σχέση με άλλα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες. Όμως, εάν χρησιμοποιούνται μικρότερα μεγέθη κυψελών ώστε να βελτιωθεί η σημερινή φασματική απόδοση, η εξασθένηση των σημάτων λόγω της βροχής και η απορρόφησή τους από την ατμόσφαιρα δε δημιουργούν σημαντικές επιπρόσθετες απώλειες διαδρομής για μεγέθη κυψελών της τάξης των διακοσίων μέτρων. Δηλαδή, οι απώλειες μετάδοσης για τις συχνότητες mmWave μπορούν να παρακαμφθούν [34].
- **Μεγάλες διατάξεις, στενές δέσμες :** Η δημιουργία ενός κυψελωτού συστήματος που βασίζεται σε στενές και εστιασμένες δέσμες δεν είναι καθόλου τετριμμένο ζήτημα, και αλλάζει πολλές παραδοσιακές παραμέτρους του σχεδιασμού κυψελωτών συστημάτων. Οι ακτίνες mmWave είναι υψηλά κατευθυντικές, κάτι που μεταβάλλει εντελώς τη συμπεριφορά ως προς τις παρεμβολές καθώς και την ευαισθησία σε περιπτώσεις μη ευθυγραμμισμένων δεσμών. Οι παρεμβολές υιοθετούν μία on/off συμπεριφορά όπου οι περισσότερες δέσμες δε δημιουργούν παρεμβολές, αλλά ισχυρές παρεμβολές προκύπτουν περιοδικά.



Εικόνα 1.20: Οι υπολογισμένες συνδέσεις των σταθμών βάσης με πραγματικές τοποθεσίες κτιρίων [7]

- **Εγκατάσταση σύνδεσης :** Μία βασική πρόκληση για τις στενές δέσμες είναι η δυσκολία που έγκειται στην εγκατάσταση συνδέσεων μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης, κατά την αρχική πρόσβαση καθώς και κατά τις μεταπομπές. Προκειμένου να εντοπίσουν ο ένας τον άλλο, ένας χρήστης και ένας σταθμός βάσης μπορεί να χρειαστεί να σαρώσουν πολλές γωνιακές θέσεις όπου μία στενή δέσμη πιθανώς θα μπορούσε να βρεθεί, ή να υλοποιήσουν τη μετάδοσή τους πάνω σε μία ευρύτερη δέσμη η οποία σταδιακά περιορίζεται, μέσα από μία διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης πολλών σταδίων.
- **Αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των 4G δικτύων :** Μία ταυτόχρονη χρήση των μικροκυματικών και των mmWave συχνοτήτων θα μπορούσε να βοηθήσει ώστε να ξεπεραστούν κάποια από τα παραπάνω εμπόδια. Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση προς αυτή την κατεύθυνση είναι η έννοια των “phantom cells” (που μετονομάστηκαν σε “soft cells” από τον οργανισμό 3GPP), όπου οι συχνότητες mmWave θα

χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων ωφέλιμου φορτίου από σταθμούς βάσης μικρών κυψελών, ενώ το control plane θα λειτουργεί σε μικροκυματικές συχνότητες από μακρο-σταθμούς βάσης. Αυτό διασφαλίζει σταθερές και αξιόπιστες συνδέσεις ελέγχου, βάσει των οποίων θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί εξαιρετικά γρήγορη μετάδοση δεδομένων μέσω συνδέσεων mmWave μικρής εμβέλειας. Τότε, σποραδικές διακοπές αυτών των συνδέσεων mmWave θα είχαν πολύ μικρότερη σημασία και συνέπειες, αφού οι συνδέσεις ελέγχου θα παρέμεναν σε ισχύ και τα χαμένα δεδομένα θα μπορούσαν να ανακτηθούν μέσω επαναμεταδόσεων [7].



Εικόνα 1.21: Κάλυψη mmWave σε εξωτερικό χώρο παρόμοιο με γήπεδο ή στάδιο [7]

- Κατευθυντικότητα :** Οι συνδέσεις mmWave είναι εγγενώς κατευθυντικές. Με ένα μικρό μήκος κύματος, οι διατάξεις κεραιών μπορούν να θεωρηθούν ως μεταλλικά στοιχεία πάνω στην πλακέτα κυκλωμάτων και επιτρέπουν αναλογικά μεγαλύτερο κέρδος της κεραίας, για το ίδιο φυσικό μέγεθος κεραίας. Συνεπώς, οι υψηλότερες συχνότητες των mmWave σημάτων δεν έχουν οι ίδιες ως αποτέλεσμα κάποια αύξηση στις απώλειες μετάδοσης ελεύθερου διαστήματος, υπό την προϋπόθεση ότι η περιοχή της κεραίας παραμένει σταθερή και ότι χρησιμοποιούνται κατάλληλες κατευθυντικές μεταδόσεις [33]. Έτσι, ελέγχοντας τη φάση του μεταδιδόμενου σήματος από κάθε κεραία, η διάταξη της κεραίας κατευθύνει την ακτίνα της προς οποιαδήποτε κατεύθυνση ώστε να επιτύχει υψηλό κέρδος στην κατεύθυνση αυτή, προσφέροντας παράλληλα πολύ χαμηλό κέρδος σε όλες τις άλλες κατευθύνσεις. Για να μπορέσουν ο πομπός και ο δέκτης να κατευθύνουν τις ακτίνες τους ο ένας προς τον άλλο, απαιτείται η διαδικασία της κατευθυντικότητας της δέσμης, και έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι υλοποίησης της εν λόγω διαδικασίας, με σκοπό τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου [34].
- Σκίαση :** Ένας πολύ σημαντικός προβληματισμός που εγείρεται σχετικά με την τεχνολογία αυτή ως προς την εμβέλεια είναι ότι τα σήματα mmWave είναι εξαιρετικά ευπαθή στη σκίαση. Για παράδειγμα, υλικά όπως το τούβλο μπορούν να προκαλέσουν εξασθένιση στα σήματα μέχρι και 40 έως 80 dB [33].
- Ταχείες διακυμάνσεις του καναλιού και διαλείπουσα συνδεσιμότητα :** Για μία δεδομένη ταχύτητα κίνησης, το χρονικό διάστημα για το οποίο το κανάλι διατηρεί τη σταθερότητά του είναι γραμμικό στη φέρουσα συχνότητα, κάτι που σημαίνει ότι θα είναι πολύ μικρό στο φάσμα mmWave. Επιπροσθέτως, τα υψηλά επίπεδα σκίασης υπονοούν ότι η παρουσία εμποδίων θα οδηγήσει σε πολύ πιο δραματικές μεταβολές στις απώλειες διαδρομής. Επίσης, τα συστήματα mmWave πρόκειται να είναι εγγενώς δομημένα από μικρές κυψέλες, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τις σχετικές απώλειες διαδρομής και τη συσχέτιση των κυψελών επίσης να αλλάζουν ταχύτητα. Από την άποψη του συστήματος, αυτό σημαίνει ότι η συνδεσιμότητα θα είναι

ιδιαίτερα διαλείπουσα και η επικοινωνία θα πρέπει να είναι γρήγορα προσαρμόσιμη [33].

- **Ευπάθεια στο Blockage** : Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν περιορισμένη δυνατότητα να περιθλώνται γύρω από εμπόδια με μέγεθος σημαντικά μεγαλύτερο από το μήκος κύματος. Με ένα μικρό μήκος κύματος, οι συνδέσεις στη ζώνη των 60 GHz είναι ευπαθείς στο blockage από εμπόδια. Λαμβάνοντας υπόψη την ανθρώπινη κινητικότητα, οι συνδέσεις mmWave είναι διακοπτόμενες. Επομένως, η διατήρηση μίας αξιόπιστης σύνδεσης για εφαρμογές ευαίσθητες στις καθυστερήσεις είναι μία μεγάλη πρόκληση για τις επικοινωνίες mmWave [34].

Ανακεφαλαιώνοντας, σημειώνουμε ότι η τεχνολογία mmWave θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ευρέως στα συστήματα πέμπτης γενιάς 5G, καθώς υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης φάσματος συχνοτήτων το οποίο έως τώρα παρέμενε ανεκμετάλλευτο. Ειδικότερα δε, θα αποτελούσε μία πολύ αποτελεσματική προσέγγιση για συγκεκριμένες κατηγορίες αρχιτεκτονικών που ενδεχομένως θα χρησιμοποιηθούν στα συστήματα 5G, όπως αυτές που θα βασίζονται στην κεντρική διαχείριση των πόρων του δικτύου. Ο λόγος είναι ότι λόγω του φάσματος που χρησιμοποιούν οι επικοινωνίες mmWave, αυξάνουν τη χωρητικότητα του δικτύου και αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τα μειονεκτήματα και τις ενδεχόμενες προκλήσεις που θέτουν οι εν λόγω αρχιτεκτονικές (URMs).

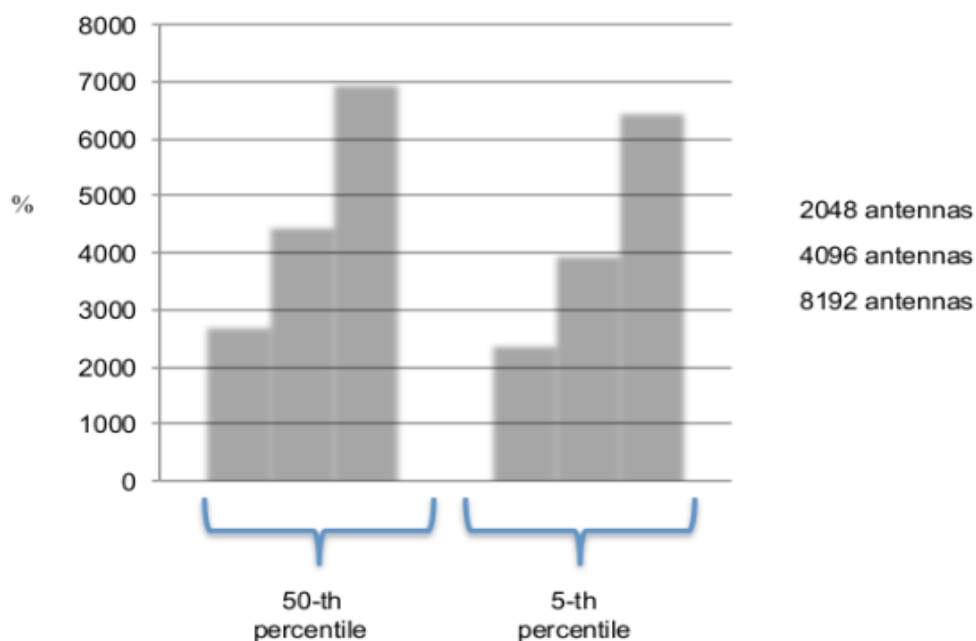
1.4.2 Massive MIMO

1.4.2.1 Ορισμός

Η τεχνολογία Massive MIMO αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα ερευνητική περιοχή, η οποία θα μπορούσε να βρει εφαρμογή στις ασύρματες επικοινωνίες πέμπτης γενιάς. Η τεχνολογία Massive MIMO αναφέρεται στην ιδέα εξοπλισμού των κυψελωτών σταθμών βάσης με ένα πολύ μεγάλο αριθμό κεραιών, ο οποίος θα επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών, ενώ θα επιτρέπει δυναμικά τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης του συστήματος. Επιπρόσθετα, ένας μεγάλος αριθμός κεραιών στους σταθμούς βάσης μπορούν να μειώσουν δραστικά την ισχύ μετάδοσης, κάτι που οδηγεί τελικά σε σημαντικά υψηλή ενεργειακή απόδοση [37]. Συνολικά, το Massive MIMO υπόσχεται σημαντικά κέρδη για τα 5G δίκτυα, προσφέροντας στο δίκτυο την ικανότητα να εξυπηρετεί περισσότερους χρήστες, με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, μεγαλύτερη αξιοπιστία και καταναλώνοντας παράλληλα λιγότερη ενέργεια [38]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εν λόγω τεχνολογία θα μπορούσε να αποτελέσει λύση για τις προκλήσεις που θέτουν οι αρχιτεκτονικές τύπου UDNs.

Το MIMO, ήταν ήδη εδραιωμένο από την περίοδο που τα συστήματα LTE άρχισαν να αναπτύσσονται, αποτελώντας εγγενές συστατικό αυτών, με δύο έως τέσσερις κεραιές ανά κινητή μονάδα, που έφταναν τις οκτώ ανά τομέα του σταθμού βάσης. Πλέον ο αριθμός των κεραιών ανά σταθμό βάσης ανέρχεται σε εκατοντάδες [7]. Στα συστήματα MIMO ενός χρήστη (single-user MIMO - SU-MIMO), οι διαστάσεις της επικοινωνίας περιορίζονται από τον αριθμό των κεραιών που μπορούν να φιλοξενηθούν σε μία φορητή συσκευή. Όμως, εάν κάθε σταθμός βάσης επικοινωνεί με αρκετούς χρήστες ταυτόχρονα, η έκδοση MIMO για πολλούς χρήστες (multiuser MIMO - MU-MIMO) μπορεί αποτελεσματικά να συγκεντρώσει τις κεραιές στους χρήστες αυτούς και να ξεπεράσει αυτό το εμπόδιο. Έτσι, οι διαστάσεις σηματοδοσίας καθορίζονται από το μικρότερο αριθμό μεταξύ του συνολικού αριθμού των κεραιών σε αυτούς τους χρήστες και από τον αριθμό των κεραιών στο σταθμό βάσης.

Το Massive MIMO είναι μία μορφή συστήματος MIMO πολλών χρηστών, όπου ο αριθμός των κεραιών στο σταθμό βάσης είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των συσκευών ανά πόρο σηματοδότησης [7], [39]. Η τεχνολογία αυτή απομακρύνεται από τη συμβατική τοπολογία, αφού αποτελείται από πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη για την επικοινωνία με πολλούς UE ταυτόχρονα. Η εν λόγω τεχνολογία, που αποτελεί όραμα για τις κυψελωτές επικοινωνίες, αποτελείται από το σταθμό βάσης και τον εξοπλισμό χρήστη (user equipment – UE) ή τους κινητούς χρήστες. Παρόλο που πολλές ρυθμίσεις είναι δυνατές με αυτή την αρχιτεκτονική, το Massive MIMO Application Framework υποστηρίζει έως και 20 MHz εύρους ζώνης το οποίο κλιμακώνεται από 64 σε 128 κεραιές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλαπλά ανεξάρτητα UE [38].



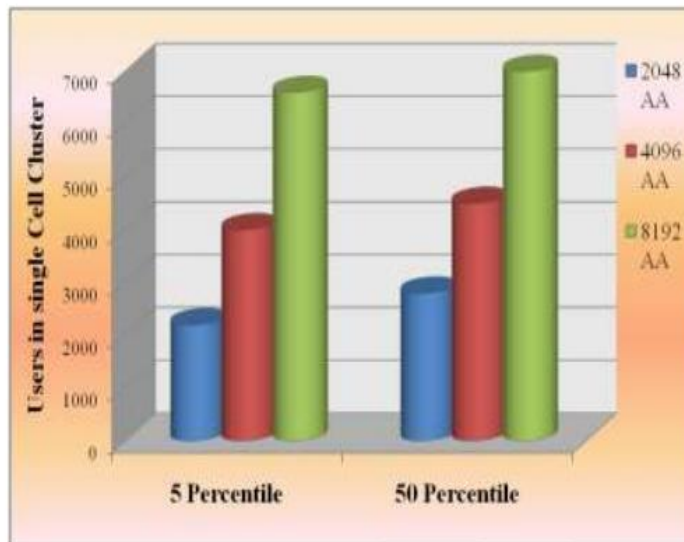
Εικόνα 1.22: Σύγκριση ρυθμού δεδομένων κυψελών για μία εφαρμογή Massive MIMO [40]

1.4.2.2 Πλεονεκτήματα Massive MIMO

Το Massive MIMO υπόσχεται σημαντικά κέρδη στους ρυθμούς δεδομένων ασύρματης κίνησης και στην αξιοπιστία συνδέσεων χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό κεραιών (περισσότερες από 64) στο σταθμο βάσης. Προσθέτοντας πολλαπλές κεραιές, μπορεί να προσφερθεί ένας μεγαλύτερος βαθμός ελευθερίας στα ασύρματα κανάλια, ώστε να φιλοξενούν περισσότερα δεδομένα και πληροφορίες. Εκτός του ότι κληρονομεί τα οφέλη των συμβατικών συστημάτων MIMO, ένα σύστημα Massive MIMO μπορεί επίσης να βελτιώσει σημαντικά τόσο τη φασματική όσο και την ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, στα συστήματα Massive MIMO, οι συνέπειες του θορύβου και της γρήγορης εξασθένισης εξαφανίζονται, και οι παρεμβολές εντός της κυψέλης μπορούν να μετριαστούν χρησιμοποιώντας απλές γραμμικές μεθόδους κωδικοποίησης και ανίχνευσης. Με εκατοντάδες στοιχεία κεραιών, το Massive MIMO μειώνει την εκπνεόμενη ισχύ κατευθύνοντας την ενέργεια σε στοχευμένους κινητούς χρήστες. Κατευθύνοντας την ενέργεια σε συγκεκριμένους χρήστες, η εκπνεόμενη ισχύς μειώνεται και την ίδια στιγμή οι παρεμβολές στους άλλους χρήστες επίσης μειώνονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για τα σημερινά κυψελωτά δίκτυα. Εάν η προοπτική του massive MIMO πραγματοποιηθεί, τα μελλοντικά δίκτυα 5G θα γίνουν γρηγορότερα και θα εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες με μεγαλύτερη αξιοπιστία και αυξημένη

ενεργειακή αποδοτικότητα. Άλλα πλεονεκτήματα του Massive MIMO συμπεριλαμβάνουν την εκτενή χρήση οικονομικών συστατικών χαμηλής ισχύος, μειωμένη καθυστέρηση, απλοποίηση του επιπέδου ζεύξης και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές [39], [41]. Συνεπώς, αυτά τα κύρια πλεονεκτήματα επιτρέπουν στα συστήματα massive MIMO να αποτελούν έναν πολλά υποσχόμενο υποψήφιο για τα 5G ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών [2] και ταυτόχρονα λύση για τις όποιες δυσκολίες παρουσιάζονται από τις αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην πυκνοποίηση του δικτύου (UDNs). Παρακάτω κατηγοριοποιούνται αναλυτικότερα τα ανωτέρω ελκυστικά πλεονεκτήματα της εν λόγω τεχνολογίας :

- Τεράστιες βελτιώσεις στη φασματική απόδοση, χωρίς την αναγκαιότητα για αυξημένη πύκνωση των σταθμών βάσης ή την πιθανότητα να «θυσιαστούν» κάποιες από τις βελτιώσεις αυτές για αύξηση της απόδοσης ισχύος,
- Εξομαλυσμένες αποκρίσεις καναλιών λόγω της μεγάλης χωρικής ποικιλομορφίας, η οποία επιφέρει την ευνοϊκή επίδραση του «νόμου των μεγάλων αριθμών». Στην ουσία, όλη η τυχαιότητα μικρής κλίμακας υποχωρεί καθώς ο αριθμός των παρατηρήσεων του καναλιού αυξάνεται,
- Απλές δομές μετάδοσης και λήψης, λόγω της σχεδόν ορθογώνιας φύσης των καναλιών ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και λόγω του συνόλου των ενεργών χρηστών που διαμοιράζονται τον ίδιο πόρο σηματοδότησης. Για ένα δεδομένο αριθμό ενεργών χρηστών, η εν λόγω ορθογωνικότητα οξύνει καθώς ο αριθμός των κεραιών στους σταθμούς βάσης αυξάνεται και οι απλοί γραμμικοί πομποδέκτες λειτουργούν με σχεδόν βέλτιστο τρόπο,
- Αυξημένος ρυθμός δεδομένων, αφού με την αύξηση του αριθμού των κεραιών αυξάνεται και ο βαθμός ανεξαρτησίας του τρόπου με τον οποίο αποστέλλονται οι ροές δεδομένων, καθώς και ο αριθμός των τερματικών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα,
- Βελτιωμένη αξιοπιστία, αφού όσο με την αύξηση του αριθμού των κεραιών αυξάνεται και ο βαθμός διακριτότητας των διαδρομών στις οποίες το ραδιοσήμα μπορεί να διαδοθεί,
- Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, αφού ο σταθμός βάσης μπορεί να επικεντρώσει την εκπεμπόμενη ενέργειά του στις χωρικές κατευθύνσεις όπου γνωρίζει ότι βρίσκονται τα τερματικά,
- Μειωμένες παρεμβολές αφού ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να αποφύγει σκόπιμα τη μετάδοση σε κατευθύνσεις όπου η εξάπλωση των παρεμβολών θα ήταν επιβλαβής,
- Αύξηση της χωρητικότητας κατά δέκα φορές ή και περισσότερες ταυτόχρονα, κάτι που βελτιώνει την απόδοση της εκπεμπόμενης ενέργειας κατά εκατό περίπου φορές,
- Δυνατότητα χρήσης οικονομικών συστατικών χαμηλής κατανάλωσης ισχύος,
- Σημαντική μείωση της καθυστέρησης στη ραδιοεπαφή,
- Αύξηση της αντοχής τόσο στις ακούσιες παρεμβολές καθώς και στις σκόπιμες.



Εικόνα 1.23: Οι υπηρεσίες Massive MIMO που προσφέρονται στους χρήστες χρησιμοποιώντας 2048, 4096 και 8192 διατάξεις κεραιών (Antenna Arrays – AA) [40]

Η υπόσχεση της τεχνολογίας Massive MIMO για τα παραπάνω οφέλη την έχει υψώσει σε μία κεντρική θέση στις προκαταρκτικές συζητήσεις για τα δίκτυα 5G. Όλα τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα ισχυροποιούν τη δυναμική της τεχνολογία Massive MIMO για έναν ακόμη σημαντικό λόγο, ο οποίος είναι ότι δύναται να συμβάλει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν οι αρχιτεκτονικές οι οποίες βασίζονται στην πυκνοποίηση του δικτύου και αποτελούν μία πιθανή προσέγγιση για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των συστημάτων 5G (όπως η ανάγκη για μείωση των παρεμβολών και για διαχείριση της κινητικότητας).

1.4.2.3 Προκλήσεις Massive MIMO

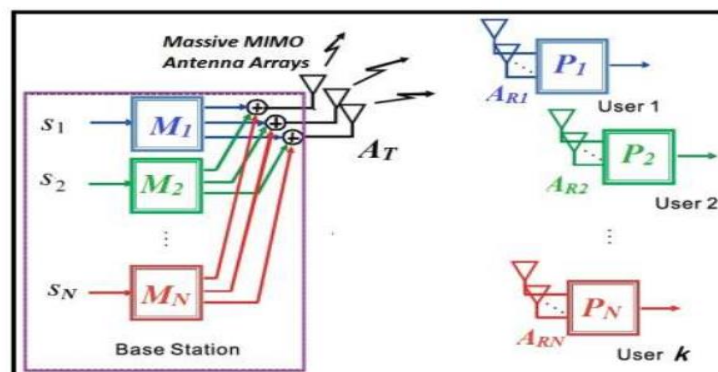
Παρ' όλο που το Massive MIMO καθιστά πολλά από τα παραδοσιακά ερευνητικά προβλήματα άνευ σημασίας, παράλληλα παράλληλα αναδεικνύει εντελώς νέα ζητήματα τα οποία επειγόντως χρήζουν προσοχής. Με τόσο πολλά στοιχεία κεραιών, το Massive MIMO καλείται να αντιμετωπίσει πολλές προκλήσεις που δεν παρουσιάζονται στα σημερινά δίκτυα. Παραδείγματα που τεκμηριώνουν το παραπάνω είναι η πρόκληση της δημιουργίας πολλών συστατικών χαμηλού κόστους και ακρίβειας που συνεργάζονται αποτελεσματικά, η απόκτηση και ο συγχρονισμός των πρόσφατα ενταχθέντων τερματικών, η μείωση της εσωτερικής κατανάλωσης ισχύος ώστε να επιτευχθούν συνολικές μειώσεις κατανάλωσης ενέργειας και η εύρεση νέων σεναρίων ανάπτυξης [39]. Επιπρόσθετες προκλήσεις για την υλοποίηση του Massive MIMO περιλαμβάνουν κλιμάκωση των διαύλων δεδομένων και διεπαφών και κατανομημένο συγχρονισμό μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων πομποδεκτών. Συνεπώς, προκειμένου το Massive MIMO να γίνει πραγματικότητα, υπάρχουν αρκετές σημαντικές προκλήσεις που πρέπει πρώτα να ξεπεραστούν [7], [38]. Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά θέματα που καλείται να αντιμετωπίσει η εν λόγω τεχνολογία.

- **Πιλοτική μόλυνση (Pilot Contamination)** : Ιδανικά, σε κάθε τερματικό ενός συστήματος Massive MIMO εκχωρείται μία πιλοτική ακολουθία. Όμως, ο μέγιστος αριθμός των πιλοτικών ακολουθιών που μπορούν να εκχωρηθούν έχει ένα άνω φράγμα, κάτι που σημαίνει ότι είναι εύκολο να εξαντληθεί το διαθέσιμο απόθεμα των ορθογωνικών πιλοτικών ακολουθιών σε ένα σύστημα πολλών

κυψελών. Η επίδραση της επαναχρησιμοποίησής τους από τη μία κυψέλη στην άλλη, και οι σχετικές αρνητικές συνέπειες (όπως για παράδειγμα οι αναπόφευκτες παρεμβολές μεταξύ pilots σε διαφορετικές κυψέλες), αναφέρονται με τον όρο «pilot contamination» [7], [39].

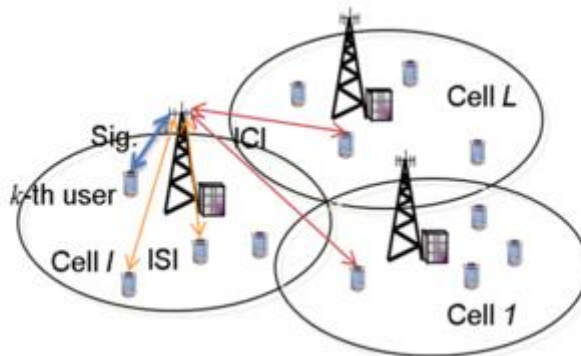
- **Ραδιομετάδοση και ορθογωνικότητα των αποκρίσεων καναλιού :** Το Massive MIMO βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε μία ιδιότητα του ραδιοπεριβάλλοντος που ονομάζεται «favorable propagation» . Με απλά λόγια, ο όρος «favorable propagation» σημαίνει ότι οι αποκρίσεις του καναλιού μετάδοσης από το σταθμό βάσης σε διαφορετικά τερματικά είναι διαφορετικές. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων Massive MIMO, οι μετρήσεις καναλιού πρέπει να πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας ρεαλιστικές διατάξεις κεραιών [39].
- **Αρχιτεκτονικές προκλήσεις :** Μία πιο σοβαρή πρόκληση για την υλοποίηση του Massive MIMO σχετίζεται με την αρχιτεκτονική του. Η επεκτασιμότητα, οι συσχετίσεις κεραιών, οι αμοιβαίοι σύνδεσμοι και το κόστος, είναι ορισμένα από τα ζητήματα τα οποία πρέπει να διευθετηθούν.
- **Μοντέλα καναλιού :** Παράλληλα με τα αρχιτεκτονικά ζητήματα, υπάρχουν και εκείνα που σχετίζονται με τα μοντέλα καναλιού, τα οποία απαιτούν εκτενείς μετρήσεις ώστε να προσεγγιστούν κατάλληλα. Οι συσχετίσεις κεραιών και οι αντιστοιχίες των μαζικών διατάξεων με σχετικές τοπολογίες πρέπει να καθοριστούν, ώστε να προσδιοριστεί και μία κατάλληλη μοντελοποίηση των επιπτώσεών τους.
- **Συνύπαρξη με μικρές κυψέλες :** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι σταθμοί βάσης συστημάτων Massive MIMO πιθανότατα θα έπρεπε να συνυπάρξουν με επίπεδα μικρών κυψελών. Παρόλο που η απλούστερη εναλλακτική λύση είναι να διαχωριστούν οι αντίστοιχες μεταδόσεις ως προς τη συχνότητα, ο μεγάλος αριθμός του πλεονάσματος κεραιών στους σταθμούς βάσης Massive MIMO ενδεχομένως να προσφέρει την ευκαιρία για χωρική εκκένωση και την αποφυγή παρεμβολών με σχετική απλότητα. Για να επιβεβαιωθεί η εφικτότητα αυτής της ιδέας, απαιτούνται και πάλι ολοκληρωμένα μοντέλα καναλιού. Καθώς τα δίκτυα πυκνώνουν και περισσότερη κίνηση εκφορτώνεται σε μικρές κυψέλες, ο αριθμός των ενεργών χρηστών ανά κυψέλη θα ελαττωθεί και η αναγκαιότητα για Massive MIMO ίσως να μειωθεί. Ζητήματα όπως το κόστος και το δίκτυο κορμού θα καθορίσουν εντέλει την ισορροπία μεταξύ αυτών των συμπληρωματικών ιδεών [7].

Παρακάτω απεικονίζεται ένα σύστημα Massive MIMO για ένα μοναδικό σταθμό βάσης και N χρήστες, που χρησιμοποιεί A_T κεραιές για μετάδοση και ο χρήστης k διαθέτει A_R κεραιές για λήψη.



Εικόνα 1.24: Μοντελοποίηση συστήματος Massive MIMO με k χρήστες και N σταθμούς βάσης [42]

Συνοψίζοντας, επισημάναμε την εκτενή προοπτική των συστημάτων massive MIMO ως μία βασική τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοστεί για τα μελλοντικά κυψελωτά συστήματα πέρα από τα 4G. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα από την άποψη της ενεργειακής και φασματικής απόδοσης, αντοχής και αξιοπιστίας. Επιτρέπει τη χρήση οικονομικού υλισμικού τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στην πλευρά της κινητής συσκευής. Στο σταθμό βάσης, η χρήση δαπανηρού και ισχυρού υλισμικού, που όμως δεν είναι αποδοτικό σε ισχύ, αντικαθίσταται από μαζική χρήση παράλληλων τμημάτων χαμηλού κόστους και ισχύος, τα οποία λειτουργούν μαζί με συνεκτικό τρόπο. Φυσικά, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ώστε να αξιοποιηθεί το πλήρες δυναμικό της τεχνολογίας, για παράδειγμα θέματα που σχετίζονται με την υπολογιστική πολυπλοκότητα, την υλοποίηση των αλγορίθμων κατανομής επεξεργασίας και το συγχρονισμό των τμημάτων της κεραίας [39]. Καταλήγουμε ότι η υιοθέτηση του massive-MIMO για τα συστήματα 5G θα μπορούσε να αποτελέσει ένα μεγάλο άλμα σε σχέση με τη σημερινή προηγμένη τεχνολογία στο σχεδιασμό συστημάτων και συστατικών [40]. Η μορφή των συστημάτων που αναμένεται να προκύψει από την εν λόγω τεχνολογία απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 1.25: Η μορφή των συστημάτων 5G όπως αναμένεται να διαμορφωθεί με τη χρήση της τεχνολογίας massive MIMO [37]

1.4.3 Network Function Virtualization – NFV

Σήμερα, η ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών βασίζεται κατά κύριο λόγο στη διασύνδεση πολυάριθμων συσκευών ειδικού σκοπού, καθεμία από τις οποίες επιτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων αλλά και η ανάπτυξη νέων και καινοτόμων υπηρεσιών ανεβάζουν κατά πολύ τον πήχη απαιτήσεων των δικτύων σε υλικό εξοπλισμό. Χρόνο με το χρόνο κρίνεται απαραίτητη τόσο η αριθμητική αύξηση του εξοπλισμού, όσο και η εισαγωγή νέων τύπων συσκευών προκειμένου να υποστηριχθούν νέες λειτουργίες, γεγονός το οποίο θέτει μεγάλες προκλήσεις για τους κατασκευαστές και παρόχους δικτύων στο μέλλον.

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω, τα δίκτυα επικοινωνιών αναμένεται να γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, δυσχεραίνοντας τόσο τις διαδικασίες σχεδιασμού και ανάπτυξης τους, όσο και της διαχείρισης και συντήρησης αυτών. Επιπρόσθετα, οι αναδυόμενες απαιτήσεις σε υλικό εξοπλισμό είναι φυσικό να οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση των ειδών υψηλών απαιτούμενων κεφαλαιακών εξόδων (CAPEX), καθώς οι πάροχοι θα πρέπει να προβούν σε υπέρογκες επενδύσεις προκειμένου να αναπτύξουν ή να επεκτείνουν τα δίκτυα τους. Εκτός αυτού, μία σημαντική αύξηση στο πλήθος των συσκευών συνεπάγεται και αύξηση των επιπέδων κατανάλωσης ενέργειας στο σύνολο

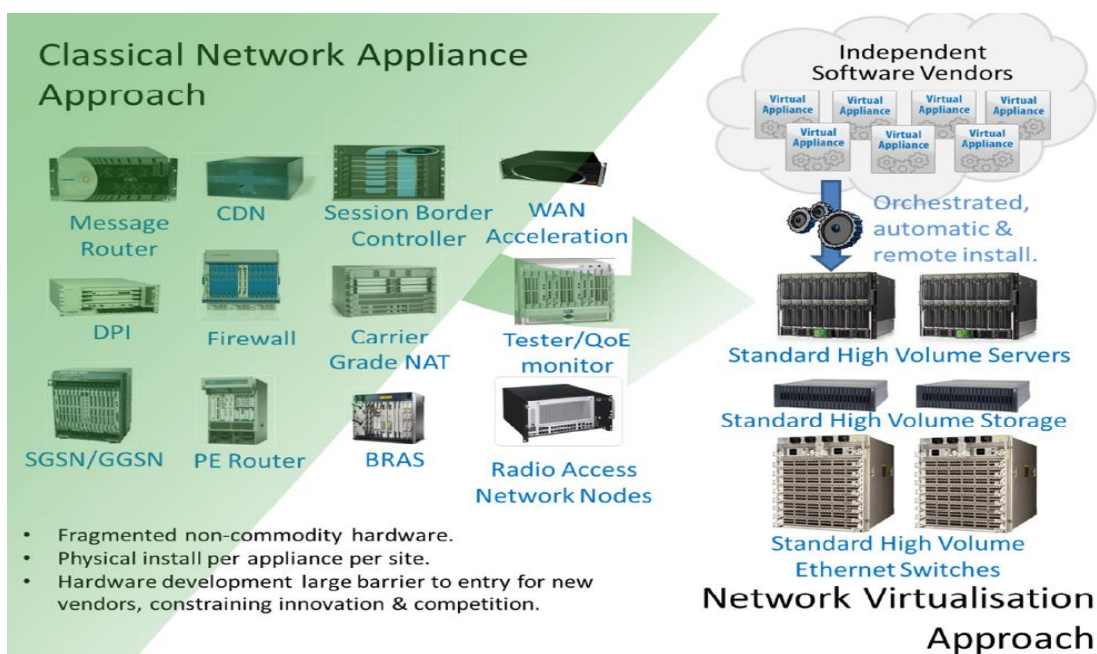
του δικτύου, γεγονός το οποίο οδηγεί με τη σειρά του σε αύξηση των λειτουργικών εξόδων (OPEX) για τους παρόχους, αλλά και σε περιβαλλοντική επιβάρυνση. Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα που χρήζει εξέτασης είναι αυτό της εύρεσης του απαραίτητου χώρου, όπου όλες αυτές οι συσκευές θα εγκατασταθούν [52], [54].

Ωστόσο, πέραν της εισαγωγής επιπρόσθετου εξοπλισμού, ένα ιδιαίτερα οικονομικά επίτιμο ζήτημα αποτελεί αυτό της αντικατάστασης του παλιού εξοπλισμού με νεότερο μέσα στα πλαίσια συντήρησης ενός δικτύου. Οι δικτυακές συσκευές ολοκληρώνουν τον κύκλο ζωής τους σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός το οποίο περιορίζει σημαντικά το περιθώριο κέρδους για τους παρόχους. Παράλληλα, η ανάπτυξη τεχνολογικών καινοτομιών και νέων υπηρεσιών οδηγούν με τη σειρά τους σε ακόμη μικρότερη διάρκεια ζωής των συσκευών.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ανωτέρω προβλήματα μία νέα τεχνολογική λύση προτάθηκε από ομάδα παρόχων δικτυακών υπηρεσιών στο Παγκόσμιο Συνέδριο για τα SDNs και το OpenFlow και αναπτύχθηκε από το ETSI, ακούγοντας στον όρο Network Function Virtualization (NFV) [54].

1.4.3.1 Ορισμός

Το NFV αποτελεί ένα σενάριο αρχιτεκτονικής δικτύου, το οποίο αξιοποιεί την υπάρχουσα τεχνολογία εικονικοποίησης με στόχο να αποδεσμεύσει κάθε δικτυακή λειτουργία από τον αντίστοιχο υλικό εξοπλισμό που μέχρι σήμερα ήταν αφιερωμένος στην επίτευξή της. Πιο συγκεκριμένα, το NFV αλλάζει ριζικά τον τρόπο που οι πάροχοι σχεδιάζουν τα δίκτυα τους αντικαθιστώντας δικτυακές συσκευές ειδικού σκοπού όπως δρομολογητές, μεταγωγείς, τείχη προστασίας (firewalls) και εξισορροπητές φόρτου (load balancers) με αντίστοιχες εικονικές μηχανές (virtual machines) που επιτελούν τις ίδιες λειτουργίες. Οι εν λόγω εικονικές μηχανές μπορεί να φιλοξενούνται σε εξυπηρετητές (servers), μεταγωγείς και αποθηκευτικές μονάδες υψηλής κλίμακας, οι οποίες βρίσκονται σε Κέντρα Δεδομένων (Data Centers), δικτυακούς κόμβους, καθώς επίσης και στον εξοπλισμό των τελικών χρηστών [52].

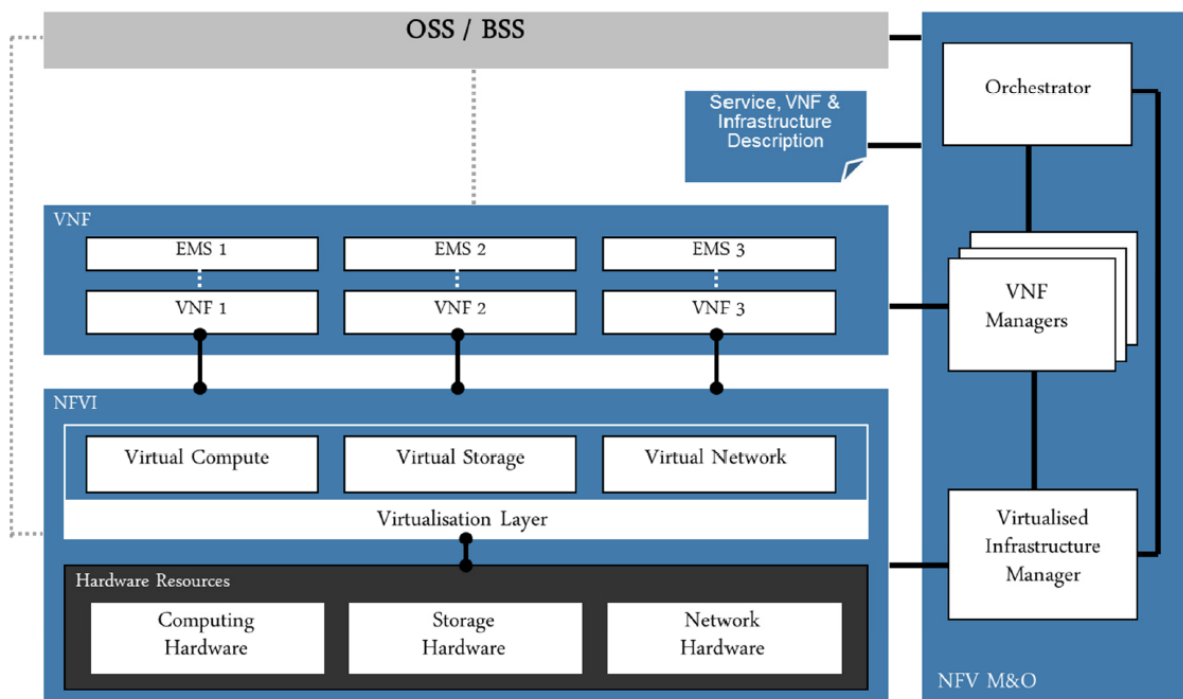


Εικόνα 1.26: Δικτυακές συσκευές σε σενάριο κλασσικού και NFV δικτύου [52]

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η NFV τεχνολογία δύναται να αξιοποιηθεί τόσο σε υποδομές δικτύων κινητών όσο και σταθερών επικοινωνιών, σε κάθε διαδικασία του πεδίου ελέγχου (control plane) όσο και του πεδίου δεδομένων (data plane). Η υιοθέτηση μιας τέτοιας τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του απαιτούμενου υλικού εξοπλισμού για την εγκαθίδρυση και αναδιαμόρφωση δικτύων, καθώς οι εκάστοτε υπηρεσίες θα παρέχονται ουσιαστικά από λογισμικό που θα εκτελείται πάνω σε υλικό εξοπλισμό υψηλών δυνατοτήτων από άποψη πόρων και ισχύος.

1.4.3.2 Αρχιτεκτονική NFV

Η αρχιτεκτονική της NFV τεχνολογίας βασίζεται κατά κύριο λόγο σε ένα σύνολο πόρων λογισμικού (software) απαραίτητων για την υποστήριξη τεχνικών εικονικοποίησης. Από την πλευρά του υλικού εξοπλισμού (hardware), πρωταγωνιστικό ρόλο λαμβάνουν οι αποκαλούμενες Commercial-Off-The-Shelf (COTS) συσκευές, οι οποίες αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται το λογισμικό για την διαμόρφωση ενός περιβάλλοντος εικονικοποίησης, το οποίο με τη σειρά του περιλαμβάνει τεχνικές, όπως containers (συνήθως εικονικές μηχανές που συνίστανται από ένα σύνολο άλλων εικονικών μηχανών), εικονικές Μονάδες Κεντρικής Επεξεργασίας (vCPUs), εικονικές μονάδες αποθήκευσης (vStorage) και εικονικούς μεταγωγείς (vSwitches). Επιπλέον, η αρχιτεκτονική NFV περιλαμβάνει όλο το απαραίτητο πλαίσιο και τις λειτουργίες προκειμένου όλα τα ανωτέρω στοιχεία να συνεργαστούν και να συγχρονιστούν μεταξύ τους, αλλά και με το εκτός NFV δικτυακό περιβάλλον.



Εικόνα 1.27: Αρχιτεκτονική NFV δικτύων [52]

Το πλαίσιο αρχιτεκτονικής NFV αποτελείται από τις εξής βασικές συνιστώσες [51], [52], [54], [55] :

- **NFVI (Network Functions Virtualization Infrastructure):** Το NFVI αποτελεί ένα σύνολο υλικού εξοπλισμού και λογισμικού, με σκοπό να παρέχει όλο το απαραίτητο περιβάλλον για την υποστήριξη των Εικονικών Δικτυακών

Λειτουργιών (Virtualized Network Functions - VNF). Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω υποδομή περιλαμβάνει υλικό εξοπλισμό μαζικής χρήσης (COTS) όπως servers, μεταγωγείς και αποθηκευτικές μονάδες, συνιστώσες επιτάχυνσης καθώς και ένα επίπεδο λογισμικού (software layer), το οποίο είναι υπεύθυνο για τις διεργασίες εικονικοποίησης των υλικών πόρων (hardware resources).

- **VNF (Virtualized Network Function):** Το VNF αποτελεί την υλοποίηση μιας δικτυακής λειτουργίας μέσω λογισμικού, η οποία εκτελείται πάνω από το NFVI. Ουσιαστικά, αποτελεί την μονάδα που λαμβάνει το ρόλο ενός σημερινού δικτυακού κόμβου, με τη μόνη διαφορά ότι αποτελείται κατεξοχήν από λογισμικό και όχι υλικό (hardware).
- **NFV M&O (Network Functions Virtualization Management and Orchestration):** Το NFV M&O αποτελεί την τρίτη βασική συνιστώσα που έρχεται να ολοκληρώσει την αρχιτεκτονική NFV. Είναι υπεύθυνο για τον συντονισμό και τη διαχείριση τόσο των φυσικών όσο και των εικονικών πόρων που συνθέτουν το πλαίσιο του NFV. Εστιάζει στον συντονισμό και τη διαχείριση των VNFs έχοντας ως κύριο γνώμονα τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες για την εικονικοποίηση του υλικού εξοπλισμού. Παράλληλα, αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του δικτύου NFV και του εκτός αυτού δικτυακού περιβάλλοντος του παρόχου, καθώς μέσα από την αλληλεπίδρασή του με το εκάστοτε Operations Support System (OSS) και το Business Support System (BSS), επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση του NFV στο υπόλοιπο δίκτυο και η εισαγωγή του κάτω από την ομπρέλα της συνολικής δικτυακής διαχείρισης [53]. Το NFV M&O αποτελείται από τρία επιμέρους είδη λειτουργικών μονάδων (functional blocks): τον Orchestrator, τους Virtualized Network Function Managers (VNFM), και τους Virtual Infrastructure Managers (VIMs). Όσον αφορά τον Orchestrator, είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό των NFVI πόρων διαμέσου των εκάστοτε VIMs, αλλά και για τη διαχείριση των Δικτυακών Υπηρεσιών. Ένας VNFM από την άλλη, είναι υπεύθυνος για την διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs. Τέλος, κάθε VIM είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο και τη διαχείριση των πόρων του NFVI (υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς, δικτυακούς) συνήθως εντός του δικτύου του ίδιου παρόχου.

Όσον αφορά ένα NFV σύστημα ως ολότητα, βασίζεται σε ένα σύνολο μεταδεδομένων, τα οποία περιγράφουν τις υπηρεσίες, τα VNFs και τις απαιτήσεις του δικτύου σε υποδομές προκειμένου το σύστημα NFV M&O να μπορεί να λειτουργήσει κατάλληλα. Αυτά τα δεδομένα, καθώς και όλα τα λειτουργικά δομικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα NFV δίκτυο είναι δυνατόν να παρέχονται από διαφορετικές συνιστώσες του κλάδου, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εν λόγω τεχνολογική λύση, τη διαλειτουργικότητα. Επιπρόσθετα, η επικοινωνία και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δομικών στοιχείων ενός NFV δικτύου επιτυγχάνεται μέσω ορισμένων σημείων αναφοράς (point of reference), τα οποία διακρίνονται σε δύο τύπους. Τα σημεία αναφοράς μεταξύ VNF και NFVI καθώς και αυτά μεταξύ των μονάδων του NFVI εμπλέκονται στις λειτουργίες εικονικοποίησης των πόρων και «φιλοξενίας» των VNFs, δίνοντας τη δυνατότητα στα VNFs να μπορούν να μεταφέρονται από ένα NFVI σε ένα άλλο, αλλά και μεταξύ διαφορετικών hardware. Από την άλλη τα σημεία αναφοράς μεταξύ των NFV M&O-VNF, NFV M&O-NFVI καθώς επίσης και μεταξύ των μονάδων ενός NFV M&O εμπλέκονται σε διαδικασίες διαχείρισης και ελέγχου ολόκληρου του συστήματος NFV [52], [53], [54], [55].

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η υποδομή της NFV αρχιτεκτονικής μπορεί να εκτείνεται σε διάφορες τοποθεσίες. Το δίκτυο το οποίο παρέχει συνδεσιμότητα μεταξύ των θέσεων αυτών θεωρείται κι αυτό ως μέρος της υποδομής του NFV.

1.4.3.3 Σενάρια Χρήσης

Το NFV παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα τομέων εφαρμογής, το οποίο εκτείνεται από το control έως το data plane, αλλά και από τα δίκτυα κινητών έως τα δίκτυα σταθερών επικοινωνιών. Κάποια από τα κυριότερα σενάρια χρήσης της τεχνολογίας που έχουν αναφερθεί έως σήμερα, αναλύονται στην παρούσα ενότητα.

- Εικονικοποίηση κόμβων του Δικτύου Κορμού κινητών επικοινωνιών :** Η χρήση της τεχνολογίας NFV για την εικονικοποίηση των κόμβων σε ένα δίκτυο κορμού κινητών επικοινωνιών αποτελεί ίσως το επικρατέστερο από τα σενάρια. Στόχος μίας τέτοιας υιοθέτησης αποτελεί ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση ενός περιβάλλοντος αποτελεσματικότερου ως προς το κόστος, το οποίο θα επιτρέπει στους παρόχους δικτύων να αντιμετωπίσουν επιτυχώς την ολοένα αυξανόμενη δικτυακή κίνηση χωρίς την εγκατάσταση επιπρόσθετου εξοπλισμού. Μέσω μία κεντρικής δεξαμενής καθίσταται δυνατή η κατά απαίτηση δέσμευση πόρων και η εγκαθίδρυση εικονικών μηχανών για την εξυπηρέτηση λειτουργιών του δικτύου. Μία τέτοια λύση μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερη χρήση των δικτυακών πόρων, σε πιο ευέλικτη διαχείρισή τους (μη απαίτηση για μεταβολές στο hardware σε αναμενόμενη αναβάθμιση κόμβων), στη γρηγορότερη ρύθμιση των νέων υπηρεσιών και τέλος στην μείωση του hardware και ως εκ τούτου στην εξοικονόμηση ενέργειας, κεφαλαιακού κόστους και κόστους συντήρησης. Επιπρόσθετα, το NFV δίνει τη δυνατότητα για τη δημιουργία στιγμιότυπων του δικτύου κορμού, εξειδικευμένων στην υποστήριξη συγκεκριμένων υπηρεσιών, όπως οι M2M. Ενδεικτικά, κόμβοι οι οποίοι θα μπορούσαν να εικονικοποιηθούν είναι οι εξής: Home Location Register (HLR), Home Subscriber Server (HSS), Mobility Management Entity (MME), Serving GPRS Support Node (SGSN), Gateway GPRS Support Node (GGSN), Packet Data Network Gateway (PDN-GW), Serving Gateway (S-GW), κόμβοι ενός IP Multimedia System (IMS) κ.α. [51], [52], [53].
- Εικονικοποίηση κόμβων του Δικτύου Πρόσβασης κινητών επικοινωνιών :** Κατά αντιστοιχία με το δίκτυο κορμού, ένα πιθανό σενάριο εφαρμογής της NFV τεχνολογίας εντοπίζεται στους κόμβους ενός δικτύου πρόσβασης. Πιο συγκεκριμένα, στόχος είναι η πραγματοποίηση ολόκληρης της λειτουργίας ενός σταθμού βάσης μέσω λογισμικού. Μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να επιτύχει τη συνύπαρξη λειτουργιών σταθμών βάσης πάνω στο ίδιο hardware ακόμη και αν πρόκειται για λειτουργίες διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών (π.χ. 2G, 3G, LTE, WiMax, 5G). Οι υλικοί πόροι του δικτύου θα μπορούν να δεσμεύονται δυναμικά και κατά απαίτηση, καθώς θα υπάρχει μία κεντρική δεξαμενή πόρων, οδηγώντας τελικά και εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας. Ενδεικτικά, κόμβοι οι οποίοι θα μπορούσαν να εικονικοποιηθούν είναι οι εξής: evolved Node B (eNB), Node B (NB), Base Transceiver Station (BTS) καθώς και κόμβοι ελέγχου σταθμών βάσης, όπως οι Radio Network Controllers (RNC) [51], [52].
- Εικονικοποίηση των δικτύων Διανομής Περιεχομένου :** Τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (Content Delivery Networks - CDN) αποτελούν έναν ακόμη πιθανό τομέα εφαρμογής του NFV. Οι πάροχοι υπηρεσιών CDN, εγκαθιδρύουν κατά κύριο λόγο cache servers (κρυφές μνήμες), που αποθηκεύουν το δημοφιλέστερο περιεχόμενο κοντά στα τελικά δίκτυα προκειμένου να βελτιώσουν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών και την εμπειρία χρήστη. Ωστόσο, οι caches συνιστούν εξειδικευμένο και μεμονωμένο hardware ανά πάροχο CDN υπηρεσιών και ανά πάροχο δικτύου, ενώ παράλληλα είναι διαστασιοποιημένες ώστε να διαθέτουν δυνατότητες και πόρους προκειμένου να αντιμετωπίσουν καταστάσεις υψηλού φόρτου. Ως εκ τούτου, γίνεται αντιληπτό ότι τεράστια ποσότητα πόρων παραμένει αναξιοποίητη για μεγάλα χρονικά διαστήματα του κύκλου ζωής τους.

Κατά συνέπεια, με την εικονικοποίηση των CDN-caches, οι υλικοί πόροι (hardware) είναι δυνατόν να διαμοιράζονται μεταξύ πολλαπλών caches του ίδιου ή και διαφορετικών παρόχων CDN υπηρεσιών, ακόμη και μεταξύ διαφορετικών VNFs. Μία τέτοια λύση οδηγεί σε εξαιρετική εξοικονόμηση πόρων ενώ παράλληλα η δυναμική δέσμευση πόρων μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της διεκπεραιωτικής ικανότητας του CDN δικτύου, καθώς και σε μείωση των καθυστερήσεων [51], [52], [53].

- **Εικονικοποίηση οικιακού περιβάλλοντος** : Η εικονικοποίηση των υπηρεσιών που ως τώρα απαιτούσαν εξειδικευμένο hardware στις εγκαταστάσεις των τελικών χρηστών, σε οικιακά και επαγγελματικά περιβάλλοντα, αποτελεί ένα ακόμη σενάριο εφαρμογής του NFV. Στην εν λόγω υλοποίηση, στόχος είναι η μετατόπιση ορισμένων λειτουργιών εκτός των οικιακών δικτύων, προκειμένου να αντιμετωπιστούν προβλήματα εγκατάστασης, αναβάθμισης και συντήρησης του εξοπλισμού. Λειτουργίες όπως αυτές των routers, των set-top-boxes, των residential gateways, των Wi-Fi hotspots, των home eNBs κ.α. θα μπορούν να εκτελούνται σε εξοπλισμό που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Επιπρόσθετα, μία τέτοια εφαρμογή θα μπορούσε να οδηγήσει σε μία ομαλότερη μετάβαση προς το Internet Protocol version 6 (IPv6), αλλά και σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας [51], [52].
- **Εικονικοποίηση λειτουργιών Δικτύου Πρόσβασης σταθερών επικοινωνιών** : Στα δίκτυα πρόσβασης σταθερών επικοινωνιών πολυάριθμοι κόμβοι τοποθετούνται σε κάθε πιθανή τοποθεσία, όπως μέσα σε καμπίνες, πάνω σε πυλώνες ηλεκτρισμού, κάτω από το έδαφος κ.τ.λ. Η εικονικοποίηση των εν λόγω κόμβων μπορεί να δώσει λύση σε ζητήματα κατανάλωσης ενέργειας, μείωσης του απαιτούμενου εξοπλισμού, αλλά και αποτελεσματικότερης διαχείρισης τους. Επιπρόσθετα, το NFV θα μπορούσε να καταστήσει εφικτή την «συνεγκατάσταση» λειτουργιών σταθερών και ασύρματων δικτύων πρόσβασης του ίδιου ή και διαφορετικών παρόχων πάνω σε κοινό hardware [51].
- **Αξιοποίηση των VNFs για την παροχή υπηρεσιών Ασφαλείας και Ανάλυσης κίνησης** : Μια εξαιρετικά αποδοτική αξιοποίηση της NFV τεχνολογίας εντοπίζεται στην υλοποίηση VNFs που θα προσφέρουν υπηρεσίες αντίστοιχες των firewalls, των Authentication, Authorization and Accounting (AAA) servers, των Internet Protocol security (IPSec)/ Secure Sockets Layer (SSL) Virtual Private Network (VPN) gateways, των ανιχνευτών ιών (virus scanners) και των συστημάτων ανίχνευσης παρείσφρησης (intrusion detection systems). Επιπρόσθετα, VNFs θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν συσκευές που εκτελούν λειτουργίες ανάλυσης κίνησης, όπως εις βάθος επιθεώρηση πακέτων (Deep Packet Inspection - DPI).

Συμπερασματικά, κοινή συνισταμένη σε όλα τα ανωτέρω σενάρια αποτελεί η δυνατότητα διαμόρφωσης, πάνω από κοινό hardware, ενός εικονικού περιβάλλοντος, το οποίο θα μπορεί να υποστηρίξει κάθε είδους λειτουργία, για κάθε δικτυακή τεχνολογία και για κάθε πάροχο, χωρίς να τίθενται θέματα συμβατότητας και με άμεσο όφελος την εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας [51], [52].

1.4.3.4 Οφέλη και προκλήσεις υιοθέτησης της NFV τεχνολογίας

Στις προηγούμενες παραγράφους σκιαγραφήθηκαν άμεσα ή έμμεσα τα οφέλη που προκύπτουν για τους παρόχους δικτύων επικοινωνιών, από την αξιοποίηση της NFV τεχνολογίας. Συνοψίζοντας, τα κυριότερα μεταξύ των πολλαπλών οφελών που παρουσιάζονται, αποτελούν τα εξής [51], [52], [54] :

- Μείωση του κόστους εξοπλισμού και της κατανάλωσης ενέργειας (μείωση

CAPEX και OPEX) μέσω της χρήσης εξοπλισμού υψηλών επιδόσεων αντί μεμονωμένων ανά δικτυακή λειτουργία συσκευών, στα πλαίσια αξιοποίησης των δυνατοτήτων που προσφέρει η βιομηχανία πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών για ανάπτυξη οικονομιών κλίμακας.

- Μείωση του χρόνου εμπορικής διάθεσης δικτυακών καινοτομιών, καθώς μειώνεται το απαιτούμενο κόστος κεφαλαίου για την εφαρμογή τους, αλλά και οι παρεμβάσεις στην αρχιτεκτονική και τις λειτουργίες του δικτύου.
- Δυνατότητα χρήσης της ίδιας πλατφόρμας για πολλαπλές εφαρμογές και λειτουργίες. Οι πάροχοι μπορούν να διαμοιράζουν τους πόρους τους μεταξύ διαφορετικών προσφερόμενων υπηρεσιών.
- Δυνατότητα χρήσης της ίδιας πλατφόρμας για λειτουργίες και υπηρεσίες διαφορετικών παρόχων.
- Κλιμάκωση υπηρεσιών ανάλογα με την υπάρχουσα ζήτηση.
- Ευελιξία στο σχεδιασμό και τη διαχείριση του δικτύου.
- Ταχύτερη αναβάθμιση των κόμβων του δικτύου.
- Άνοιγμα της αγοράς εικονικών συσκευών, δίνοντας τη δυνατότητα σε μικρότερους παίκτες και στην ακαδημαϊκή κοινότητα να εισέλθουν, ενθαρρύνοντας την εμφάνιση καινοτομιών.

Παρόλα ταύτα, οι πάροχοι δικτύων θα πρέπει να αντιμετωπίσουν μία σειρά τεχνικών προκλήσεων προκειμένου να αποκομίσουν τα ανωτέρω οφέλη. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής [52] :

- Η υλοποίηση εικονικοποιημένων συσκευών υψηλών επιδόσεων, με δυνατότητες φορητότητας μεταξύ hardware διαφορετικών κατασκευαστών.
- Η επίτευξη συνύπαρξης των εικονικοποιημένων κόμβων ενός δικτύου με τους υπόλοιπους κόμβους και η διαμόρφωση των κατάλληλων συνθηκών για την ομαλή μετάβαση σε ένα πλήρως εικονικοποιημένο δίκτυο.
- Η επίτευξη συντονισμού και διαχείρισης των εικονικών συσκευών, με παράλληλη μέριμνα για προστασία από παντός είδους επιθέσεις.
- Το NFV μπορεί να κλιμακωθεί μόνο αν όλες οι λειτουργίες αυτοματοποιηθούν.
- Η εξασφάλιση ενός κατάλληλου επιπέδου ανθεκτικότητας σε βλάβες του υλικού εξοπλισμού και του λογισμικού.
- Η δυνατότητα σχεδιασμού και εγκατάστασης NFV δικτύων που αποτελούνται από συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών.

1.4.4 Software Defined Networking – SDN

Η μεγάλη αύξηση στο πλήθος των κινητών συσκευών, η ολοένα αυξανόμενη δικτυακή κίνηση καθώς και η χρήση τεχνικών εικονικοποίησης και cloud computing, αποτελούν βασικές τάσεις στη σημερινή δικτύωση, οι οποίες αναμένεται να ενταθούν τα επόμενα χρόνια, οδηγώντας τα παραδοσιακά δίκτυα στα όρια των δυνατοτήτων τους. Παράλληλα, η εξάρτηση των παρόχων δικτύων κινητών επικοινωνιών από τους προμηθευτές (vendors), επιβραδύνει την αναβάθμιση των δικτύων τους και την παροχή νέων υπηρεσιών, έως ότου τα αντίστοιχα πρωτόκολλα είναι διαθέσιμα από τους vendors. Προκειμένου να εξυπηρετηθεί η ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων, τα δίκτυα αναγκάζονται να γίνονται όλο και πιο πυκνά ή/και περίπλοκα, καθώς πέρα από φυσικές συσκευές εγκαθίστανται εικονικά ανάλογα τους στα πλαίσια αξιοποίησης των τεχνικών εικονικοποίησης. Οι προαναφερθέντες παράγοντες καθιστούν δύσκολη τη διαχείριση του δικτύου, τόσο από άποψη ασφάλειας, όσο και ενιαίας εφαρμογής πολιτικών και συντήρησης [74].

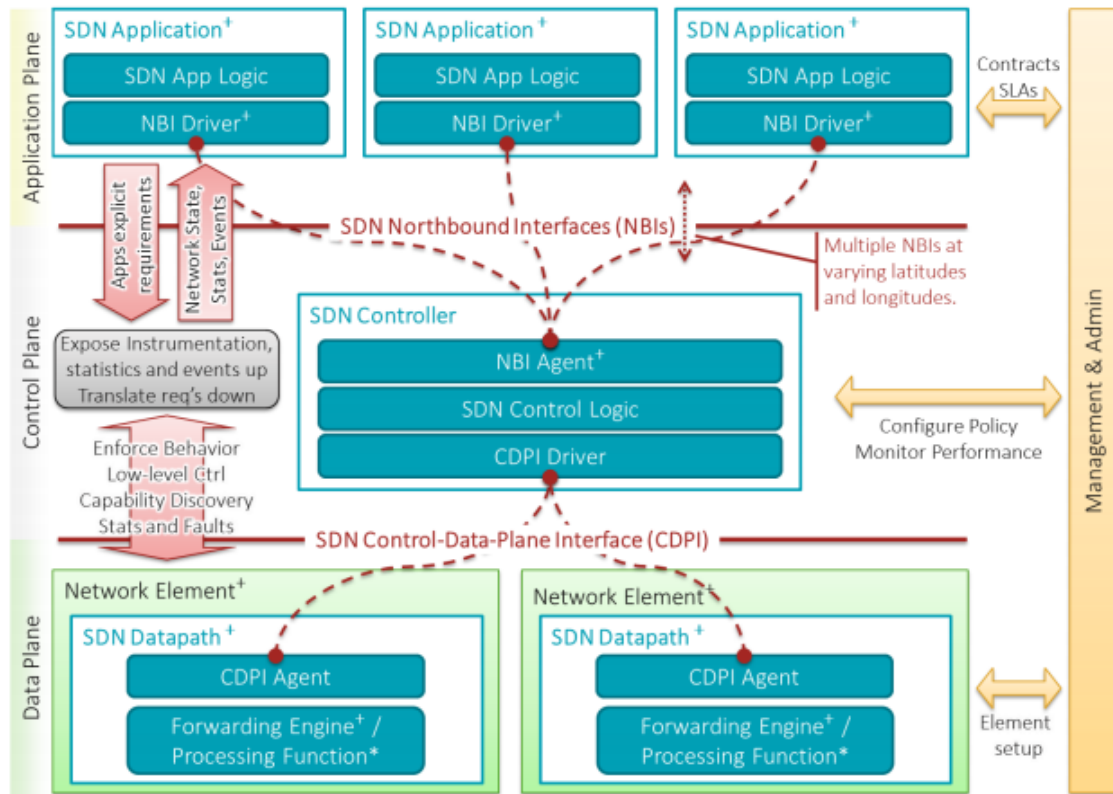
Τη λύση στους ανωτέρω περιορισμούς έρχεται να προσφέρει η ανάπτυξη της Οριζόμενης από το Λογισμικό Δικτύωσης (Software Defined Networking – SDN).

1.4.4.1 Ορισμός

Η SDN αποτελεί μία νέα αρχιτεκτονική προσέγγιση που σχεδιάστηκε προκειμένου να οδηγήσει σε πιο ευέλικτα και οικονομικά δίκτυα, καταργώντας την πολύπλοκη και στατική φύση των σημερινών αρχιτεκτονικών δικτύωσης. Η βασική ιδέα πίσω από το SDN είναι ο διαχωρισμός του control από το data plane και η δυνατότητα άμεσου προγραμματισμού του πρώτου. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με την μετατόπιση του στρώματος ελέγχου από τις δικτυακές συσκευές, σε κεντρικές υπολογιστικές μονάδες, οδηγώντας στην αφαίρεση (abstraction) του δικτύου, το οποίο αντιμετωπίζεται σαν μία λογική ή εικονική οντότητα από τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές. Σε μία SDN αρχιτεκτονική, όλη η «νοημοσύνη» του δικτύου είναι συγκεντρωμένη σε μία λογική οντότητα βασισμένη σε λογισμικό, η οποία και έχει γενική γνώση του δικτύου, τον SDN controller. Ο έλεγχος του δικτύου όντας κεντριοποιημένος σε μία ανεξάρτητη οντότητα, καθιστά ευκολότερο το σχεδιασμό και τη διαχείριση του δικτύου. Επιπλέον, το SDN δίνει τη δυνατότητα απλοποίησης όλων των δικτυακών συσκευών, αφού μία συσκευή δεν χρειάζεται να κατανοεί και να διαχειρίζεται χιλιάδες πρωτόκολλα, αλλά αρκεί να είναι σε θέση να δέχεται και να εκτελεί τις οδηγίες που της δίνονται από τον SDN controller. Μέσω της κεντριοποίησης του επιπέδου ελέγχου, το SDN παρέχει στους διαχειριστές δικτύων την ευελιξία να ρυθμίσουν, να διαχειριστούν, να προστατεύσουν και να βελτιώσουν τη χρήση των πόρων του δικτύου, μέσω αυτοματοποιημένων και δυναμικών προγραμμάτων. Τα εν λόγω προγράμματα είναι εφικτό να αναπτυχθούν από τους ίδιους τους διαχειριστές, αφού δεν αποτελούν πλέον μέρος του κλειστού λογισμικού που ενσωματωνόταν σε καθεμία δικτυακή μονάδα από τους κατασκευαστές δικτύων [74].

Επιπρόσθετα, πλην της αφαίρεσης του δικτύου, οι τεχνικές SDN παρέχουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης τυπικών υπηρεσιών δικτύωσης, όπως η δρομολόγηση, η πολυεκπομπή, λειτουργίες ασφάλειας, έλεγχος πρόσβασης, διαχείριση εύρους ζώνης, παροχή QoS και διαχείριση κατανάλωσης ενέργειας, μέσω APIs (Application Programming Interfaces).

1.4.4.2 Αρχιτεκτονική SDN



Εικόνα 1.28: Αρχιτεκτονική SDN [75]

Προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι τεχνικές της τεχνολογίας SDN είναι απαραίτητο να εξεταστεί λεπτομερώς η αρχιτεκτονική της. Σύμφωνα με το Open Networking Foundation (ONF) η αρχιτεκτονική SDN διακρίνεται σε τρία επιμέρους επίπεδα α) το επίπεδο εφαρμογής (application plane), β) το επίπεδο ελέγχου (control plane) και γ) το επίπεδο δεδομένων (data plane) (βλ. Εικόνα 1.28). Τα βασικά συστατικά στοιχεία των προαναφερθέντων επιπέδων είναι τα ακόλουθα [75]:

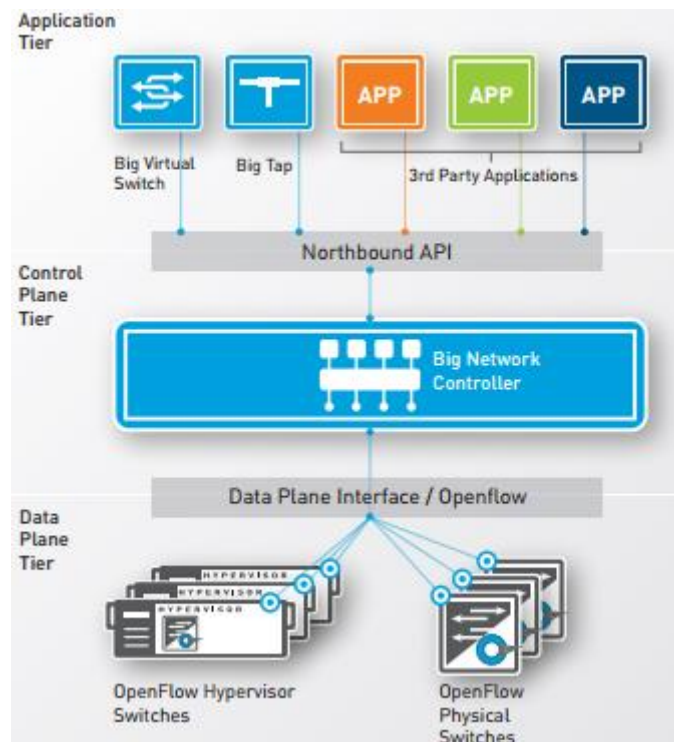
- **Εφαρμογές SDN (SDN Application):** Οι εφαρμογές SDN συνιστούν το επίπεδο εφαρμογής και αποτελούν προγράμματα, τα οποία επικοινωνούν με τον SDN controller μέσω των NBIs προκειμένου να τον ενημερώνουν σχετικά με τις δικτυακές τους απαιτήσεις. Μια εφαρμογή SDN μπορεί να αποτελείται από πολλαπλούς NBI Drivers.
- **Ελεγκτής SDN (SDN Controller):** Ο SDN Controller αποτελεί το βασικό συστατικό του επιπέδου ελέγχου όντας μια λογική κεντροποιημένη μονάδα επιφορτισμένη με α) την μετάφραση των δικτυακών απαιτήσεων των εφαρμογών SDN προκειμένου να τις μεταβιβάσει στα SDN Datapaths που βρίσκονται στο ακριβώς από κάτω επίπεδο, και β) την παροχή μιας αφαιρετικής άποψης του δικτύου στο επίπεδο εφαρμογών, μέσω της παροχής στατιστικών και γεγονότων από τη λειτουργία του δικτύου. Ένας SDN Controller αποτελείται από έναν ή περισσότερους NBI Agents (πράκτορες) και έναν CDPI driver (πρόγραμμα οδήγησης). Θα πρέπει να επισημανθεί, ωστόσο, ότι ο όρος «κεντροποιημένη μονάδα» δεν προδιαγράφει ότι ένας SDN controller δεν μπορεί επί της ουσίας να συνίσταται σε φάρμες από controllers ή ιεραρχικά συνδεδεμένους controllers.
- **Μονοπάτι δεδομένων SDN (SDN Datapath):** Το SDN Datapath αποτελεί μία λογική δικτυακή συσκευή, η οποία παρέχει δυνατότητες επεξεργασίας,

προώθησης και δρομολόγησης δεδομένων τις οποίες φροντίζει να κάνει γνωστές (να διαφημίζει) στο δίκτυο. Ένα SDN Datapath περιλαμβάνει έναν CDPI agent καθώς και ένα σύνολο από μηχανισμούς προώθησης της κίνησης δεδομένων και λειτουργίες επεξεργασίας της κίνησης. Οι εν λόγω μηχανισμοί και λειτουργίες μπορεί να περιλαμβάνουν την απλή προώθηση των δεδομένων μέσω των εξωτερικών διασυνδέσεων του Datapath ή τις εσωτερικές λειτουργίες επεξεργασίας κίνησης. Ένα ή και περισσότερα SDN Datapaths μπορεί να είναι υλοποιημένα σε μία φυσική δικτυακή συσκευή ή καταναμημένα σε πολλαπλές συσκευές.

- **SDN Διεπαφή Μεταξύ μεριάς ελέγχου και δεδομένων (SDN Control to Data-Plane Interface - CDPI):** Η SDN CDPI αποτελεί τη διεπαφή μεταξύ του SDN controller και του SDN Datapath, προκειμένου να παρέχει α) προγραμματιστικό έλεγχο όλων των λειτουργιών προώθησης, β) δυνατότητες «διαφήμισης» των υπηρεσιών του datapath, γ) αναφορά στατιστικών του δικτύου και δ) ενημέρωση για γεγονότα του δικτύου. Μία τέτοια διεπαφή μπορεί να είναι ανοιχτού λογισμικού και ανεξάρτητη από τους κατασκευαστές δικτύων, προσδίδοντας μεγάλη ευελιξία στο δίκτυο. Το πλέον διαδεδομένο παράδειγμα μία τέτοιας διεπαφής αποτελεί το πρωτόκολλο Openflow.
- **SDN Διεπαφές ανωτέρου επιπέδου (SDN Northbound Interfaces - NBI):** Οι SDN NBIs αποτελούν διεπαφές μεταξύ των εφαρμογών SDN και των SDN Controllers. Σκοπός του είναι να παρέχουν μία αφαιρετική άποψη της κατάστασης του δικτύου στις εφαρμογές, αλλά και να γνωστοποιούν τις απαιτήσεις των εφαρμογών στον controller.
- **Προγράμματα οδηγί και Πράκτορες διεπαφών (Interface Drivers and Agents):** Κάθε διεπαφή αποτελείται από ένα ζεύγος driver-agent, όπου ο agent αναπαριστά το ανώτερο και ο driver το από κάτω επίπεδο.

1.4.4.3 Το πρωτόκολλο Openflow

Το πρωτόκολλο OpenFlow αποτελεί το βασικό δομικό συστατικό της επικοινωνίας μεταξύ του control και του data plane, με άλλα λόγια ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του επιπέδου όπου λαμβάνονται οι αποφάσεις για τη λειτουργία του δικτύου και του επιπέδου όπου αυτές υλοποιούνται. Το OpenFlow είναι η πρώτη προτυποποιημένη διεπαφή που σχεδιάστηκε αποκλειστικά για το SDN και η οποία παρέχει υψηλής απόδοσης έλεγχο της κίνησης δεδομένων σε όλες τις συσκευές του δικτύου ακόμη κι αν αυτές προέρχονται από πολλαπλούς προμηθευτές. Εκτελείται και στις δύο πλευρές της διεπαφής μεταξύ του SDN controller και του SDN datapath επιτρέποντας την απευθείας πρόσβαση και τον χειρισμό των δικτυακών συσκευών, όπως οι μεταγωγείς επιπέδου ζεύξης και οι δρομολογητές, είτε είναι φυσικές είτε εικονικές συσκευές, επιτυγχάνοντας την απομόνωση των λειτουργιών ελέγχου σε μία και μόνο κεντροποιημένη μονάδα βασισμένη στο λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα, το OpenFlow χρησιμοποιεί την τεχνική των ροών προκειμένου να αναγνωρίζει τη δικτυακή κίνηση με βάση προκαθορισμένους κανόνες που οριοθετεί δυναμικά ή στατικά ο SDN controller. Το εν λόγω πρωτόκολλο, δίνει μεγάλο βαθμό ευελιξίας στους διαχειριστές δικτύων καθώς παρέχει τη δυνατότητα προγραμματισμού του δικτύου με τρόπο δυναμικό. Ένα απλό παράδειγμα των υπηρεσιών που μπορεί να παρέχει το OpenFlow αποτελεί η δυνατότητα καθορισμού του μέγιστου ποσού κίνησης που μπορεί να περνά από κάθε δικτυακή συσκευή [74].



Εικόνα 1.29: Η θέση του Openflow στην Αρχιτεκτονική SDN [76]

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του εν λόγω πρωτοκόλλου αποτελεί η απλότητα και η ευελιξία στην εφαρμογή του, καθώς η χρήση του είναι εφικτή τόσο σε φυσικά, όσο και σε εικονικά δίκτυα και για την εγκατάσταση του αρκεί μια απλή εγκατάσταση λογισμικού στις δικτυακές συσκευές.

1.4.4.4 Σενάρια Χρήσης

Η τεχνολογία SDN παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα τομέων εφαρμογής, με τα σενάρια χρήσης να αυξάνονται συνεχώς προκειμένου να εξυπηρετήσουν πολύ διαφορετικές ανάγκες μέσα σε ένα δίκτυο. Οι τεχνικές SDN μπορούν να εφαρμοστούν σε LANs, σε WANs, σε κέντρα δεδομένων, σε cloud αρχιτεκτονικές και σε δίκτυα παρόχων υπηρεσιών. Κάποια από τα κυριότερα σενάρια χρήσης αποτελούν τα εξής [74], [77]:

- **Κέντρα Δεδομένων :** Παρά το γεγονός ότι οι τεχνικές εικονικοποίησης των δικτύων βελτίωσαν σε μεγάλο βαθμό την ευελιξία και τον σχεδιασμό τους, παρατηρούνται συχνά καταστάσεις συμφόρησης στις εικονικές συσκευές λόγω αυξημένης κίνησης. Οι αρχιτεκτονικές SDN επιτρέπουν την αύξηση της κλιμάκωσης σε κέντρα δεδομένων και την ευκολότερη μετάβαση σε VMs, την καλύτερη αξιοποίηση των servers, τη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας και τη βελτιστοποίηση χρήσης του εύρους ζώνης, προσφέροντας την δικτυακή υποδομή ως μία υπηρεσία.
- **Cloud :** Το SDN επιτρέπει στους δικτυακούς πόρους να δεσμεύονται με ελαστικό τρόπο καθιστώντας δυνατή την πρόβλεψη για υπηρεσίες cloud και πιο ευέλικτο το hand-off στον εξωτερικό πάροχο cloud υπηρεσιών.
- **Πάροχοι Υπηρεσιών :** Το SDN δίνει τη δυνατότητα κλιμάκωσης και αυτοματοποίησης σε παρόχους δικτυακών υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα, οι SDN τεχνικές μπορούν να υποστηρίξουν την multi-tenant δικτύωση και να εξασφαλίσουν ότι οι πόροι δεσμεύονται και χρησιμοποιούνται κατά το βέλτιστο

τρόπο, προκειμένου να οδηγήσουν τελικά σε μείωση των CAPEX και OPEX των παρόχων.

- **Wide Area Networks (WAN) και Local Area Networks (LAN)** : Το SDN είναι σε θέση να ενισχύσει κάθε τύπου ασύρματο δίκτυο με μια πληθώρα δυνατοτήτων όπως:
 - **Εύρος ζώνης κατ' απαίτηση:** Καθίσταται δυνατή η κατ' απαίτηση δέσμευση επιπρόσθετου φάσματος για την υποστήριξη μίας ασύρματης σύνδεσης.
 - **Απόδοση κατ' απαίτηση:** Η δικτυακή απόδοση μπορεί να προσφέρεται ως υπηρεσία σε μία SDN αρχιτεκτονική, κατά την οποία το δίκτυο με δυναμικό τρόπο ελέγχει και διασφαλίζει την παροχή της απαραίτητης χωρητικότητας για τις εφαρμογές καθώς την τήρηση ενός προσυμφωνηθέντος επιπέδου απόδοσης.
 - **Αποδοτική κατεύθυνση της κίνησης:** Καθίσταται δυνατή η «διανομή» της κίνησης δεδομένων προκειμένου να διέρχεται μόνο από τις συσκευές που την αφορούν, αποφορτίζοντας με αυτό τον τρόπο τον δικτυακό εξοπλισμό και κατ' επέκταση εξοικονομώντας πόρους και ενέργεια.
 - **Εγκαθίδρυση multi-tenant περιβαλλόντων:** Με τη χρήση SDN τεχνικών καθίσταται εφικτή η δυναμική εγκατάσταση εικονικών ισοδυνάμων των μονάδων ενός δικτύου προκειμένου να επιτευχθεί αναπαράσταση ή και ενίσχυση μίας δικτυακής υποδομής για την υποστήριξη επιπρόσθετης κίνησης και υπηρεσιών.
 - **Χρήση του δικτύου από διαφορετικές τεχνολογίες:** Με τη βοήθεια των τεχνικών SDN, ο φυσικός δικτυακός εξοπλισμός μπορεί να τμηματοποιείται προκειμένου να εγκαθιδρύνονται πάνω σε αυτόν εικονικά δίκτυα πολλών διαφορετικών τεχνολογιών, τα οποία εκτελούν διαφορετικά πρωτόκολλα και προσφέρουν διαφορετικές υπηρεσίες.

1.4.4.5 Πλεονεκτήματα της SDN Αρχιτεκτονικής

Η SDN αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αρχιτεκτονικής δικτύων, που προσφέρει μια κεντρική και απλοποιημένη διαχείριση των διαδικασιών ελέγχου μέσα σε ένα δίκτυο. Μία πληθώρα πλεονεκτημάτων προκύπτει από την εν λόγω αρχιτεκτονική, ανάμεσα στα οποία ξεχωρίζουν η δυνατότητα προγραμματισμού της δικτυακής κίνησης, η μεγάλη ευελιξία, η ικανότητα εμποτείας όλου του δικτύου με βάση προκαθορισμένες πολιτικές και η αυτοματοποίηση του. Ωστόσο, το δυνατό χαρτί της SDN τεχνολογίας αποτελεί η ικανότητά της να συμβαδίζει με τις ταχύτερες αλλαγές που λαμβάνουν και θα λάβουν χώρα στη σημερινή και άμεσα μελλοντική δικτύωση, όπως η επικράτηση των εφαρμογών έντασης κίνησης και εικονικοποίησης. Τα πλέον αναγνωρισμένα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση SDN τεχνικών αποτελούν τα εξής [21], [78]:

- **Κεντρική Διαχείριση του Δικτύου:** Με την SDN δικτύωση μια κεντρική μονάδα έχει συνολική άποψη και έλεγχο του δικτύου, κάνοντας ευκολότερη τη λήψη αποφάσεων και τη γενικότερη διαχείριση του δικτύου. Κάτι τέτοιο αποκτά όλο και περισσότερη σημασία για τα μελλοντικά δίκτυα καθώς η χρήση εικονικού δικτυακού εξοπλισμού περιπλέκει ακόμη περισσότερο το ήδη χαοτικό επίπεδο ελέγχου και σηματοδότησης. Μέσω της διάσπασης του control από το data plane, οι διαχείριση φυσικών και εικονικών συσκευών γίνεται απλούστερη και ευέλικτη

ενώ η διάθεση των δικτυακών υπηρεσιών επιταχύνεται.

- **Ταχύτερη αναβάθμιση και επέκταση του Δικτύου:** Με τη χρήση SDN τεχνικών οι διαχειριστές δικτύων είναι σε θέση να πραγματοποιούν κεντρικά τις απαραίτητες ρυθμίσεις του δικτύου, χωρίς να χρειάζεται να ρυθμίζουν μια-μια εκατοντάδες συσκευών. Μια τέτοια λύση μπορεί να οδηγήσει στην πραγματοποίηση των διαδικασιών ρύθμισης ή αναβάθμισης του δικτύου μέσα σε λίγες ώρες ή μέρες, αντί για εβδομάδες ή μήνες με τα έως τώρα δεδομένα. Επιπρόσθετα, τέτοιες παρεμβάσεις μπορούν να γίνουν σε πραγματικό χρόνο δίνοντας τη δυνατότητα για ταχύτερη υποστήριξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών.
- **Κεντρικές υπηρεσίες Ασφάλειας:** Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εφαρμογή τεχνικών SDN δικτύωσης αποτελεί η παροχή κεντρικών υπηρεσιών ασφαλείας μέσω του SDN controller. Μία τέτοια δυνατότητα αποδεικνύεται πολύτιμη σε περιβάλλοντα όπου εφαρμόζονται τεχνικές εικονικοποίησης, καθώς καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη η εφαρμογή φίλτρων κίνησης και firewalls σε εικονικές συσκευές, οι οποίες εγκαθιδρύονται και αποδεσμεύονται δυναμικά ανά πάσα στιγμή. Ο SDN controller μπορεί να παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τις πολιτικές ασφαλείας κατά μήκος του δικτύου γρήγορα και αποτελεσματικά.
- **Μείωση κεφαλαιακών και λειτουργικών εξόδων (OPEX):** Η αποτελεσματικότερη χρήση του εξοπλισμού και ο καλύτερος έλεγχος των εικονικών συσκευών, που προσφέρει το SDN, οδηγούν σε μείωση των λειτουργικών εξόδων για τους παρόχους δικτυακών υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα «εγκατάστασης» διαφορετικών τύπων δικτύων πάνω από έναν κοινό εξοπλισμό, αλλά και η τοποθέτηση εξοπλισμού COTS με περιορισμένες δυνατότητες από άποψη λογισμικού, δεδομένου ότι όλη η ευφυΐα του δικτύου βρίσκεται στον controller, οδηγούν με τη σειρά του σε μείωση του κόστους επενδύσεων.
- **Επεκτασιμότητα:** Το γεγονός ότι οι λειτουργίες του SDN βασίζονται αποκλειστικά σε λογισμικό και πιο συγκεκριμένα σε SDN APIs, καθιστά πολύ ευκολότερη την επέκταση των δυνατοτήτων του συστήματος.
- **Παροχή εγγυήσεων στη διάθεση υπηρεσιών περιεχομένου:** Η δυνατότητα του SDN να ρυθμίζει και να ελέγχει τις ροές δεδομένων, αποτελεί επίσης ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας. Όπως προαναφέρθηκε και σε ένα από τα σενάρια χρήσης της τεχνολογίας, η δυνατότητα δέσμευσης κατ' απαίτηση φάσματος και χωρητικότητας επιτρέπει την παροχής εγγυήσεων για QoS σε υπηρεσίες ευαίσθητες σε θέματα χρονισμού όπως VoIP, live streaming και άλλες πολυμεσικές υπηρεσίες.

1.4.4.6 Προκλήσεις

Αν και οι αρχιτεκτονική SDN προσφέρει μια πληθώρα ιδιαίτερα ελκυστικών πλεονεκτημάτων, πάντα πίσω από μία νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία κρύβονται σημαντικές προκλήσεις. Όσον αφορά την εφαρμογή των SDN συστημάτων, προκύπτει μια σειρά προκλήσεων στους ακόλουθους τομείς [63]:

- **Ασφάλεια:** Δεδομένου ότι το επίπεδο ελέγχου διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο σε μια SDN αρχιτεκτονική και ο SDN controller αποτελεί τον κύριο υπεύθυνο για την εφαρμογή των πολιτικών ασφαλείας μέσα στο δίκτυο, είναι σημαντικό οι στρατηγικές ασφαλείας να επικεντρώνονται στην προστασία του controller. Σε αυτή την κατεύθυνση κρίνεται απαραίτητο κάθε εφαρμογή να αυθεντικοποιείται

- στον controller προτού κάνει χρήση των πόρων του δικτύου.
- **Κλιμάκωση:** Το βασικότερο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής SDN, δηλαδή η συγκέντρωση όλου του επιπέδου ελέγχου σε μία κεντρική μονάδα, αποτελεί ταυτόχρονα μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της. Όσο ο controller επικοινωνεί με το επίπεδο δεδομένων όλο και περισσότερων συσκευών μέσα στο δίκτυο, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης του προβλήματος της «στενωπού» (bottleneck). Το επίπεδο κλιμάκωσης μπορεί να βελτιωθεί μέσω της ύπαρξης φάρμας ή ιεραρχίας από controllers, οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για το επίπεδο ελέγχου του δικτύου.
 - **Διαλειτουργικότητα:** Καθώς μία μετάβαση από τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές σε SDN αρχιτεκτονικές δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί ακαριαία, είναι λογικό πως θα προκύψει μία μεταβατική περίοδος, όπου τμήματα των δικτύων που εφαρμόζουν SDN αρχιτεκτονικές θα πρέπει να αλληλεπιδρούν με τμήματα που εφαρμόζουν παραδοσιακές τεχνικές δικτύωσης. Στην κατεύθυνση αυτή είναι απαραίτητη η ανάπτυξη πρωτοκόλλων τα οποία θα υποστηρίζουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ SDN και παραδοσιακού εξοπλισμού, παρέχοντας από τη μία δυνατότητες εφαρμογής των SDN λειτουργιών, αλλά παρέχοντας από την άλλη, προς τα πίσω συμβατότητα για το παραδοσιακό τμήμα του δικτύου.
 - **Απόδοση:** Τα ζητήματα απόδοσης αποτελούσαν και συνεχίζουν να αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα θέματα στο χώρο της δικτύωσης. Ανεξάρτητα από το πόσο εύρωστο, ασφαλές, κλιμακούμενο και διαλειτουργικό είναι ένα σύστημα, η απόδοση του είναι ο τελικός στόχος. Ο διαχωρισμός των control και data plane μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων δικτύων.

1.5 Χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα για την ανάπτυξη συστημάτων 5ης γενιάς

Λόγω της σημαντικότητας της ανάπτυξης των συστημάτων πέμπτης γενιάς 5G το συντομότερο δυνατόν, έχουν τεθεί σε εξέλιξη πολλά οργανωμένα projects τα οποία εξετάζουν τα διάφορα θέματα πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Στην ενότητα που ακολουθεί καταγράφεται ένας αριθμός από projects που έχουν χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για έρευνα και ανάπτυξη πάνω στα εξελισσόμενα αυτά συστήματα, μελετώντας τις διάφορες πτυχές της δομής και της μορφής της αρχιτεκτονικής που θα διαθέτουν. Τα projects επίσης στοχεύουν στον καθορισμό των χαρακτηριστικών και των δομικών στοιχείων των συστημάτων 5G.

Η σύμπραξη 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) αποτελεί τον οργανισμό ο οποίος επιβλέπει τα χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα για μελέτη των συστημάτων 5ης γενιάς. Ξεκίνησε τη λειτουργία της από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή καθώς και κατασκευαστές της βιομηχανίας, τηλεπικοινωνιακούς φορείς, παρόχους υπηρεσιών, μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις και ερευνητές. Η 5G PPP θα προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για τις υποδομές επικοινωνιών νέας γενιάς της ερχόμενης δεκαετίας.

Η πρόκληση για τη 5G PPP είναι να διασφαλίσει την ηγεσία της Ευρώπης στις συγκεκριμένες περιοχές όπου είναι δυνατή ή όπου υπάρχει προοπτική για δημιουργία νέων αγορών, όπως ηλεκτρονική υγεία, έξυπνες μεταφορές, εκπαίδευση ή ψυχαγωγία και πολυμέσα. Η πρωτοβουλία του εν λόγω οργανισμού θα ενισχύσει την Ευρωπαϊκή βιομηχανία να ανταγωνίζεται επιτυχώς στις διεθνείς αγορές και να ανοίξει νέες ευκαιρίες καινοτομίας. Θα ανοίξει μία πλατφόρμα η οποία θα βοηθήσει στην επίτευξη του στόχου για διατήρηση και ενίσχυση της παγκόσμιας τεχνολογικής ηγεσίας.

Η 5G-PPP θα αποτελείται από τουλάχιστον τρεις φάσεις με περίπου είκοσι μεγάλα

projects να λειτουργούν παράλληλα. Θα επικεντρώνεται σε υποδομές επικοινωνιών, με έναν Ευρωπαϊκό προϋπολογισμό των επτακοσίων εκατομμυρίων Ευρώ για έρευνα, ανάπτυξη και καινοτομία μέσα στα επόμενα επτά έτη. Για παράδειγμα, το σύνολο των ευρωπαϊκών projects στην περιοχή ραδιοπρόσβασης και φάσματος (Radio Access and Spectrum - RAS), ερευνά σε βάθος το τμήμα των θεμάτων της αρχιτεκτονικής του δικτύου πρόσβασης 5G. Επίσης, θα προτείνει ένα σύνολο από projects τα οποία θα μπορούσαν να παρέχουν πλήρη κάλυψη των προκλήσεων για την κλήση, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τα projects αυτά θα αλληλεπιδρούν ώστε να διασφαλίσουν ότι τα αποτελέσματα σε συνδυασμό μεταξύ τους είναι συναφή και αποτελεσματικά. Τα ερευνητικά αυτά προγράμματα θα έχουν μοναδικούς στόχους και ταυτόχρονα θα εξετάσουν τους δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) του προγράμματος, ενώ θα εκπληρώσουν και το στόχο της σχεδίασης ενός νέου δικτύου, το οποίο θα υποστηρίζει τη συνδεσιμότητα σε κάθε περιοχή και τις επικοινωνίες που θα απαιτεί η βιομηχανία και η κοινωνία έως το 2020. Η τεχνική επιτροπή θα εξετάζει την αλληλεπίδραση των τεχνικών λύσεων που αναπτύσσονται εντός των projects και θα διασφαλίζει συνοχή και σταθερότητα σε ολόκληρο το πρόγραμμα.

Φαίνεται ότι το 2012 ήταν ένα ιδιαίτερο έτος για τις τεχνολογίες 5G, αφού η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου ανακοίνωσε την ίδρυση ενός Κέντρου Καινοτομίας 5G στο Πανεπιστήμιο του Surrey – που αποτέλεσε το πρώτο ερευνητικό κέντρο παγκοσμίως που ιδρύθηκε συγκεκριμένα για έρευνα πάνω στα κινητά δίκτυα 5G. Το ίδιο έτος, το NYU WIRELESS ιδρύθηκε και καθιερώθηκε ως ένα διεπιστημονικό ερευνητικό κέντρο, δίνοντας έμφαση στην έρευνα των ασύρματων δικτύων 5G καθώς και στο πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών. Το κέντρο χρηματοδοτήθηκε από τον Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών (National Science Foundation) του Ηνωμένου Βασιλείου, καθώς και ένα σύνολο δέκα (10) major εταιρειών ασύρματων επικοινωνιών. Το NYU WIRELESS πραγματοποίησε και δημοσίευσε μετρήσεις καναλιών οι οποίες δείχνουν ότι οι συχνότητες mmWave θα μπορούν να προσφέρουν τους ρυθμούς δεδομένων της τάξης των πολλών Gigabit ανά δευτερόλεπτο για τα μελλοντικά 5G δίκτυα.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ήδη δρομολογήσει περισσότερα από δέκα (10) ευρωπαϊκά projects ώστε να εξερευνήσει τις διαθέσιμες τεχνολογικές επιλογές που θα οδηγήσουν στη μελλοντική γενιά των ενσύρματων και ασύρματων επικοινωνιών. Αυτά τα ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα συνοψίζονται υπό τον όρο FP7 και εξετάζουν τις αρχιτεκτονικές και λειτουργικές ανάγκες για τα συστήματα 5G, και οι οποίες ξεπερνούν αυτές των 4G δικτύων. Παρακάτω περιγράφεται τα σημαντικότερα ερευνητικά προγράμματα / projects στο εν λόγω πεδίο.

1.5.1 Horizon 2020

Το πρόγραμμα Horizon 2020 είναι το μεγαλύτερο ευρωπαϊκό πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας που υπήρξε ποτέ, με χρηματοδότηση που προβλέπεται να φτάσει σχεδόν τα ογδόντα δισεκατομμύρια Ευρώ, διαθέσιμη για τη διάρκεια επτά ετών (από το 2014 έως το 2020), συμπεριλαμβάνοντας και τις ιδιωτικές επενδύσεις που θα αποσπάσει το πρόγραμμα αυτό. Το Horizon υπόσχεται περισσότερες καινοτομίες, ανακαλύψεις και παγκόσμιες πρωτιές για την Ευρώπη, μεταφέροντας εξαιρετικά ευφυείς ιδέες από τα εργαστήρια ανάπτυξης στην αγορά.

Καθώς αντιμετωπίζεται ως ένα μέσο για την επίτευξη οικονομικής ανάπτυξης και δημιουργίας θέσεων εργασίας, το Horizon 2020 έχει την πολιτική υποστήριξη των Ευρωπαϊκών ηγετών και των μελών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου. Οι παράγοντες αυτοί συμφώνησαν ότι η έρευνα αποτελεί μία επένδυση στο μέλλον και συνεπώς την τοποθέτησαν στο επίκεντρο των Ευρωπαϊκών σχεδίων για έξυπνη, σταθερή και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη και δημιουργία θέσεων εργασίας.

Συνδέοντας την έρευνα με την καινοτομία, το Horizon 2020 είναι βοηθητικός παράγοντας για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, δίνοντας την έμφασή του στην υψηλού επιπέδου επιστήμη, στη βιομηχανική ηγεσία και στην αντιμετώπιση των κοινωνικών προκλήσεων. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι η Ευρώπη παράγει επιστήμη παγκόσμιας κλάσης, ξεπερνά τα εμπόδια προς την καινοτομία και ότι διευκολύνει τους δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς να συνεργαστούν για να φέρουν εις πέρας και να παραδώσουν τις καινοτομίες.

Το Horizon 2020 είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτό σε όλους, με μία απλή δομή η οποία διευκολύνει συμμετέχοντες να μπορούν να επικεντρωθούν σε ό, τι είναι πραγματικά σημαντικό. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι νέα projects βγαίνουν στην αγορά ταχύτερα, και άρα θα επιτυγχάνουν τα αποτελέσματά τους γρηγορότερα.

Το Ευρωπαϊκό πλαίσιο προγράμματος για έρευνα και καινοτομία θα συμπληρωθεί με επιπρόσθετα μέτρα ώστε να συμπληρώσει και να αναπτύξει περαιτέρω την ευρωπαϊκή ερευνητική περιοχή (European Research Area). Τα μέτρα αυτά θα στοχεύουν στην κατάρρευση των εμποδίων για τη δημιουργία μίας γνήσιας ενιαίας αγοράς γνώσης, έρευνας και τεχνολογίας [45].

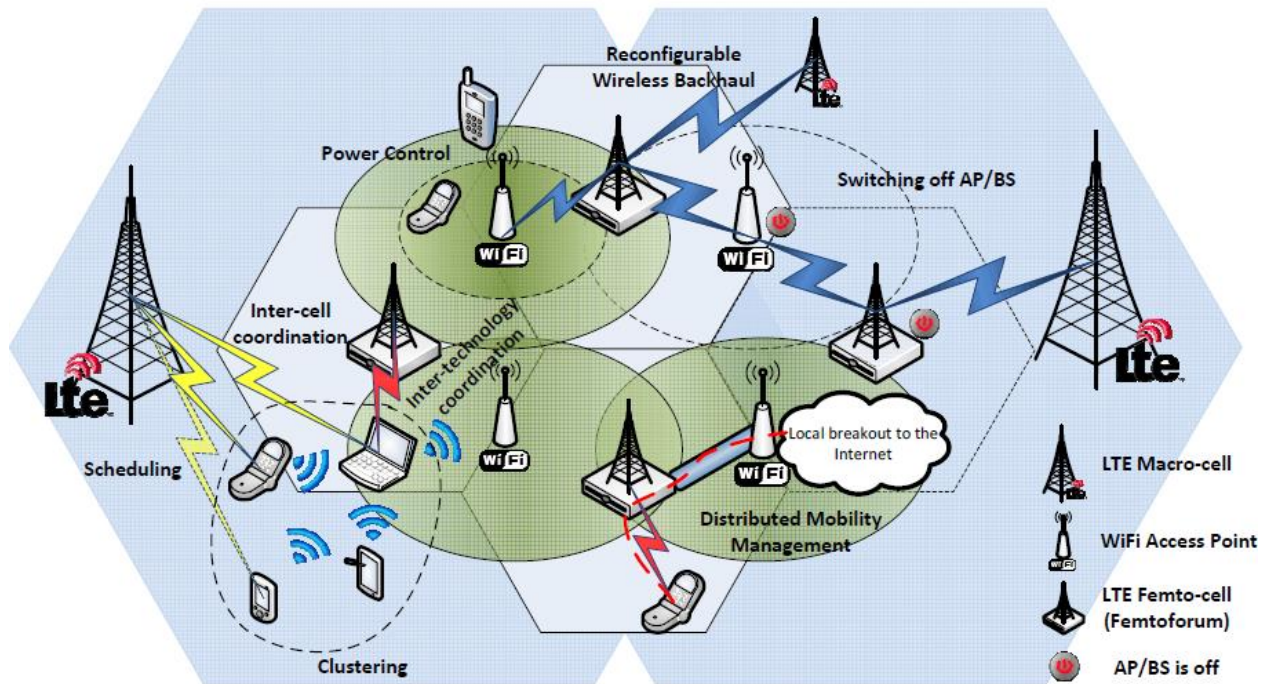
1.5.2 CROWD

Τον Ιανουάριο του 2013, ένα νέο ευρωπαϊκό project, το CROWD (Connectivity management for eneRgy Optimised Wireless Dense networks) ξεκίνησε υπό την τεχνική επίβλεψη του IMDEA Networks Institute, με σκοπό το σχεδιασμό σταθερής δικτύωσης και λύσεων λογισμικού για την ανάπτυξη πολύ πυκνών ετερογενών ασύρματων δικτύων. Η ετερογένεια περιλαμβάνει πολλές διαστάσεις, από τη ραδιοκάλυψη (4G/LTE σε αντίθεση με το Wi-Fi), έως τις εγκαταστάσεις (όπως προγραμματισμένη κατανομή σταθμών βάσης και hot spots, σε αντίθεση με τη μη προγραμματισμένη). Το ερευνητικό πρόγραμμα CROWD προωθεί μία στροφή της μελλοντικής αρχιτεκτονικής Διαδικτύου προς την κατεύθυνση της παγκόσμιας δικτυακής συνεργασίας, των δυναμικών λειτουργικότητων δικτύου και της ρύθμισης της χωρητικότητας on demand. Το project επιδιώκει τη σταθερότητα από την άποψη κόστους και ενεργειακής απόδοσης, την ανάπτυξη πολύ πυκνών ετερογενών ασύρματων δικτύων πρόσβασης καθώς και ολοκληρωμένων ασύρματων - ενσύρματων δικτύων κορμού. Στο παραπάνω πλαίσιο, το CROWD θέτει τέσσερις βασικούς στόχους :

- Να προσφέρει χωρητικότητα ανάλογη της πυκνότητας, όπου αυτή είναι απαραίτητη,
- Να παρέχει μηχανισμούς βελτιστοποίησης του MAC που λειτουργεί σε πολύ πυκνές εγκαταστάσεις θεωρώντας την πυκνότητα ως ένα πόρο αντί για εμπόδιο,
- Να επιτρέπει την κατανάλωση ενέργειας ανάλογη της κίνησης, και
- Να εγγυάται την ποιότητα εμπειρίας του κινητού χρήστη σχεδιάζοντας εξυπνότερες λύσεις για τη διαχείριση της συνδεσιμότητας [47].

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, περιλαμβάνει τις ακόλουθες βασικές λειτουργίες :

- Μηχανισμούς διαχείρισης συνδεσιμότητας, ώστε να αξιοποιηθούν νέες ευκαιρίες που προκύπτουν λόγω της πυκνότητας των σημείων πρόσβασης,
- Ενεργειακά αποδοτικούς μηχανισμούς λειτουργίας, οι οποίοι είναι ικανοί να παρέχουν εξοικονόμηση ενέργειας σε όλο το δίκτυο και κατανάλωση ανάλογη της κίνησης.
- Μηχανισμούς βελτιστοποίησης του δικτύου κορμού, ώστε να διαμορφώνεται δυναμικά για βέλτιστη απόδοση βασισμένη στον εκάστοτε φόρτο.
- Πλαίσιο συνολικού ελέγχου ικανό να διαχειριστεί το δίκτυο για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας.



Εικόνα 1.30: Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του CROWD [47]

Συνοψίζοντας, ένας βασικός σκοπός του project είναι να προτείνει μία ενεργειακά αποδοτική μελλοντική υποδομή Διαδικτύου, στην οποία η πυκνότητα και η ετερογένεια θα χρησιμοποιούνται ως μοναδικοί πόροι ευρυζωνικής δικτύωσης αντί να αντιμετωπίζονται ως πηγές παρεμβολών. Η έρευνα που διεξάγει το CROWD επίσης στοχεύει στην εξέλιξη των κινητών δικτύων, παράλληλα με την ενδυνάμωση του τρέχοντος κορμού του δικτύου και των λύσεων ασύρματης πρόσβασης, παράγοντας νέα και αναβαθμισμένα προϊόντα με βελτιωμένη απόδοση για το χρήστη [37].

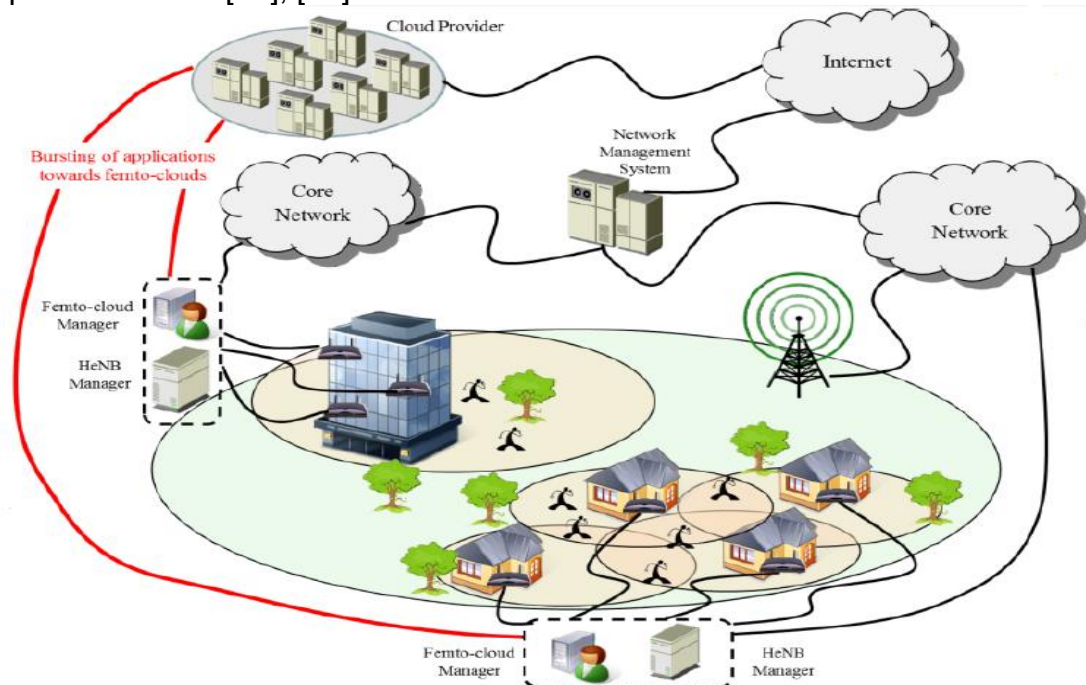
1.5.3 TROPIC

Το TROPIC είναι ένα ειδικά στοχοθετημένο ερευνητικό πρόγραμμα (Specific Targeted Research Project - STREP) υπό την αιγίδα του FP7 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το TROPIC επιδιώκει να ωφελήσει τους διαχειριστές των δικτύων (με μία πιθανή νέα ροή εσόδων), τους κατασκευαστές μικρών κυψελών (με νέα προϊόντα), τους προγραμματιστές εφαρμογών (αφού πιο απαιτητικές εφαρμογές θα μπορούν να σχεδιαστούν) και τους τερματικούς χρήστες (παρέχοντας βελτιωμένη εμπειρία). Ενώ η βασισμένη σε μικρές κυψέλες δικτύωση και το Cloud computing θεωρούνται ως δύο ξεχωριστά πεδία, ένας ακόμη στόχος του προγράμματος TROPIC είναι να τα φέρει σε ένα κοινό πλαίσιο με σκοπό να προσφέρει ένα καινοτόμο εργαλείο, ικανό να παρέχει καλύτερη εμπειρία στους χρήστες, από την άποψη των χρόνων εκτέλεσης αλλά και της εξοικονόμησης ενέργειας [46].

Τα δίκτυα φεμπποκυψελών αντιμετωπίζονται αυτή τη στιγμή ως το νέο πρότυπο επικοινωνιών για τις ολοένα και περισσότερο αυξανόμενες απαιτήσεις της ασύρματης κίνησης. Η εγγύτητα του προτύπου αυτού στο συνδρομητή ανοίγει ένα νέο κόσμο δυνατοτήτων για την ανάπτυξη εφαρμογών. Ανάμεσα σε αυτές, οι υπηρεσίες Cloud computing που απαιτούνται από τα smartphones θα μπορούσαν να μετακινηθούν από τα μεγάλα κέντρα διακομιστών σε HeNBs, υπό την προϋπόθεση ότι αυτοί θα είναι εξοπλισμένοι με υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους, και συνεπώς θα βελτιώσουν την εμπειρία του χρήστη σε σχέση με την καθυστέρηση και την ταχύτητα λήψης / μεταφόρτωσης [48]. Το νέο πρότυπο που προτείνεται από το TROPIC

αντιμετωπίζει το πρόβλημα υπολογισιμότητας, επικοινωνίας και αποθήκευσης, το οποίο υπονομεύει την ανάπτυξη πολλών τρεχουσών εφαρμογών για κινητά τερματικά, ως ένα κοινό πρόβλημα, και δεδομένων των περιορισμών του υλικού και της μπαταρίας, ερευνά για την πιο αποτελεσματική λύση από την άποψη των υπολογιστικών δυνατοτήτων και της κατανομής των ραδιο - πόρων.

Το σχέδιο έργου του TROPIC περιλαμβάνει τον καθορισμό και το χαρακτηρισμό των δομικών στοιχείων επιπέδου συστήματος και τις απαιτούμενες διεπαφές τους για την υλοποίηση ενός προσομοιωτή πλήρους συστήματος. Το TROPIC έχει σχεδιάσει ένα πλήρες σύστημα, το οποίο επιτρέπει την αποφόρτωση υπολογιστικά απαιτητικών εφαρμογών από φορητές συσκευές σε μία τεχνολογία Cloud μίας νέας γενιάς μικρών κυψελών, εξοπλισμένων με υπολογιστικές δυνατότητες για διαμοιρασμό μεταξύ ενός αριθμού χρηστών ώστε να προσφέρουν υπηρεσίες με αναβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας, από την άποψη διάφορων παραγόντων, όπως της καθυστέρησης, της συνοχής των εφαρμογών, της μείωσης της κατανάλωσης μπαταρίας και της εκτέλεσης εφαρμογών οι οποίες ήταν μεγάλου φόρτου ώστε να εκτελεστούν σε παραδοσιακά κινητά συστήματα. Το σύστημα που προτείνεται από το TROPIC φαίνεται συνοπτικά στην παρακάτω εικόνα [46], [48].



Εικόνα 1.31: Το σύστημα που προτείνεται από το πρόγραμμα TROPIC [46]

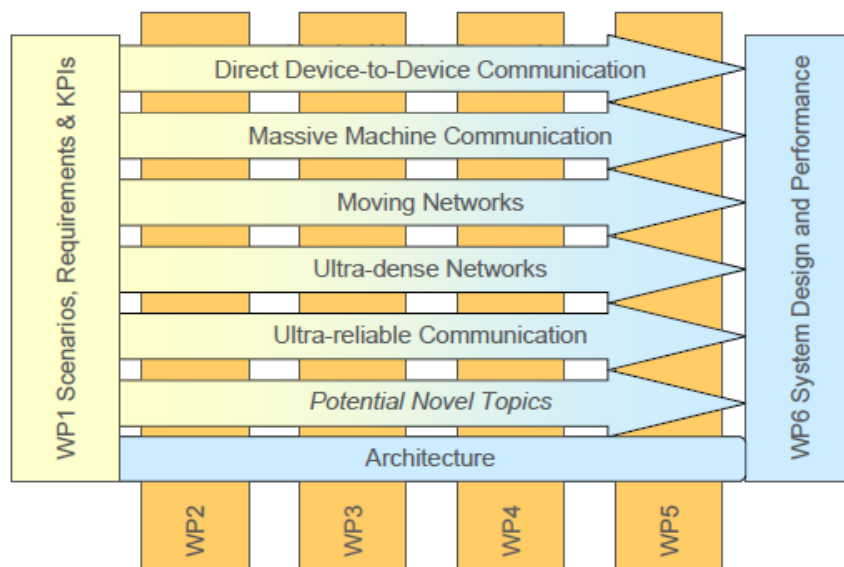
1.5.4 METIS 2020

Το 2012 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προσέφερε 50 εκατομμύρια Ευρώ για έρευνα, ώστε να παρέχει την κινητή τεχνολογία 5G έως το 2020. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα METIS 2020 (Mobile and wireless communications Enablers for Twenty - twenty Information Society) υποστηρίζεται από αρκετές εταιρείες τηλεπικοινωνιών, και στοχεύει στην επίτευξη συμφωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο πάνω στο μελλοντικό παγκόσμιο σύστημα κινητών και ασύρματων επικοινωνιών. Ο γενικός τεχνικός στόχος του METIS είναι να παρέχει ένα σύστημα το οποίο να υποστηρίζει 1000 φορές υψηλότερη φασματική απόδοση κινητού συστήματος σε σύγκριση με αυτή των υπάρχουσών εγκαταστάσεων LTE και να προσφέρει την απαραίτητη προσαρμοστικότητα, ευελιξία και επεκτασιμότητα. Το project θα ερευνά τα βασικά τεχνολογικά συστατικά που

υποστηρίζουν το σύστημα, και επίσης θα αξιολογούν και θα επιδεικνύουν τις βασικές λειτουργίες. Επιπροσθέτως, το 2013 ξεκίνησε άλλο ένα πρόγραμμα, με όνομα «5GrEEen», το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με το METIS και επικεντρώνεται το σχεδιασμό των Green 5G κινητών δικτύων. Στο project αυτό, ο στόχος είναι να αναπτυχθούν κατευθυντήριες γραμμές για τον καθορισμό του δικτύου νέας γενιάς με ειδική μέριμνα για θέματα ενεργειακής απόδοσης, βιωσιμότητας και οικονομικής προσιτότητας.

Το πρόγραμμα METIS συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπό την αιγίδα του Seventh Framework Program (FP7) για έρευνα και ανάπτυξη. Το project θα παρέχει μία σημαντική πλατφόρμα για μία έγκαιρη παγκόσμια συμφωνία υπό την ηγεσία της Ευρώπης πάνω σε θεμελιώδη ερωτήματα σχετικά με την ανάπτυξη του μελλοντικού συστήματος κινητών και ασύρματων επικοινωνιών, και θα ανοίξει το δρόμο για μελλοντική προτυποποίηση .

Το METIS ακολουθεί μία προσέγγιση διπλής όψης, οδηγώντας σε μία οργάνωση δύο διαστάσεων του project, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει σχεδιασμό επιπέδου συστήματος και αξιολόγηση μέσω Horizontal Topics (HT) με τη συνολική τεχνική έρευνα σε Work Packages (WP). Τα HT διασφαλίζουν ότι οι παγκόσμιες προκλήσεις και τα ζητήματα συστήματος αντιμετωπίζονται κατάλληλα και επιπλέον διασφαλίζουν αλληλεπίδραση και συνεργασία μεταξύ των WP για λειτουργικότητα επιπέδου συστήματος. Τα WP πραγματοποιούν έρευνα σε σχετικές περιοχές και αναπτύσσουν τα τεχνολογικά συστατικά. Αυτή η δισδιάστατη δομή θα εξασφαλίσει ότι το project θα ανταποκρίνεται στις αναμενόμενες μελλοντικές ανάγκες και ότι έχει την ικανότητα να προσαρμοστεί σε απρόβλεπτες εμπορικές, κοινωνικές, τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους. Το πλάνο εργασίας του METIS είναι δομημένο πάνω σε οκτώ WP, εκ των οποίων τα έξι είναι τεχνικής φύσης, το ένα για τη διάδοση των αποτελεσμάτων του project, και το τελευταίο για τη διαχείριση του project.



Εικόνα 1.32: Η δομή του ερευνητικού προγράμματος METIS 2020, βασισμένη σε WP και σε HT [43]

Από οικονομικής άποψης, το πρόγραμμα METIS θα βοηθήσει τη βιομηχανία των κινητών και ασύρματων επικοινωνιών να επεκτείνει τις αγορές, να δημιουργήσει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για τη βιομηχανία κινητών επικοινωνιών, καθώς και να προσφέρει ευκαιρίες σε άλλες βιομηχανίες οι οποίες μπορούν να ωφεληθούν από την τεράστια εξάπλωση της κινητής συνδεσιμότητας. Η Ευρωπαϊκή βιομηχανία θα ωφεληθεί από το METIS οικονομικά κερδίζοντας παράλληλα τον τίτλο του «πρωτοπόρου», χάρη στην καινοτομία που θα δημιουργηθεί από το συγκεκριμένο project [43].

1.5.5 iJOIN

Τα μελλοντικά κινητά δίκτυα αναμένεται να διαχειρίζονται έναν εξαιρετικά μεγαλύτερο όγκο δεδομένων στα επόμενα έτη, αφού όπως έχει ήδη αναφερθεί αναμένεται μία αύξηση της τάξης των 500 έως 1000 φορές στη σημερινή διεκπεραιωτική ικανότητα έως το 2020. Από τη στιγμή που η βελτίωση στο ρυθμό μετάδοσης που λαμβάνεται με τεχνικές φυσικού επιπέδου είναι περιορισμένη, η καλύτερη δυνατή λύση ώστε να αυξηθεί η διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος είναι η χωρική επαναχρησιμοποίηση. Υπό αυτή την έννοια, η χρήση πολύ πυκνών, χαμηλής ισχύος και μικρών κυψελών δικτύων, ταυτόχρονα με πολύ υψηλή χωρική επαναχρησιμοποίηση φαίνεται να παρέχει μία υποσχόμενη επιλογή για το χειρισμό των μελλοντικών απαιτήσεων σε ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Κατ' αρχάς, οι εγκαταστάσεις μικρών κυψελών θα απαιτούν έναν υψηλό βαθμό συντονισμού, λόγω των ισχυρών παρεμβολών εντός των κυψελών. Επιπλέον, οι λύσεις για το ετερογενές δίκτυο κορμού θα χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν τις μικρές κυψέλες και το δίκτυο κορμού, αλλά έως τώρα το δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού είναι ανεξάρτητα σχεδιασμένα και επομένως δεν έχουν βελτιστοποιηθεί με κοινό τρόπο.

Το Νοέμβριο του 2012, ξεκίνησε το ερευνητικό πρόγραμμα i-JOIN (Interworking and JOINt Design of an Open Access and Backhaul Network Architecture for Small Cells based on Cloud Networks) χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση υπό την αιγίδα του FP7. Το πρόγραμμα iJOIN εισάγει τη νέα έννοια του RAN-as-a-Service (RANaaS), όπου η λειτουργικότητα του RAN ευέλικτα συγκεντρώνεται μέσω μίας ανοιχτής IT πλατφόρμας βασισμένης σε μία υποδομή Cloud. Το iJOIN στοχεύει σε ένα κοινό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού, υλοποίηση αλγορίθμων λειτουργίας και διαχείρισης του δικτύου, καθώς και προσθήκη αρχιτεκτονικών στοιχείων τα οποία περιλαμβάνουν μικρές κυψέλες, ετερογενές δίκτυο κορμού και κεντρική επεξεργασία. Η προσέγγιση αυτή θα βελτιώσει τη διεκπεραιωτική ικανότητα συστήματος του RAN και θα προσφέρει υπηρεσίες άμεσα και αποτελεσματικά, με βέλτιστη διαχείριση κόστους, ενέργειας, πολυπλοκότητας και καθυστερήσεων οπουδήποτε και οποτεδήποτε προκύπτει η ζήτηση. Το iJOIN θα μελετήσει επίσης και τις απαιτήσεις, τους περιορισμούς και τις επιπτώσεις για τα ήδη υπάρχοντα κινητά δίκτυα, και ειδικότερα για το LTE-Advanced του 3GPP.

Οι βασικοί δείκτες απόδοσης του ερευνητικού αυτού προγράμματος είναι οι παρακάτω :

- Η αξιοσημείωτη αύξηση στη διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος χωρίς αύξηση των φασματικών πόρων,
- Η αύξηση της αποδοτικότητας της ενέργειας ανά bit χρησιμοποιώντας πολύ πυκνές εγκαταστάσεις και RANaaS,
- Η μείωση του κόστους της εγκατάστασης και λειτουργίας δικτύων μικρών κυψελών.
- Η αύξηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης των πόρων για την πιο αποδοτική αξιοποίηση των υπάρχοντων πόρων [44].

1.5.6 MOBILE CLOUD NETWORKING

Το Mobile Cloud Networking (MCN) project είναι ένα ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα υπό την αιγίδα του FP7, χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το πρόγραμμα MCN ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2012 για μία περίοδο τριανταέξι (36) μηνών. Συνολικά, δεκαεννέα (19) εταίροι κορυφαίου επιπέδου από βιομηχανικούς και ακαδημαϊκούς κύκλους συνεργάζονται ώστε να πραγματοποιήσουν από κοινού το

όραμα του MCN.

Σήμερα, η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών δεν καταφέρνει να αξιοποιήσει ακόμη πλήρως την τεράστια οικονομική δυναμική του Cloud computing, και περιέργως αυτό συμβαίνει παρά την εξάρτηση των τηλεπικοινωνιών από την πρόσβαση στο Cloud. Αντιθέτως, το Cloud computing μειώνει το φόρτο της δικτύωσης. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει μία μοναδική ευκαιρία για την Ευρώπη. Ο πρωταρχικός στόχος του Mobile Cloud Networking είναι να αξιοποιήσει την ευκαιρία αυτή. Θα βασιστεί στην υπεροχή της Ευρώπης στις κινητές επικοινωνίες και θα την επεκτείνει στον τομέα του Cloud, ο οποίος βρίσκεται σχεδόν αποκλειστικά στο χεiriσμό των εταιρειών της Αμερικής.

Το Mobile Cloud Networking project θα καθορίσει και θα αξιολογήσει το Ευρωπαϊκό όραμα για mobile Cloud computing. Θα δώσει τη δυνατότητα στην Ευρωπαϊκή βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών να αναλάβει και να διατηρήσει την ηγεσία στο mobile Cloud computing και συνεπώς αποτελεί θεμελιώδη πυρήνα του Διαδικτύου του μέλλοντος. Ένα ζήτημα είναι ότι το Cloud computing είναι μία επινόηση της βιομηχανίας λογισμικού και συχνά δε γίνεται καλά κατανοητή από τους ειδικούς των τηλεπικοινωνιών. Στο μεταξύ, ο όρος Cloud πολύ συχνά χρησιμοποιείται για να παρουσιάσει εκ νέου πεπαλαιωμένες ιδέες ως καινούριες, γεγονός το οποίο δικαίως θέτει ερωτήματα σε οποιαδήποτε πρόταση πάνω στο Cloud. Επομένως, είναι σημαντικό να γίνουν κατανοητές οι διαφορετικές έννοιες του Cloud Computing, και οι τεχνολογικές αλλά και οι οικονομικές, προκειμένου να πραγματοποιηθεί το καινοτόμο όραμα του Mobile Cloud Networking.

Τα κορυφαία κίνητρα του Mobile Cloud Networking project είναι να προσφέρει :

- Επέκταση της ιδέας του Cloud Computing πέρα από τα κέντρα δεδομένων προς τον κινητό τερματικό χρήστη,
- Μία ενιαία, ατομική υπηρεσία που περιλαμβάνει κινητό δίκτυο, computing και αποθήκευση,
- Τη δυνατότητα για ένα νέο επιχειρηματικό παράγοντα, τον Mobile Cloud Provider,
- Την αρχιτεκτονική του κινητού δικτύου για την αξιοποίηση και την υποστήριξη του Cloud Computing,
- Μετάδοση και αξιοποίηση της ιδέας για ένα από άκρη σε άκρη κινητό δίκτυο Cloud για νέες εφαρμογές [49] .

1.5.7 PHYLAWS

Το ακρωνύμιο PHYLAWS αντιπροσωπεύει το ερευνητικό πρόγραμμα PHYsical LAyer Wireles Security, το οποίο ξεκίνησε την 1^η Νοεμβρίου του 2012 με διάρκεια σαρανταοκτώ (48) μηνών.

Το πρόγραμμα αυτό ερευνά κυρίως τα παρακάτω βασικά θέματα :

- Ενίσχυση της ιδιωτικότητας στις ραδιοπαρεμβολές των ασύρματων δικτύων,
- Ασφάλεια φυσικού επιπέδου (Physec) και απόρρητη κωδικοποίηση,
- Σχεδιασμός αξιόπιστων κυματομορφών και πρωτοκόλλων ραδιοπρόσβασης.

Οι κύριοι στόχοι του προγράμματος είναι να σχεδιάσει και να αποδείξει την αποδοτικότητα των νέων ιδεών περί ιδιωτικότητας των ασύρματων επικοινωνιών οι οποίες αξιοποιούν τις ιδιότητες διάδοσης των ραδιοκαναλιών. Επίσης, το πρόγραμμα έχει σκοπό να ερευνήσει για ρεαλιστικές εφαρμογές στις υπάρχουσες και στις μελλοντικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RAT). Η κυριαρχία των ασύρματων επικοινωνιών (ως ένας καθολικός τρόπος για σχεδόν κάθε άνθρωπο στον κόσμο να έχει πρόσβαση στην πληροφορία) παρουσιάζει παράλληλα ένα σοβαρό κίνδυνο για την κοινωνία, εξαιτίας των ευρέως αναγνωρισμένων διαρροών ασφαλείας στις τρέχουσες ασύρματες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης. Η ασφάλεια σήμερα βασίζεται σε

κρυπτογραφικές τεχνικές επιπέδου bit και σε σχετικά πρωτόκολλα σε διάφορα επίπεδα της στοίβας επεξεργασίας δεδομένων. Οι λύσεις αυτές έχουν μειονεκτήματα, τα οποία είναι αυτή τη στιγμή κύριοι ανασταλτικοί παράγοντες στην πρόοδο της ψηφιακής κοινωνίας : η τυποποιημένη προστασία μέσα σε δημόσια ασύρματα δίκτυα δεν είναι αρκετά ασφαλής, και πολλές από τις αδυναμίες τους είναι πολύ γνωστές. Παρ' όλο που υπάρχουν πρωτόκολλα ισχυρής κρυπτογράφησης και βελτιωμένης αυθεντικοποίησης, εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς και υψηλά επιπρόσθετα κόστη για τους χρήστες των δημόσιων δικτύων.

Οι νέες προσεγγίσεις στην ασφάλεια πηγάζουν από βασικές αρχές θεωρίας πληροφορίας και έμφαση στην ικανότητα απορρήτου του καναλιού διάδοσης. Το PHYLAWS θα τις ερευνήσει για συσκευές και κόμβους επικοινωνίας οι οποίοι λειτουργούν στη ραδιοδιεπαφή. Από την άλλη πλευρά, τα εργαστήρια έρευνας και ανάπτυξης και οι βιομηχανίες που ασχολούνται με ασφαλή ραδιοδίκτυα έχουν συγκεκριμένη εμπειρία και πρακτικά μέσα ώστε να σχεδιάσουν αρχιτεκτονικές βελτιωμένης ασφάλειας, κυματομορφές και πρωτόκολλα ραδιοπρόσβασης, καθώς και να δημιουργήσουν σχετικές ενσωματωμένες μονάδες. Το PHYLAWS στοχεύει στη βελτίωση της ιδιωτικότητας των ασύρματων δημόσιων δικτύων με έναν οικονομικά προσιτό, ευέλικτο, αποδοτικό και μετρήσιμο τρόπο και με έμφαση στους παρακάτω παράγοντες :

- Τον προσδιορισμό των πιο υποσχόμενων τεχνικών ασφαλείας οι οποίες είτε λειτουργούν στο φυσικό επίπεδο είτε αξιοποιούν τα φυσικά χαρακτηριστικά των μεταδιδόμενων σημάτων,
- Τον προσδιορισμό των υπαρχόντων και των μελλοντικών συστημάτων, όπου οι προαναφερθείσες τεχνικές ενδεχομένως μπορούν να υλοποιηθούν, με ή χωρίς αναβαθμίσεις των προτύπων. Θα αναπτυχθούν οι κατάλληλοι αλγόριθμοι όπου κριθεί απαραίτητο,
- Τη διεξαγωγή θεωρητικής, βασισμένης σε προσομοίωση και πειραματικής αξιολόγησης απόδοσης αυτών των τεχνικών, λαμβάνοντας υπόψη ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης, ραδιοηλεκτρικά περιβάλλοντα και παραμέτρους διάδοσης. Επίσης, θα επιδειχθούν οι δυνατότητες ενός συνόλου τεχνικών για βελτίωση της προστασίας πληροφοριών και του απορρήτου του συνδρομητή,
- Την επίδειξη των δυνατοτήτων των επιλεγμένων τεχνικών για μείωση των σημάτων ραδιοεπικοινωνιών, ώστε να βελτιωθεί η χρήση του φάσματος και η ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα αποτελέσματα του project θα είναι ευεργετικά για μία μεγάλη ποικιλία υπαρχόντων και μελλοντικών προτύπων και σε ένα μεγάλο σύνολο υπηρεσιών, από ανάγκες των χρηστών έως και επιστημονικές, για παράδειγμα ραδιοκυψέλες 2G, 3G ή 4G, επικοινωνίες M2M και μικρής εμβέλειας επικοινωνίες μεταξύ συσκευών. Η επίδραση θα είναι κοινωνική και βιομηχανική. Το PHYLAWS αναμένεται επομένως να υποστηρίξει την ακαδημαϊκή έρευνα και τη βιομηχανική ανάπτυξη, με σκοπό να επηρεάσει την προτυποποίηση, να εξυπηρετήσει την είσοδο των ασύρματων τεχνολογιών στους επαγγελματικούς αλλά και προσωπικούς χώρους και να συμβάλει στην ανάπτυξη αξιόπιστων ICTs μέσα στα επόμενα έτη.

1.5.8 COMBO

Το COMBO (COnvergence of fixed and Mobile BrOadband access/aggregation networks) είναι ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα υπό την αιγίδα του FP7, το οποίο ανέλαβαν δεκαέξι (16) εταίροι μέσα σε μία περίοδο τριάντισι ετών, ξεκινώντας από την 1^η Ιανουαρίου του 2013, με πάνω από εννέα (9) εκατομμύρια Ευρώ χρηματοδότησης, από τα οποία σχεδόν τα έξι (6) εκατομμύρια προέρχονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο

στόχος του COMBO ήταν να προτείνει και να ερευνήσει νέες ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για Σταθερή / Κινητή (Fixed / Mobile Converged - FCM) ευρυζωνική πρόσβαση για διαφορετικές περιπτώσεις δικτύων (πυκνά αστικά δίκτυα, αστικά δίκτυα, προαστιακά δίκτυα) [50].

2. ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΣ ΡΑΔΙΟ-ΠΟΡΩΝ ΜΕ NETWORK-CENTRIC ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

2.1 Ανάγκη για Διαμοιρασμό Ραδιο-πόρων μεταξύ διαφορετικών παρόχων

Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για νέες υπηρεσίες και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, το cloud computing και η σύνδεση πολλών και διαφορετικών τύπων συσκευών, ωθούν τα σημερινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών στα όρια των αντοχών τους. Δεδομένου ότι τα φαινόμενα αυτά αναμένεται να κορυφωθούν στα επόμενα χρόνια, τίθενται σημαντικές προκλήσεις ως προς τη δυνατότητα των παρόχων να υποστηρίξουν την προβλεπόμενη ζήτηση και παράλληλα να διατηρήσουν την κερδοφορία και τη βιωσιμότητα των επιχειρήσεών τους. Ίσως το πλέον αναμενόμενο σενάριο για την ικανοποίηση της μελλοντικής ζήτησης είναι η δέσμευση νέου φάσματος και η εγκατάσταση επιπρόσθετου δικτυακού εξοπλισμού από τη μεριά των παρόχων κινητών επικοινωνιών. Ωστόσο, ένα τέτοιο σενάριο πύκνωσης του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση των κεφαλαιακών (CAPEX) αλλά και λειτουργικών (OPEX) εξόδων, τα οποία ήδη αγγίζουν τεράστια ποσά, αποτελώντας ένα από τα κυριότερα προβλήματα επιβίωσης των παρόχων συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Καθώς, χρόνο με το χρόνο τα έσοδα ανά bit ανά χρήστη μειώνονται, η απόσβεση του νέου εξοπλισμού φαντάζει αδύνατη και κατά συνέπεια η απόκτηση του ζημιογόνα, αφού το κόστος του θα είναι σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με τα έσοδα που θα επιφέρει από την εξυπηρέτηση της νέας κίνησης. Επιπρόσθετα, μια σημαντική αύξηση στον αριθμό των σταθμών βάσης οδηγεί σε αύξηση του βαθμού ετερογένειας και πολυπλοκότητας του δικτύου καθώς και στην ανάδυση νέων σεναρίων παρεμβολών, κρίνοντας επιτακτική την ανάγκη για αποτελεσματικότερη διαχείρισή τους προκειμένου η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών να διατηρηθεί σε υψηλά επίπεδα.

Παράλληλα, ενώ η ανάγκη για απόκτηση νέων πόρων αυξάνεται, αλλά φαντάζει αδύνατη και ζημιογόνα, παρατηρούνται φαινόμενα κατασπατάλησης των ήδη υπάρχοντων πόρων. Πιο συγκεκριμένα, αρκεί να αναλογιστεί κανείς ένα σενάριο με δυο σταθμούς βάσης A και B, οι οποίοι είναι γειτονικοί, αλλά ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους κινητών επικοινωνιών. Ας θεωρήσουμε ότι ο σταθμός βάσης A εξυπηρετεί ιδιαίτερα αυξημένη κίνηση φτάνοντας στο 100% των δυνατοτήτων του και επιθυμεί να μεταπέμψει (handover) κάποια σύνδεση σε έναν λιγότερο φορτωμένο σταθμό βάσης. Από την άλλη, ο σταθμός βάσης B χρησιμοποιείται μόνο κατά 30%, καθώς δεν υπάρχουν πολλοί συνδρομητές του παρόχου B στη συγκεκριμένη περιοχή. Παρόλα ταύτα, με βάση τα σημερινά δεδομένα, η εν λόγω σύνδεση δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον σταθμό B, καθώς ανήκει στο δίκτυο διαφορετικού παρόχου. Ως αποτέλεσμα, το 70% των πόρων του παραμένει αναξιοποίητο τη στιγμή που ο A χρειάζεται επιπρόσθετους πόρους. Σε ένα δεύτερο σενάριο, μπορούμε να φανταστούμε έναν χρήστη, ο οποίος ανήκει στον πάροχο A και βρίσκεται σε κάποια γεωγραφική περιοχή, όπου λαμβάνει ισχυρότερα σήματα από ένα σταθμό βάσης του παρόχου B, ωστόσο και πάλι δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από αυτόν, παρόλο που αν μπορούσε θα λάμβανε πολύ υψηλότερο επίπεδο υπηρεσιών. Σε ένα τρίτο σενάριο, ας θεωρήσουμε ένα μεγάλο γεγονός, όπως μία συναυλία ή έναν ποδοσφαιρικό αγώνα. Πληθώρα χρηστών προσπαθεί να αποκτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο, ωστόσο το δίκτυο κινητών επικοινωνιών δεν είναι κατάλληλα διαστασιοποιημένο προκειμένου να υποστηρίξει όλη την παραγόμενη κίνηση. Από την άλλη, οι διοργανωτές του γεγονότος έχουν φροντίσει να εγκαταστήσουν αρκετά σημεία πρόσβασης (Access Point - AP) Wi-Fi τεχνολογίας. Ωστόσο, αν ένας σταθμός βάσης θελήσει να μεταπέμψει μία κλήση και πάλι είναι αδύνατο να τη μεταφέρει σε ένα Wi-Fi AP με διαθέσιμους πόρους, καθώς οι δύο

σταθμοί δεν ανήκουν στο δίκτυο του ίδιου παρόχου και συνάμα ανήκουν σε διαφορετικές τεχνολογίες. Και στα τρία προαναφερθέντα σενάρια συναντώνται περιπτώσεις, όπου αν και υπάρχει διαθεσιμότητα πόρων, καθίσταται αδύνατη η χρησιμοποίησή τους από χρήστες διαφορετικών παρόχων. Είναι ευρέως γνωστό το γεγονός ότι κάθε χρήστης κινητών υπηρεσιών δύναται να έχει πρόσβαση μόνο σε ένα περιορισμένο σύνολο δικτυακών πόρων, οι οποίοι είτε ανήκουν στον πάροχο με τον οποίο διατηρεί συμβόλαιο παροχής υπηρεσιών, είτε σε κάποιο δίκτυο δημόσιας-ελεύθερης πρόσβασης. Τη μόνη περίπτωση, μέχρι σήμερα, όπου μία κινητή συσκευή μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο κάποιου ξένου παρόχου και να λαμβάνει υπηρεσίες, αποτελεί η περίπτωση των υπηρεσιών περιαγωγής (roaming). Πιο συγκεκριμένα, μία συσκευή, ακόμη κι αν βρίσκεται εκτός της γεωγραφικής εμβέλειας του οικιακού της δικτύου, μπορεί να λαμβάνει και να εκκινεί κλήσεις, να δέχεται και να αποστέλλει δεδομένα χάρη στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές περιαγωγής, σύμφωνα με τις οποίες η κινητή συσκευή εξυπηρετείται από ένα ξένο δίκτυο με το οποίο, ωστόσο, το οικιακό δίκτυο έχει εγκαθιδρύσει μία εκ των προτέρων Συμφωνία Άδειας Υπηρεσιών (Service License Agreement - SLA). Ωστόσο, ένα σενάριο περιαγωγής υπόκειται και πάλι στον περιορισμό παρόχου εξυπηρέτησης, καθώς ο μόνος αποδεκτός πάροχος είναι εκείνος που έχει προχωρήσει σε συμφωνία με τον οικιακό πάροχο του εκάστοτε χρήστη και όχι εκείνος που διαθέτει περισσότερους πόρους και καλύτερο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.



Εικόνα 2.1: Πληθώρα χρηστών προσπαθεί να εξυπηρετηθεί από δικτυακό πάροχο

Μέχρι σήμερα, το πλαίσιο αποκλειστικής πρόσβασης ενός συνδρομητή στο δίκτυο ενός και μόνο συγκεκριμένου παρόχου λειτουργεί με επιτυχία, καθώς ο εκάστοτε πάροχος μπορεί εύκολα να ελέγξει τις παρεχόμενες υπηρεσίες και χρεώσεις προς τους συνδρομητές. Παράλληλα, οι ταχύτητες μετάδοσης και η έκταση της γεωγραφικής κάλυψης των παρόχων αποτελούν τα όπλα στα οποία βασίζονται για την απόκτηση ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος, προκειμένου να επικρατήσουν στην αγορά των κινητών επικοινωνιών «εγκλωβίζοντας», ωστόσο τους συνδρομητές στα στενά όρια των κυψελών τους. Κοιτώντας στο μέλλον, με κύριο δεδομένο την «έκρηξη» της ζήτησης και της δικτυακής κίνησης, αλλά και τη στροφή του ενδιαφέροντος στην ανάγκη για μείωση των εξόδων και της κατανάλωσης ενέργειας με παράλληλη αύξηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών, είναι προφανές το γεγονός ότι οι περιπτώσεις υπο-χρησιμοποίησης του δικτυακού εξοπλισμού και του φάσματος συχνοτήτων θα πρέπει να ληφθούν ιδιαίτερα υπόψη στο πλαίσιο ανάπτυξης των 5G δικτύων. Στην κατεύθυνση αυτή, μία στρατηγική Διαμοιρασμού Ραδιο-πόρων (Radio Resource Sharing - RRS) θα μπορούσε να μετατρέψει το πρόβλημα υπο-χρησιμοποίησης πόρων σε ευκαιρία για άμεσο όφελος τόσο των συνδρομητών όσο και των παρόχων. Πιο συγκεκριμένα, στο

παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μία καινοτόμα λύση, η οποία προτείνει το διαμοιρασμό ραδιο-πόρων μεταξύ διαφορετικών παρόχων, προκειμένου ένας χρήστης να δύναται να αποκτήσει πρόσβαση σε IP υπηρεσίες, όχι μόνο μέσω του δικτύου του συμβεβλημένου με αυτόν παρόχου, αλλά και μέσω κάθε άλλου παρόχου, ο οποίος διαθέτει ελεύθερους πόρους. Δεδομένης της ετερογενούς δομής των σημερινών ασύρματων και κινητών δικτύων, η οποία εκτείνεται σε ένα ευρύ σύνολο από μακρο-κυψέλες με εμβέλειες χιλιομέτρων, έως οικιακές κυψέλες – φεμτοκυψέλες (femtocells) και Wi-Fi APs, θέτει τις βάσεις για μία νέα προσέγγιση διαμοιρασμού πόρων, η οποία δεν θα βασίζεται αποκλειστικά σε υποδομές δικτύων παρόχων κινητών επικοινωνιών, αλλά θα προβλέπει την αξιοποίηση κάθε υπαρκτής τεχνολογίας σε μία γεωγραφική περιοχή προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των χρηστών για επιπρόσθετους πόρους και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Σε αυτό το σημείο, ίσως γεννάται το ερώτημα του πώς μπορεί να επιτευχθεί η υλοποίηση μίας τέτοιας υπηρεσίας. Την απάντηση έρχονται να δώσουν οι τεχνικές εικονικοποίησης (virtualization) και πιο συγκεκριμένα οι SDN τεχνικές. Χάρη στο SDN καθίσταται εφικτή η αποκοπή των δικτυακών λειτουργιών και υπηρεσιών από τον δικτυακό εξοπλισμό του εκάστοτε παρόχου, ώστε να με τη σειρά του να καταστεί δυνατός ένας κατ' απαίτηση διαμοιρασμός πόρων μεταξύ ετερογενών δικτύων, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε αλλαγή στη χρήση εξοπλισμού να μην γίνεται αντιληπτή από τις κινητές συσκευές.

Ένα ιδιαίτερα γνωστό σενάριο αξιοποίησης των SDN τεχνικών, υπαγορεύει την εγκαθίδρυση multi-tenant RAN. Σε ένα multi-tenant RAN, κάθε σταθμός βάσης αντιμετωπίζεται ως ένας υλικός εξοπλισμός πάνω στον οποίο αναπτύσσονται, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου κάθε φορά, πολλαπλά στιγμιότυπα σταθμών βάσης, τα οποία λειτουργούν αυτόνομα και εκτελούν σε όλο τους το σύνολο τις λειτουργίες ενός σταθμού βάσης. Η ανωτέρω δυνατότητα, θέτει τα θεμέλια για την προτεινόμενη λύση στην παρούσα εργασία. Πιο αναλυτικά, προτείνεται η επέκταση ενός multi-tenant σεναρίου προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη στιγμιότυπων σταθμού βάσης ενός παρόχου πάνω από τον εξοπλισμό ενός διαφορετικού παρόχου, εάν οι συνθήκες στο δίκτυο του πρώτου απαιτούν την εξεύρεση επιπρόσθετων πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών του και αν παράλληλα ο δεύτερος πάροχος έχει τη δυνατότητα υποστήριξης επιπρόσθετων συνδέσεων. Ωστόσο, ένα λεπτό, αλλά σημαντικό σημείο, αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται η απόφαση εγκαθίδρυσης ενός στιγμιότυπου. Σε αυτή την κατεύθυνση προτείνονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση, το δίκτυο του οικιακού παρόχου ενός συνδρομητή είναι αυτό το οποίο λαμβάνει την απόφαση για εγκαθίδρυση ενός στιγμιότυπου σε ένα σταθμό βάσης άλλου παρόχου, με κύρια κριτήρια τις μετρήσεις σήματος που πραγματοποιούνται από τις κινητές συσκευές, αλλά και πληροφορίες κατάστασης για το σύνολο του δικτύου, οι οποίες παρέχονται από στοιχεία του δικτύου. Στη δεύτερη προσέγγιση, το σημείο απόφασης αλλάζει, καθώς η κινητή συσκευή θα είναι αυτή που με βάση τις μετρήσεις της, αλλά και πληροφορίες που θα τις προσφέρονται από το δίκτυο, θα αιτείται για την εγκαθίδρυση στιγμιότυπου σταθμού βάσης του δικού της παρόχου πάνω από την υποδομή ενός άλλου παρόχου.

Μία τέτοια λύση, με όποια από τις δύο προσεγγίσεις κι αν υλοποιηθεί, προσδοκείται να επέλθει μεγιστοποίηση του βαθμού χρήσης των υπαρχόντων δικτυακών υποδομών συνεισφέροντας στη μείωση των κεφαλαιακών και λειτουργικών εξόδων για τους παρόχους, αλλά και στην βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών.

2.2 Σχετικές μελέτες

Στην παραπάνω ενότητα αναφέρθηκαν τα κίνητρα τα οποία καθιστούν αναγκαίο το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου μεταξύ των παρόχων. Το πεδίο αυτό έχει γίνει το

επίκεντρο του ενδιαφέροντος για διάφορες βιομηχανικές και ακαδημαϊκές ομάδες, οι οποίες ασχολούνται με την έρευνα των τεχνικών καινοτομιών που απαιτούνται, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για προηγμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας στα κινητά τερματικά. Γίνεται πλέον εμφανές ότι με την εφαρμογή μεθόδων διαμοιρασμού των RAN και πόρων η επίδοση και η αποδοτικότητα των δικτύων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες από ερευνητικές ομάδες, πολλές από τις οποίες προτείνουν ως βέλτιστη λύση την εικονικοποίηση του δικτύου, εστιάζοντας σε διάφορες κατηγορίες προσεγγίσεων για το θέμα του διαμοιρασμού των πόρων.

Μία από τις προσεγγίσεις οι οποίες μελετώνται από τις έρευνες που διεξάγονται είναι η υλοποίηση μίας τεχνολογίας multi radio access (Multi-RAT) η οποία επιτρέπει σε όλα τα είδη τερματικών συσκευών να συνδέονται στο Διαδίκτυο ανά πάσα στιγμή και σε οποιαδήποτε τοποθεσία, μέσω του πλησιέστερου σημείου πρόσβασης και ανεξάρτητα από τη RAT που υποστηρίζουν. Ερευνώνται οι αρχιτεκτονικές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν και οι οποίες θα επιτρέψουν στους παρόχους να ικανοποιούν το σύνολο των απαιτήσεων για τα συστήματα 5^{ης} γενιάς, και κυρίως εκείνες που αφορούν στην ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται στους χρήστες (από την άποψη της καθυστέρησης και του throughput). Η τεχνολογία SDN προτείνεται από διάφορες ερευνητικές εργασίες ως μέσο απλοποίησης της διαχείρισης του δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, στην ερευνητική εργασία του M. Yang και της ομάδας του [65], εισάγεται μία OpenRAN αρχιτεκτονική η οποία βασίζεται στην τεχνολογία SDN και εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα των ετερογενών δικτύων, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει προσαρμοστικότητα και προγραμματισμό του δικτύου. Επίσης, η χρήση της εν λόγω τεχνολογίας ως μέσο για την απλοποίηση της διαχείρισης των κυψελωτών δικτύων αναλύεται στην έρευνα του K. Πεντικούση και των συνεργατών του [66]. Η συγκεκριμένη έρευνα επεξεργάζεται μία αρχιτεκτονική δικτύου την οποία διαχειρίζονται ένας αριθμός από Local Controllers (LCs) και ένας Global Controller (GC). Οι LCs διαχειρίζονται τις διεργασίες μέσα σε μία μόνο περιοχή ενός δικτύου (για παράδειγμα μία γεωγραφική περιοχή δεδομένου μεγέθους), ενώ ο GC επιμελείται των γεγονότων που συμβαίνουν μεταξύ διαφορετικών δικτύων πρόσβασης, θέτοντας σε συντονισμό τις διάφορες RANs με το δίκτυο κορμού.

Η ίδια τεχνολογία εντοπίζεται ως πρόταση σε περαιτέρω μελέτες του θέματος του διαμοιρασμού πόρων, όπως είναι η [67]. Οι συγγραφείς του άρθρου προτείνουν τη χρήση του SDN ως τρόπο απλοποίησης των κυψελωτών δικτύων και της διαχείρισής τους, όπως είδαμε και στην προηγούμενη προσέγγιση. Επιπλέον, ισχυρίζονται ότι με κεντριοποιημένο έλεγχο των σταθμών βάσης, το δίκτυο μπορεί να λειτουργήσει με επικερδή τρόπο. Ειδικότερα, οι συγγραφείς κάνουν την υπόθεση ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί αποδοτικότερος διαμοιρασμός ραδιο-πόρων και αποδοτικότερη διαχείριση ενδοκυψελικών παρεμβολών με τη χρήση ενός κεντριοποιημένου ελεγκτή SDN, εξοπλισμένου με την ικανότητα να έχει μία συνολική εικόνα της κατανομής υποφερουσών συχνοτήτων (subcarrier) σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης.

Άλλες μελέτες σχετικές με το διαμοιρασμό πόρων ερευνούν το θέμα από τη σκοπιά των αρχιτεκτονικών βελτιώσεων οι οποίες θα επιτρέψουν στους παρόχους να ικανοποιήσουν το σύνολο των απαιτήσεων για ένα σύστημα 5G με ένα οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Οι πάροχοι καλούνται να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα της χρήσης των πόρων, προκειμένου να επιτύχουν βελτίωση στην οικονομική απόδοση των δικτύων τους. Σε πολλές έρευνες προτείνεται η εικονικοποίηση των σταθμών βάσης του δικτύου, όπως θα παρουσιασθεί παρακάτω. Προσπαθώντας να συμβάλει προς την προαναφερθείσα κατεύθυνση, η 3GPP έχει απαριθμήσει μία σειρά από απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές για το διαμοιρασμό του δικτύου πρόσβασης ανάμεσα σε

πολλούς διαχειριστές δικτύου. Εντούτοις, δεν έχει προσδιοριστεί επακριβώς η λεπτομερής υλοποίηση του μηχανισμού διαμοιρασμού πόρων.

Μία απλή λύση για το διαμοιρασμό πόρων έχει προταθεί από την ερευνητική ομάδα του J. Panchal [68]. Η πρόταση αυτή αφορά στην παροχή on demand υποδομής και διαμοιρασμού φάσματος μεταξύ διαφορετικών παρόχων. Οι συγγραφείς εξετάζουν επίσης την αξιοποίηση μηχανισμών για την εικονικοποίηση του hardware των eNBs, το οποίο θα υποστηρίζει ανεξάρτητους σταθμούς βάσης. Δηλαδή, εισάγεται η έννοια των εικονικών eNBs (virtual eNBs - VeNBs), η οποία υπόσχεται αποτελεσματική βελτίωση στην εξισορρόπηση του φόρτου κίνησης μεταξύ των eNBs που εμπλέκονται στη διαδικασία του διαμοιρασμού πόρων. Παρά το γεγονός ότι αυτό το πλαίσιο αποτελεί μία μελέτη των θεμελιωδών αρχών για το διαμοιρασμό του δικτύου, παρουσιάζει ελλείψεις ως προς την ευελιξία που μπορεί να παρασχεθεί μεταξύ διαφορετικών τύπων κυψελωτής πρόσβασης.

Οι συγγραφείς της εργασίας [69] προτείνουν μία λύση για την εικονικοποίηση των eNBs η οποία επικεντρώνεται στην απομόνωση των πόρων, επιτρέποντας τη συνύπαρξη ανεξάρτητων πολιτικών διαχείρισης μεταξύ διαφορετικών στιγμιοτύπων eNB's (instances). Η προτεινόμενη λύση περιλαμβάνει ένα δυναμικό προγραμματιστή κατανομής πόρων, ο οποίος αποτελείται από ένα πραγματικό και έναν εικονικό προγραμματιστή. Η πραγματική οντότητα είναι υπεύθυνη για τον προγραμματισμό συχνοτήτων, ενώ η εικονική οντότητα δίνει σε κάθε εικονικό eNB την ελευθερία να υλοποιήσει αυτόνομα τις δικές του πολιτικές προγραμματισμού πόρων. Μία παρόμοια προσέγγιση αποτελεί επίσης και εκείνη του Y. Zaki και των συνεργατών του [70], η οποία ερευνά ένα γενικό πλαίσιο για εικονικοποίηση του ασύρματου μέσου, ώστε να επιτρέψει σε πολλούς διαχειριστές να μοιράζονται τους ίδιους φυσικούς πόρους, αλλά παράλληλα να παραμένουν απομονωμένοι μεταξύ τους. Το βασικό συστατικό αποτελεί μία οντότητα, η οποία αναφέρεται ως Hypervisor και τοποθετείται on top of το φυσικό επίπεδο (PHY) στον eNB. Η εν λόγω οντότητα έχει την ικανότητα να εικονικοποιεί τον eNB σε έναν αριθμό από εικονικούς eNBs και ταυτόχρονα να κατανέμει τα τμήματα φυσικών πόρων (Physical Resource Blocks - PRBs) μεταξύ πολλών εικονικών διαχειριστών σύμφωνα με ορισμένες προκαθορισμένες συμφωνίες. Το μειονέκτημα των δύο παραπάνω προσεγγίσεων είναι ότι εστιάζουν στο διαμοιρασμό των πόρων μεταξύ eNBs για κυψελωτά δίκτυα μακροκυψελών, χωρίς όμως να εξετάζουν την ανοιχτή πρόσβαση ή το διαμοιρασμό πόρων μεταξύ ετερογενών συστημάτων.

Εκτός των παραπάνω προσεγγίσεων και μελετών που διεξήχθησαν από διάφορες ερευνητικές ομάδες, η κατάλληλη σύνθεση των κινητών δικτύων για το διαμοιρασμό των πόρων είναι ένα θέμα το οποίο έγινε αντικείμενο απασχόλησης του Ευρωπαϊκού προγράμματος European Ambient Networks (EAN) [71]. Το όραμα του εν λόγω προγράμματος είναι να επιτρέψει τον άμεσο σχηματισμό και διαμόρφωση των δικτύων on demand χωρίς καμία προηγούμενη ρύθμιση μεταξύ των διαχειριστών. Αυτό σημαίνει ότι οποιοσδήποτε χρήστης θα διαθέτει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε οποιοδήποτε δίκτυο και οποιαδήποτε στιγμή. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη δυναμική εγκατάσταση των SLAs που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πρόκειται ουσιαστικά για οικονομικές συμφωνίες μεταξύ των διαχειριστών του δικτύου, οι οποίες εξυπηρετούν το διαμοιρασμό των πόρων και υπηρεσιών μέσα στο δίκτυο και μέσω αυτών μπορεί να ρυθμίζεται η αποζημίωση από ένα πάροχο για τη χρήση πόρων ενός άλλου παρόχου.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης του προγράμματος Ambient Networks, η ομάδα του P. Røyhønen μελέτησε τα πλεονεκτήματα που επιφέρει η συνεργασία μεταξύ των διαχειριστών του δικτύου, χρησιμοποιώντας δύο μετρικές απόδοσης τόσο για τους διαχειριστές (Operator Satisfaction Index – OSI) όσο και για τους τερματικούς χρήστες (User satisfaction index - USI) [72][73]. Η ανάλυσή τους έδειξε ότι η συνεργασία μεταξύ

των παρόχων μπορεί να προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα και διαθεσιμότητα υπηρεσίας, κάτι που οδηγεί σε καλύτερη εμπειρία για το χρήστη και περισσότερα πλεονεκτήματα στους διαχειριστές.

Μία ακόμη ερευνητική εργασία που ασχολήθηκε με την οικονομική πλευρά του διαμοιρασμού των πόρων διετελέσθη από τον K. Johansson και τους συνεργάτες του [73]. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε στην ανάλυση του κόστους και της απόδοσης που προκύπτει από την ανάπτυξη ετερογενών δικτύων πρόσβασης, αποτελούμενων από πολλούς σταθμούς βάσης και RANs με διαφορετικά οικονομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Μέσω των μοντέλων που προτείνουν, φαίνεται ότι το κόστος εγκατάστασης μπορεί να μειωθεί σημαντικά και ότι οι ραδιοπόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότερα, στην περίπτωση του διαμοιρασμού των πόρων του δικτύου μεταξύ των διαχειριστών.

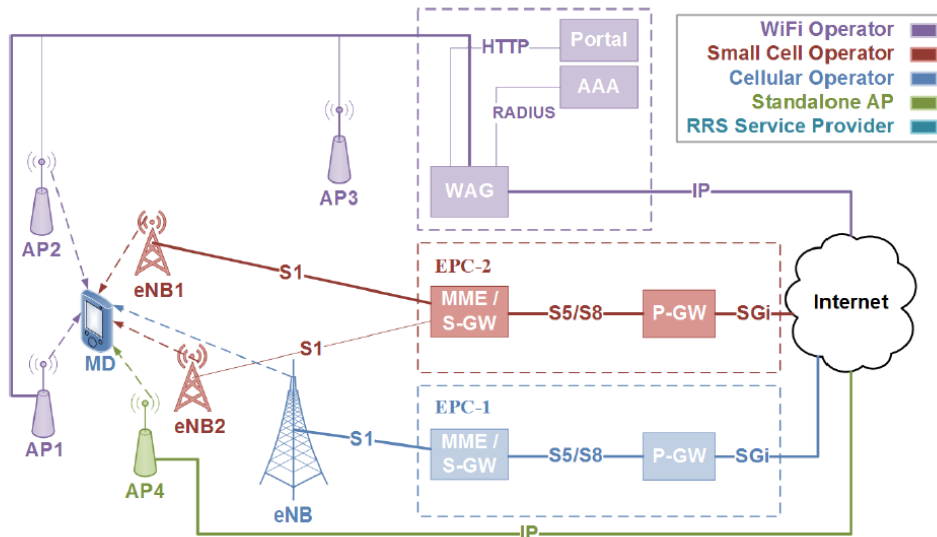
Μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα ερευνητική εργασία, η οποία μάλιστα προτείνει συγκεκριμένη αρχιτεκτονική δικτύου αλλά και συγκεκριμένο πρωτόκολλο σηματοδότησης για την υλοποίηση του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων διεξήχθη από τον Δ. Ξενάκη και τους συνεργάτες του [79]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση εστιάζει περισσότερο στην πλευρά του δικτύου (network-centric approach), δηλαδή το δίκτυο είναι η οντότητα η οποία αναλαμβάνει την πλειοψηφία των ευθυνών για την υλοποίηση της υπηρεσίας RRS. Στην παρακάτω υποενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά η ιδέα της εν λόγω μελέτης, η αρχιτεκτονική που προτάθηκε από την ερευνητική ομάδα καθώς και η αναλυτική ροή και οι φάσεις της σηματοδότησης που ανταλλάσσεται σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση.

2.3 Παρουσίαση της υπάρχουσας network-centric προσέγγισης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η ερευνητική εργασία της ομάδας του Δ. Ξενάκη [79] και η πρόταση που εισήχθη μέσω αυτής για διαμοιρασμό των ραδιο-πόρων βασισμένης στο δίκτυο. Αρχικά δίνεται μία περιγραφή της δομής της αρχιτεκτονικής όπως διαμορφώνεται για ένα μοντέλο σημερινού ετερογενούς δικτύου το οποίο θεωρεί η εν λόγω εργασία, καθώς και η αρχιτεκτονική που προτάθηκε για την υποστήριξη του διαμοιρασμού των δικτυακών πόρων, η οποία είναι εμπλουτισμένη με νέα στοιχεία και λειτουργίες και χρήση της εικονικοποίησης δικτύου. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η ροή σηματοδότησης που μελετήθηκε για την υλοποίηση της υπηρεσίας RRS με μία προσέγγιση βασισμένη στην πλευρά του δικτύου (network centric approach) καθώς και τα βασικά στάδια αποφάσεων αυτής.

2.3.1 Η υπάρχουσα πρόταση για τη δομή της αρχιτεκτονικής του δικτύου [79]

Όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών 5^{ης} γενιάς αναμένεται να αποτελεί συνδυασμό από αρχιτεκτονικές συστημάτων παλαιότερων γενεών και όχι μία εντελώς νέα ανεξάρτητη αρχιτεκτονική, τουλάχιστον ως προς το φυσικό επίπεδο. Άλλωστε, ακόμη και τα σημερινά συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι ετερογενή, αποτελούνται δηλαδή από συνδυασμό δικτύων διαφορετικών αρχιτεκτονικών. Ένα παράδειγμα ενός μοντέλου της ήδη υπάρχουσας αρχιτεκτονικής που θεωρείται στην [79] αποτελείται από ένα κλασικό σύστημα μακροκυψελών LTE-A, ένα σύστημα μικρών κυψελών LTE-A, ένα σύστημα Wi-Fi και ένα μεμονωμένο ιδιωτικό AP, το οποίο δεν ανήκει σε κάποιο δίκτυο. Στην παρακάτω εικόνα αναπαρίσταται σχηματικά η προαναφερθείσα αρχιτεκτονική και έπειτα περιγράφεται αναλυτικά η αρχιτεκτονική του εν λόγω μοντέλου, δηλαδή τα αρχιτεκτονικά στοιχεία και λειτουργίες των επιμέρους τμημάτων από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 2.2: Η υπάρχουσα δομή της αρχιτεκτονικής ενός ετερογενούς 5G δικτύου που εξετάζεται στην [79]

Το σύστημα μακροκυψελών LTE-A αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο από αυτά είναι το δίκτυο πρόσβασης, που είναι γνωστό από τα δίκτυα LTE-A ως E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), και περιλαμβάνει έναν αριθμό από σταθμούς βάσης (eNBs). Το δεύτερο τμήμα είναι το δίκτυο κορμού, που καλείται EPC (Evolved Packet Core) και περιλαμβάνει οντότητες για τη διεκπεραίωση της επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, σε τέτοιου είδους συστήματα LTE-A κεντρικό ρόλο παίζει ένας αριθμός από οντότητες διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Entities – MME), οι οποίες διαχειρίζονται το control plane για τη διασφάλιση της ομαλής κινητικότητας μέσα στο δίκτυο. Επίσης, δύο ακόμη οντότητες του δικτύου κορμού είναι οι Service-Gateways (S-GWs) και η Packet Data Network Gateway (P-GW). Ο ρόλος μίας S-GW είναι διαχειρίζεται το user plane δρομολογώντας τα πακέτα δεδομένων των χρηστών στην P-GW, η οποία με τη σειρά της διασυνδέει όλο το σύστημα, δηλαδή το δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού, με το Διαδίκτυο. Την ίδια αρχιτεκτονική ακολουθεί και το σύστημα μικρών κυψελών LTE-A, με μόνη διαφορά το γεγονός ότι οι σταθμοί βάσης του E-UTRAN τμήματός του είναι μικρότεροι από αυτούς του συστήματος μακροκυψελών, αλλά υποστηρίζουν τις ίδιες λειτουργικότητες.

Αναφορικά με το Wi-Fi σύστημα, σημειώνεται ότι και εκείνο διαθέτει τμήμα δικτύου πρόσβασης και δικτύου κορμού. Το δίκτυο πρόσβασης του εν λόγω συστήματος συνίσταται από έναν αριθμό Wi-Fi Access Points (APs), αντί για τους σταθμούς βάσης eNB των συστημάτων μακροκυψελών και μικρών κυψελών LTE-A, ενώ το δίκτυο κορμού του περιλαμβάνει έναν αριθμό από Wi-Fi Access Gateways (WAGs). Οι WAGs είναι υπεύθυνες για τη συγκέντρωση της κίνησης από τα APs και να πραγματοποιούν τη διασύνδεση ολόκληρου του Wi-Fi δικτύου με το Διαδίκτυο. Στην περίπτωση του AP που δεν ανήκει σε κάποιο δίκτυο Wi-Fi αλλά είναι ιδιωτικό (για παράδειγμα εγκατεστημένο από κάποιο τερματικό χρήστη), δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη WAG, καθώς το μεμονωμένο αυτό AP συνδέεται απευθείας στο Διαδίκτυο.

Εκτός όμως από τις προαναφερθείσες δικτυακές οντότητες που ήδη διαθέτει ένα σημερινό σύστημα κινητών επικοινωνιών, στην [79] τονίζεται ότι απαιτούνται κάποια ακόμη νέα αρχιτεκτονικά στοιχεία και λειτουργικότητες που ξεφεύγουν από τη δομή της αρχιτεκτονικής των συστημάτων LTE-A και Wi-Fi έτσι ώστε να υποστηριχθεί η προτεινόμενη ιδέα του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων για τα συστήματα 5^{ης} γενιάς.

Παρακάτω περιγράφονται οι αρχιτεκτονικές βελτιώσεις που απαιτούνται και δίνεται μία σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής που θα προκύψει προσθέτοντας τα νέα στοιχεία και λειτουργικότητες που θα υποστηρίζουν δυνατότητα RRS.

Η πρώτη αρχιτεκτονική εξέλιξη που εισάγεται είναι ο εξοπλισμός κάποιων από τους (H)eNBs (με HeNBs να συμβολίζει τους eNBs του οικιακού δικτύου κάθε συνδρομητή, δηλαδή του κυψελωτού δικτύου με το οποίο ο συνδρομητής διαθέτει συμβόλαιο παροχής υπηρεσιών) με δυνατότητες τεχνολογίας SDN, ώστε να μπορούν να κατανέμουν το πλεόνασμα των ραδιοπόρων τους σε χρήστες οι οποίοι είναι εγγεγραμμένοι σε διαφορετικό δίκτυο. Αυτός ο τύπος (H)eNBs, οι οποίοι αναφέρονται ως (H)OpeNBs, έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν το φυσικό επίπεδο από τα ανώτερα επίπεδα και να δημιουργούν ένα κοινό απόθεμα από πόρους τους οποίοι μπορούν να διαμοιράζονται στιγμιότυπα λογισμικού που εκτελούνται στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων (H)eNB. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο εισάγεται ένα επιπρόσθετο επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλων, το οποίο καλείται Hypervisor επίπεδο. Το εν λόγω επίπεδο παρεμβάλλεται ανάμεσα στο φυσικό επίπεδο και στα ανώτερα του και εξυπηρετεί τους (H)eNBs ώστε να εικονικοποιήσουν τους φυσικούς ραδιοπόρους τους. Προκειμένου να μπορεί να λειτουργήσει σωστά το επίπεδο του Hypervisor, εισάγεται μία επιπλέον δυνατότητα στους (H)OpeNBs. Πρόκειται για τη δυνατότητα να δημιουργούν πολλαπλά στιγμιότυπα λογισμικού από το δεύτερο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων τους και πάνω. Κάθε τέτοιο στιγμιότυπο ονομάζεται εικονικό eNB (virtual eNB - VeNB), και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει τη λειτουργικότητα ενός (H)eNB ο οποίος ανήκει σε διαφορετικό δίκτυο, καθώς και να διασυνδέεται στο δίκτυο κορμού του οικιακού δικτύου μέσω ενός tunnel του τρίτου επιπέδου της στοίβας πρωτοκόλλων. Όλες οι παραπάνω αρχιτεκτονικές καινοτομίες εξυπηρετούν τους παρόχους κυψελωτών δικτύων να διαμοιράζονται με δυναμικό τρόπο όσους πόρους τους υποχρησιμοποιούνται.

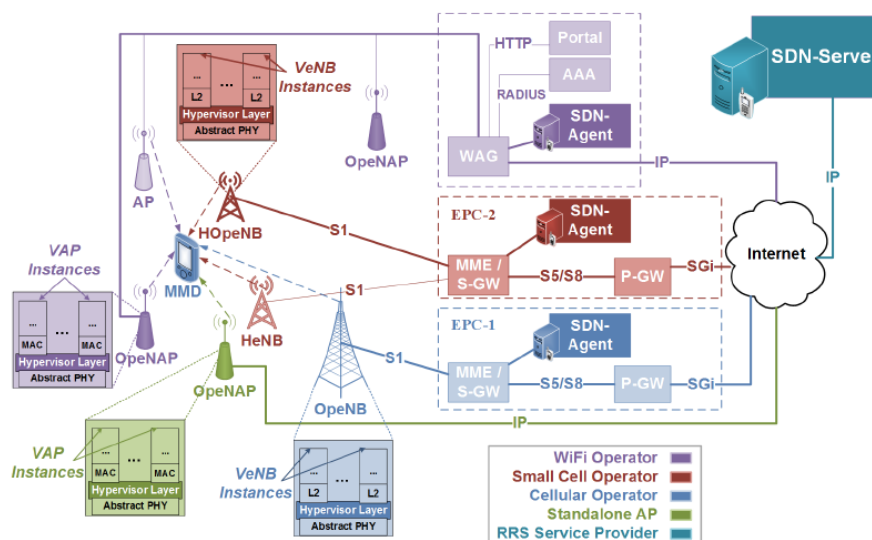
Μία ακόμη αρχιτεκτονική και λειτουργική καινοτομία που προτείνεται στην [79] να εισαχθεί προκειμένου να υλοποιηθεί η δυνατότητα RRS είναι η εγκατάσταση μίας οντότητας που θα διαθέτει το ρόλο ελεγκτή SDN και θα ονομάζεται πράκτορας SDN (SDN Agent) στο δίκτυο κάθε παρόχου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πάροχος ο οποίος διαθέτει κυψελωτό δίκτυο και επιθυμεί να συμμετάσχει στο διαμοιρασμό των δικτυακών πόρων με άλλους παρόχους θα πρέπει να είναι εξοπλισμένος με έναν SDN Agent στο τμήμα του δικτύου κορμού του (EPC). Η αναγκαιότητα για την ύπαρξη των SDN Agents προκύπτει από πολλούς λόγους. Καταρχάς, ένας SDN Agent είναι υπεύθυνος για την κεντρική διαχείριση της δημιουργίας VeNBs (στιγμιότυπων λογισμικού) που πραγματοποιείται στους (H)OpeNBs, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς και για την προσαρμογή των πολιτικών RRS στο επίπεδο Hypervisor του παρόχου στον οποίο ανήκει ανάλογα με τα αιτήματα σχετικών με RRS των άλλων παρόχων. Επίσης, ο SDN Agent είναι επιφορτισμένος με τη διατήρηση μίας σφαιρικής εικόνας της κατάστασης του δικτύου πρόσβασης του κυψελωτού δικτύου (E-UTRAN). Κάτι τέτοιο μπορεί να το επιτύχει μέσω της απόκτησης μετρήσεων της ποιότητας του σήματος που πραγματοποιεί η κινητή συσκευή, καθώς και μετρήσεων του φόρτου των κυψελών από την υποδομή του δικτύου των (H)OpeNBs. Η χρησιμότητα των εν λόγω μετρήσεων είναι φανερή, αφού ο SDN Agent αποκτώντας τέτοιου είδους γνώση έχει τη δυνατότητα να προβλέπει ανά πάσα στιγμή τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα των ραδιοπόρων στο σύνολο της υποδομής του E-UTRAN, ενώ παράλληλα οι δικτυακοί πάροχοι έχουν τη δυνατότητα να συναγωνιστούν σε πραγματικό χρόνο για την κατανομή του φάσματος.

Παρόμοιες αρχιτεκτονικές και λειτουργικές καινοτομίες με αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω για τα κυψελωτά συστήματα θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και για τα δίκτυα Wi-Fi που συμμετέχουν στο συνολικό δίκτυο 5G και στο διαμοιρασμό πόρων, σύμφωνα με την έρευνα [79]. Πιο αναλυτικά, απαιτείται ο εξοπλισμός ενός αριθμού APs

με δυνατότητες τεχνολογίας SDN, ώστε να μπορούν να κατανέμουν το πλεόνασμα των ραδιοπόρων τους σε συσκευές με δυνατότητα Wi-Fi, οι οποίες όμως είναι δεν εγγεγραμμένες στον πάροχο του δικτύου Wi-Fi. Αυτός ο τύπος APs, οι οποίοι αναφέρονται ως OpeNAPs, έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν το φυσικό επίπεδο από τα ανώτερα επίπεδα της παραδοσιακής στοίβας πρωτοκόλλων IEEE 802.11 και να δημιουργούν ένα κοινό απόθεμα από πόρους τους οποίοι μπορούν να διαμοιράζονται στιγμιότυπα λογισμικού που εκτελούνται στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που υλοποιείται στους (H)OpeNBs, υλοποιείται και εδώ ένα Hypervisor επίπεδο το οποίο παρεμβάλλεται ανάμεσα στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο MAC και επιτρέπει στους APs να δημιουργούν πολλαπλά στιγμιότυπα λογισμικού, τα οποία καλούνται εικονικά APs (virtual APs – VAPs) και προσομοιώνουν τη λειτουργικότητα ενός συνηθισμένου Wi-Fi AP από το επίπεδο MAC και πάνω. Όσον αφορά στα μεμονωμένα ιδιωτικά APs, ο SDN Agent ενσωματώνεται στο επίπεδο Hypervisor του OpeNAP, εφόσον στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει δίκτυο κορμού για την εγκατάστασή του. Με άλλα λόγια, τα δύο πρώτα επίπεδα της αρχιτεκτονικής SDN συνενώνονται σε ένα.

Το τελευταίο στοιχείο που αναφέρεται ότι είναι απαραίτητο να προστεθεί στην εν λόγω αρχιτεκτονική είναι η οντότητα που καλείται SDN Server. Παρά το γεγονός ότι κάθε SDN Agent είναι ελεγκτής στο δίκτυο όπου είναι εγκατεστημένος, ο SDN Server είναι υπεύθυνος για την υλοποίηση της δυνατότητας RRS ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους δικτύων από τα οποία αποτελείται το 5G δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ο SDN Server συλλέγει πληροφορίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα πόρων ανά πάροχο δικτύου, παρακολουθεί την κατάσταση των διάφορων λειτουργιών των δικτύων, εξυπηρετεί την εκτέλεση όλων των απαραίτητων λειτουργιών για τις χρεώσεις των συνδρομητών και επίσης ελέγχει τις επιπτώσεις που ενδέχεται να προκύψουν από τις υπογεγραμμένες συμφωνίες για παροχή υπηρεσιών μεταξύ των παρόχων (SLAs). Τέλος, ο SDN Server μπορεί επιπλέον να παίξει το ρόλο του ρυθμιστή για τις χρεώσεις των συνδρομητών οι συσκευές των οποίων επωφελούνται από το διαμοιρασμό των πόρων, επιτρέποντας στους δικτυακούς παρόχους να συναγωνιστούν σε πραγματικό χρόνο για την κατανομή του φάσματος.

Παρακάτω αναπαρίσταται σχηματικά η μορφή της αρχιτεκτονικής που προτείνεται να διαμορφωθεί από την ερευνητική εργασία της ομάδας του Δ. Ξενάκη σύμφωνα με τα νέα στοιχεία και λειτουργίες που απαιτείται να προστεθούν.



Εικόνα 2.3: Η δομή της αρχιτεκτονικής όπως αναμένεται να διαμορφωθεί σύμφωνα με την [79]

Συνοψίζοντας την περιγραφή της αρχιτεκτονικής που θα υποστηρίξει τη δυνατότητα RRS με network-centric προσέγγιση, αναφέρουμε συγκεντρωτικά τα βασικά στοιχεία που απαιτείται να προστεθούν σύμφωνα με την [79] μαζί με τις απαραίτητες λειτουργικότητες που πρέπει να διαθέτουν :

- **(H)OpeNB**

- Επιτρέπει την πρόσβαση σε μη εγγεγραμμένους χρήστες.
- Υλοποιεί ένα επίπεδο Hypervisor το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του φυσικού επιπέδου της στοίβας πρωτοκόλλων eNB και των ανωτέρων του.
- Φιλοξενεί πολλαπλά στιγμιότυπα λογισμικού VeNB.
- Συλλέγει μετρήσεις από τις κινητές συσκευές και αξιολογεί την κατάσταση στην οποία βρίσκονται.
- Υποστηρίζει λογικές διεπαφές μεταξύ των εικονικοποιημένων VeNBs και των αντίστοιχων οικιακών παρόχων.
- Παρέχει μεσοπρόθεσμες προβλέψεις για την τοπική διαθεσιμότητα των πόρων στον αντίστοιχο SDN Agent.

- **OpeNAP**

- Επιτρέπει την πρόσβαση σε μη εγγεγραμμένους χρήστες.
- Υλοποιεί ένα επίπεδο Hypervisor το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του φυσικού επιπέδου της στοίβας πρωτοκόλλων IEEE 802.11 και του επιπέδου MAC και των ανώτερων.
- Φιλοξενεί πολλαπλά στιγμιότυπα λογισμικού VAP.
- Συλλέγει μετρήσεις από τις κινητές συσκευές και αξιολογεί την κατάσταση στην οποία βρίσκονται.
- Ενσωματώνει τον SDN Agent, σε περίπτωση που το AP είναι μεμονωμένο και δεν ανήκει σε κάποιο δίκτυο Wi-Fi.
- Παρέχει μεσοπρόθεσμες προβλέψεις για την τοπική διαθεσιμότητα των πόρων στον αντίστοιχο SDN Agent.

- **SDN Agent**

- Διευθύνει τη λειτουργία RRS στην περιοχή ενός συγκεκριμένου δικτυακού παρόχου.
- Υιοθετεί τις πολιτικές RRS στο επίπεδο Hypervisor των (H)OpeNBs/OpeNAPs.
- Δημιουργεί και διαχειρίζεται τα στιγμιότυπα VeNB/VAP στους (H)OpeNBs/OpeNAPs.
- Παρακολουθεί την κατάσταση των κινητών συσκευών, (H)OpeNB/OpeNAP για ένα συγκεκριμένο δικτυακό πάροχο.
- Εγκαθιστά, παρακολουθεί και ελέγχει τα υπάρχοντα tunnels επικοινωνίας με τα άλλα δίκτυα.

- Παρακολουθεί και ελέγχει τα SLAs του συγκεκριμένου δικτυακού παρόχου, ο οποίος συναγωνίζεται με άλλους για την κατανομή φάσματος με βάση την τρέχουσα διαθεσιμότητα πόρων.

- **SDN Server**

- Διευθύνει τη λειτουργία RRS μεταξύ πολλαπλών δικτυακών παρόχων.
- Αποτελεί το σημείο αναφοράς για την πραγματοποίηση της υπηρεσίας RRS.
- Ωθεί τον SDN Agent να δημιουργήσει και να διαχειριστεί στιγμιότυπα VeNB/VAP.
- Παρακολουθεί τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα των πόρων μεταξύ των διαφορετικών δικτύων.
- Αποτελεί το σημείο αναφοράς για την εγκαθίδρυση tunnels απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών δικτύων.
- Παρακολουθεί και ελέγχει τα SLAs μεταξύ των παρόχων και ελέγχει τη διαδικασία του συναγωνισμού μεταξύ τους για την απόκτηση φάσματος.

2.3.2 Η ροή της σηματοδοσίας στη network-centric προσέγγιση

Στην υποενότητα αυτή περιγράφεται συγκεντρωτικά η ροή της σηματοδοσίας που απαιτείται μέσα στο δίκτυο για την υλοποίηση της προτεινόμενης από τον Δ. Ξενάκη και τους συνεργάτες του υπηρεσίας διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων βασισμένης σε εικονικοποίηση δικτύου (Network Virtualization - NV). Η εν λόγω σηματοδοσία ξεκινά να πραγματοποιείται για πρώτη φορά όταν μία κινητή συσκευή που είναι εγγεγραμμένη σε ένα δικτυακό πάροχο A και εξυπηρετείται από έναν eNB που ανήκει σε αυτόν μεταφέρεται σε έναν OpeNB που ανήκει σε έναν άλλο δικτυακό πάροχο B, με άλλα λόγια όταν πραγματοποιείται μία μεταπομπή (Handover - HO).

Ως πρώτο βήμα της διαδικασίας σηματοδοσίας μέσα στο δίκτυο, ο eNB του οικιακού δικτύου που εξυπηρετεί την κινητή συσκευή ζητά από αυτή να πραγματοποιήσει ένα σύνολο από προσδιορισμένες φυσικές μετρήσεις, στέλνοντάς της ένα μήνυμα διαμόρφωσης μετρήσεων "Measurement Configuration". Ως απάντηση στο μήνυμα αυτό και ως δεύτερο βήμα της σηματοδοσίας, η κινητή συσκευή αποστέλλει στον eNB τα αποτελέσματα των εν λόγω μετρήσεων και σύμφωνα με αυτά ο eNB αποφασίζει εάν απαιτείται HO σε κάποιον OpeNB (βήμα 3). Τέτοιου τύπου HOs είναι βασισμένοι στην εικονικοποίηση δικτύου, εφόσον ενδέχεται να πραγματοποιηθεί μεταφορά κινητής συσκευής ακόμα και σε σταθμό βάσης άλλου δικτυακού παρόχου, συνεπώς αναφέρονται ως NV-HOs. Η απόφαση για ενεργοποίηση ή όχι μίας NV-HO βασίζεται σε διάφορα κριτήρια που σχετίζονται με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και μπορούν να επαναπροσδιοριστούν στον οικιακό eNB από τον αντίστοιχο SDN Agent (SDN Agent Home). Αν τα κριτήρια που έχουν τεθεί για ενεργοποίηση μίας NV-HO ικανοποιούνται, τότε ο οικιακός eNB επικοινωνεί με τον SDN Agent Home προωθώντας του όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με την κινητή συσκευή, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων που αυτή πραγματοποίησε κατά την έναρξη της διαδικασίας (βήμα 4). Με τη σειρά του ο SDN Agent, διαθέτοντας σφαιρική άποψη σχετικά με την κατάσταση του δικτύου, προσδιορίζει τον OpeNB του ξένου παρόχου (πάροχος B) ο οποίος ικανοποιεί ένα σύνολο από προκαθορισμένα κριτήρια βασισμένα στην εικονικοποίηση του δικτύου

για τη λήψη απόφασης (βήμα 5). Η εν λόγω φάση λήψης της απόφασης για τον κατάλληλο OpeNB ονομάζεται NV Decision Phase.

Αφού ληφθεί η προαναφερθείσα απόφαση, ο SDN Agent Home στέλνει στον SDN Agent Host (δηλαδή στον SDN Agent του ξένου παρόχου) ένα αίτημα για πρόσβαση στον εν λόγω OpeNB, το οποίο ονομάζεται OpeNB Access Request (βήμα 6) και περιλαμβάνει την ταυτότητα του οικιακού παρόχου (δηλαδή του παρόχου A), την ταυτότητα του OpeNB που προσδιορίστηκε ως κατάλληλος καθώς και οποιαδήποτε πληροφορία σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων της κινητής συσκευής οι οποίες βρίσκονται σε εξέλιξη:

- Η ταυτότητα του οικιακού παρόχου είναι απαραίτητη καθώς απαιτείται από τον ξένο πάροχο (δηλαδή τον πάροχο B) ώστε να πιστοποιήσει ότι το εισερχόμενο αίτημα για NV-HO συνάδει με τις συμφωνίες SLA που έχουν συναφθεί μεταξύ των δύο παρόχων (βήμα 7).
- Η ταυτότητα του OpeNB είναι επίσης απαραίτητη, προκειμένου να έχει τη δυνατότητα ο SDN Agent Home να προωθήσει το OpeNB Access Request στον εν λόγω OpeNB (βήμα 8).
- Όταν ο εν λόγω OpeNB λάβει το OpeNB Access Request χρησιμοποιεί τις πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων της κινητής συσκευής που βρίσκονται σε εξέλιξη ώστε να αποφανθεί σχετικά με τη δυνατότητά του ή όχι να εξυπηρετήσει τις συνδέσεις αυτές (βήμα 9). Η συγκεκριμένη φάση της ροής σηματοδότησης επίσης βασίζεται στην εικονικοποίηση δικτύου καθώς και σε καθορισμένα σχήματα ελέγχου της αποδοχής αιτημάτων για σύνδεση και ονομάζεται NV Admission Control Phase.

Στην περίπτωση επιτυχούς αποδοχής της σύνδεσης με την κινητή συσκευή, ο OpeNB ειδοποιεί τον SDN Agent Host ότι διαθέτει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει τις συνδέσεις της κινητής συσκευής μέσω ενός μηνύματος επιβεβαίωσης "OpeNB Access ACK" (βήμα 10), ο οποίος με τη σειρά του απαντάει στον OpeNB με ένα μήνυμα "VeNB instance request" για τον οικιακό πάροχο, δηλαδή τον πάροχο A (βήμα 11). Πιο συγκεκριμένα, ο SDN Agent Host ζητά από τον OpeNB ο οποίος επιβεβαίωσε ότι μπορεί να δεχτεί την κινητή συσκευή να δημιουργήσει ένα εικονικό στιγμιότυπο VeNB μέσα στο σταθμό βάσης, το οποίο θα αφιερώσει στον οικιακό πάροχο. Όταν ο εν λόγω OpeNB δεσμεύσει το σύνολο των απαιτούμενων πόρων και δημιουργήσει τοπικά το στιγμιότυπο VeNB για τον οικιακό πάροχο, επιβεβαιώνει και τις δύο του αυτές ενέργειες στον SDN Agent Host (βήμα 12). Στη συνέχεια, ο SDN Agent Host αιτείται για την εγκαθίδρυση ενός tunnel επιπέδου δικτύου (L3 tunnel) μεταξύ του στιγμιότυπου VeNB που έχει δημιουργηθεί στον OpeNB και του δικτύου κορμού του οικιακού παρόχου, στον οποίο ταυτόχρονα επιβεβαιώνει και τη δέσμευση των πόρων που απαιτούνταν (βήματα 13-15). Το επόμενο βήμα (βήμα 16) πραγματοποιείται από τον SDN Agent Home, ο οποίος αποστέλλει στις οντότητες MME/S-GW του οικιακού παρόχου ένα αίτημα "L3 tunnel configuration request" για τη διαμόρφωση του εν λόγω tunnel, το οποίο και εγκαθιδρύεται μεταξύ των MME/S-GW του οικιακού δικτύου και του VeNB που δημιουργήθηκε στον OpeNB (βήμα 17). Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ο σκοπός του tunnel είναι η απευθείας σύνδεση του VeNB στον ξένο πάροχο με το δίκτυο κορμού του οικιακού παρόχου, σαν να επρόκειτο για eNB που ανήκε στο δίκτυό του. Περισσότερες πληροφορίες για τις τεχνικές tunneling παρουσιάζονται παρακάτω.

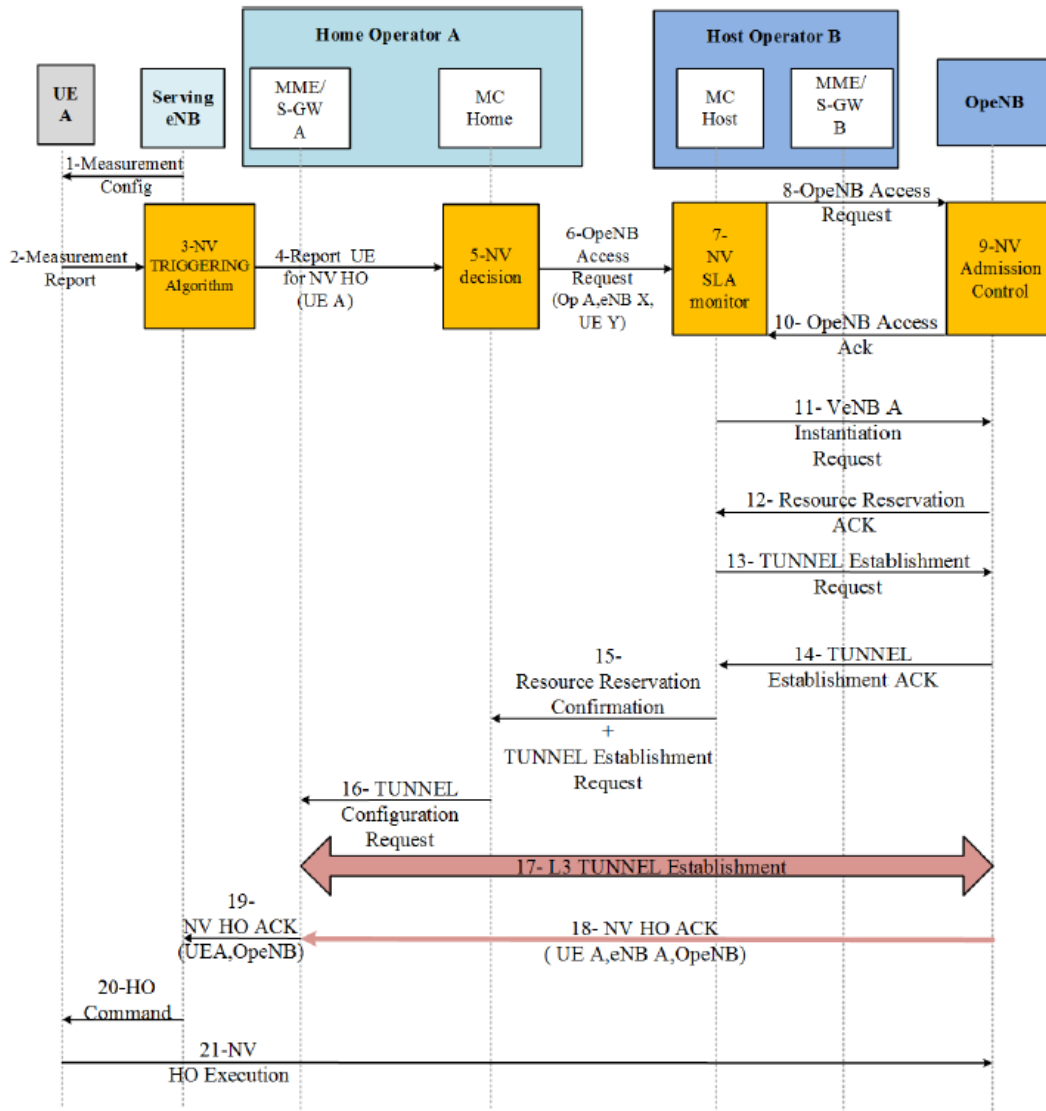
Ύστερα από την εγκαθίδρυση του L3 tunnel, ο VeNB προωθεί ένα μήνυμα "NV-HO ACK" στον eNB του οικιακού παρόχου μέσω του εν λόγω tunnel (βήματα 18 και 19), το οποίο όταν παραλάβει ο eNB αποστέλλει εντολή μεταπομπής (HO command) στην κινητή συσκευή (βήμα 20). Σημειώνεται ότι έως τη συγκεκριμένη στιγμή, η κινητή συσκευή δεν είχε λάβει κανενός είδους ενημέρωση για τη σηματοδότηση που

εκτελούνταν και για τη διεκπεραίωση των απαιτούμενων ενεργειών για τη μεταπομπή. Τέλος, η κινητή συσκευή εκτελεί τις κλασικές διαδικασίες εκτέλεσης μίας μεταπομπής προς τον OpeNB (βήμα 21), αφού θεωρεί τον VeNB που έχει εγκατασταθεί στον OpeNB σαν κάποιον eNB ο οποίος ανήκει στο δίκτυο του οικιακού του παρόχου (δηλαδή του παρόχου A).

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνικές συράγγωσης (tunneling) έχουν εξέχουσα σημασία για την υλοποίηση του προτεινόμενου και άλλων σχετικών πρωτοκόλλων, καθώς μπορούν να επιτύχουν μια ιδιωτική Point-to-Point σύνδεση μεταξύ του δικτύου κορμού του οικιακού παρόχου και του OpeNB σταθμού βάσης του ξένου παρόχου. Στην πράξη κάτι τέτοιο συνεπάγεται αφενός την προσπέλαση των εμποδίων συμβατότητας που τίθενται από την εφαρμογή διαφορετικών πρωτοκόλλων κατά μήκος των δύο δικτύων, καθώς όλα τα πακέτα δεδομένων που ανταλλάσσονται ενθυλακώνονται σε πακέτα του πρωτοκόλλου tunneling που έχει επιλεγεί, και αφετέρου η εφαρμογή τεχνικών συράγγωσης συνοδεύεται από τεχνικές ασφαλείας, όπως η αυθεντικοποίηση των επικοινωνούντων οντοτήτων πριν την εγκαθίδρυση του τούνελ. Ενδεικτικά προτείνεται η χρήση ενός πρωτοκόλλου tunneling επιπέδου δικτύου, όπως το GRE (Generic Routing Encapsulation), το οποίο προορίζεται κατεξοχήν για την ενθυλάκωση IP δεδομενογραμμάτων, ότι ακριβώς χρειάζεται στα σημερινά all-IP δίκτυα.

2.3.3 Στάδια απόφασης και ελέγχου στη ροή σηματοδοσίας της [79]

Έχοντας περιγράψει τη ροή της σηματοδοσίας της network-centric προσέγγισης, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν αναλυτικότερα οι διάφορες φάσεις της ροής σηματοδοσίας οι οποίες εισάγονται από τη μελέτη [79] για την υλοποίηση της προτεινόμενης υπηρεσίας RRS και περιγράφηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται σχηματικά η ροή σηματοδοσίας, ενώ οι κρίσιμες φάσεις της διαδικασίας αυτής φαίνονται στα μεγάλα ορθογώνια με κίτρινο χρώμα και αναλύονται παρακάτω. Στο διάγραμμα ο SDN Agent Home συμβολίζεται με MC Home και ο SDN Agent Host με MC Host.



Εικόνα 2.4: Η ροή της σηματοδότησης στο μοντέλο διαμοιρασμού ραδιο-πόρων της network-centric προσέγγισης [79]

2.3.3.1 Φάση ενεργοποίησης (NV Triggering Phase)

Η συγκεκριμένη φάση αποτελεί το τρίτο βήμα της ροής σηματοδότησης που εξελίσσεται για την εξυπηρέτηση του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων. Η φάση του NV HO Triggering αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας HO, όπως εκτελείται έως σήμερα στα δίκτυα LTE/LTE-A, όπου τιμές όπως η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στην κινητή συσκευή, η λαμβανόμενη ποιότητα σήματος στην κινητή συσκευή ή ο φόρτος της κυψέλης συγκρίνονται με σχετικές ή απόλυτες τιμές κατωφλίου (thresholds).

Η ειδοποιός διαφορά της σημερινής κλασικής διαδικασίας HO με τη φάση NV Triggering είναι ότι το σύνολο των υποψήφιων σταθμών βάσης στους οποίους δύναται να μεταπεμφθεί η κινητή συσκευή είναι εμπλουτισμένο με το σύνολο των OpeNBs που ανήκουν σε διαφορετικούς δικτυακούς παρόχους. Με βάση τη συγκεκριμένη λεπτομέρεια, ενεργοποιούνται και οι δύο τύποι HO, δηλαδή εκείνοι που στοχεύουν σε ένα σταθμό βάσης του οικιακού παρόχου (όπως στην κλασική διαδικασία HO) και

εκείνοι που στοχεύουν στους OpeNBs ενός άλλου δικτυακού παρόχου. Η επιλογή του αλγορίθμου για τη διαδικασία NV Triggering αφήνεται να πραγματοποιηθεί από τους παρόχους, έτσι ώστε να έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν τις προσωπικές τους στρατηγικές διαχείρισης του δικτύου. Στη συνέχεια προτείνονται από τους συγγραφείς δύο αλγόριθμοι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία του NV Triggering, σύμφωνα με τις προαναφερθείσες τιμές που συγκρίνονται με τιμές κατωφλίου στη σημερινή διαδικασία HO Triggering.

- Ο πρώτος αλγόριθμος που προτείνεται βασίζεται στις μετρήσεις που πραγματοποιεί η κινητή συσκευή που αφορούν στη λαμβανόμενη ποιότητα σήματος (Reference Signal Received Quality Measurements – RSRQ Measurements) από άλλους σταθμούς βάσης προκειμένου να ενεργοποιηθεί ένα NV HO από τον eNB του οικιακού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η κινητή συσκευή πραγματοποιεί τις μετρήσεις RSRQ για όλους τους σταθμούς βάσης τους οποίους μπορεί να προσεγγίσει γεωγραφικά. Σε περίπτωση που ο σταθμός βάσης με τις υψηλότερες τιμές RSRQ ανήκει στον οικιακό πάροχο, ο eNB που έως τώρα εξυπηρετούσε την κινητή συσκευή προχωράει στην κλασική διαδικασία μεταπομπής, όπως εφαρμόζεται σήμερα. Εάν αντιθέτως ο σταθμός βάσης με τις υψηλότερες τιμές RSRQ ανήκει σε διαφορετικό πάροχο ο eNB αποστέλλει αίτημα για NV HO στον SDN Agent Home, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις εν λόγω RSRQ μετρήσεις που πραγματοποίησε η κινητή συσκευή. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί επαναρυθμίζοντας την κινητή συσκευή ώστε να πραγματοποιεί τις μετρήσεις RSRQ σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων από αυτές που ανήκουν στον οικιακό πάροχο. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό στα συστήματα LTE/LTE-A καθώς ο eNB του οικιακού παρόχου υποδεικνύει στην κινητή συσκευή ένα σύνολο από συχνότητες για αναζήτηση κυψελών, ενώ επίσης οι κινητές συσκευές διαθέτουν τη δυνατότητα να σαρώνουν όλες τις διαθέσιμες ζώνες για κυψελωτές επικοινωνίες και να πραγματοποιούν μετρήσεις σε αυτές.
- Ένας δεύτερος αλγόριθμος βασίζει την ενεργοποίηση ενός NV HO στο φόρτο της κυψέλης. Πιο συγκεκριμένα, εάν ο τρέχων φόρτος της κυψέλης στην οποία ανήκει ο eNB του οικιακού δικτύου είναι χαμηλότερος από μία προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου (threshold), ο eNB κινεί την κλασική διαδικασία HO που εκτελείται σήμερα. Εάν όμως ο φόρτος είναι μεγαλύτερος από το threshold, ο eNB αναθέτει στην κινητή συσκευή να πραγματοποιήσει μετρήσεις RSRQ για όλους τους σταθμούς βάσης LTE/LTE-A οι οποίοι βρίσκονται σε εγγύτητα με αυτήν. Στη συνέχεια ο eNB ακολουθεί διαδικασία παρόμοια με εκείνη που ακολουθείται στον προηγούμενο αλγόριθμο, δηλαδή ανάλογα με το δίκτυο στο οποίο βρίσκεται ο σταθμός βάσης (το οικιακό ή κάποιου άλλου παρόχου) με τις υψηλότερες τιμές RSRQ ενεργοποιείται αντίστοιχα η κλασική διαδικασία HO ή η διαδικασία NV HO μέσω του SDN Agent Home.

2.3.3.2 Φάση απόφασης για το κατάλληλο σημείο σύνδεσης (NV Decision Phase)

Παρακάτω περιγράφεται η φάση λήψης απόφασης για τον κατάλληλο OpeNB ο οποίος μπορεί να εξυπηρετήσει την κινητή συσκευή, μία φάση που πραγματοποιείται στο πέμπτο βήμα της ροής σηματοδότησης. Συγκεκριμένα, ο SDN Agent Home αποφασίζει ποιο είναι το καταλληλότερο σημείο σύνδεσης για την κινητή συσκευή που θα μεταπεμφθεί, μέσα στο κυψελωτό δίκτυο άλλων παρόχων (NV HO). Η εν λόγω φάση πραγματοποιείται μόνο εφόσον ο οικιακός πάροχος διαθέτει προκαθορισμένες συμφωνίες SLA με άλλους παρόχους, κάτι που του επιτρέπει να συμμετάσχει στο διαμοιρασμό των ραδιο-πόρων. Για να ολοκληρωθεί η φάση NV Decision, ο eNB του

οικιακού παρόχου (ο οποίος εξυπηρετεί αυτή τη στιγμή την κινητή συσκευή) θα πρέπει να παράσχει στον SDN Agent Home όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για τη λήψη της συγκεκριμένης απόφασης. Τέτοιες πληροφορίες ενδέχεται να περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων της κινητής συσκευής οι οποίες βρίσκονται σε εξέλιξη, τις μετρήσεις οι οποίες αναφέρθηκαν και ενεργοποίησαν την όλη διαδικασία του NV HO, την κατάσταση φόρτου του eNB του οικιακού παρόχου και την ταυτότητα της κινητής συσκευής. Θεωρείται ότι η απόφαση στο στάδιο αυτό λαμβάνεται με βάση την κατάσταση RSRQ των OpeNBs τους οποίους μπορεί να προσεγγίσει η κινητή συσκευή. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη φάση του NV Triggering ο SDN Agent Home προωθεί ένα αίτημα NV HO προς τον OpeNB που συμμετείχε στις μετρήσεις που διεξήχθησαν και συγκεντρώνει το υψηλότερο επίπεδο RSRQ για την κινητή συσκευή.

2.3.3.3 Φάση παρακολούθησης SLA (SLA Monitor Phase)

Στη συγκεκριμένη φάση, ο SDN Agent Host ελέγχει εάν το αίτημα του οικιακού παρόχου συνάδει με τις προκαθορισμένες συμφωνίες SLA. Ένα επεξηγηματικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση κατά την οποία ένας τρίτος πάροχος υποδομής δικτύου, δηλαδή ο πάροχος B όπως θεωρήθηκε παραπάνω, επιτρέπει σε πολλούς δικτυακούς παρόχους να ενοικιάζουν τη δικτυακή υποδομή του για όλη τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου γεγονότος με μεγάλο ακροατήριο σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Με τον τρόπο αυτό, ένας πάροχος δύναται να βελτιώσει τη χωρητικότητα του δικτύου του αποκτώντας πρόσβαση σε επιπρόσθετους πόρους από τους σταθμούς βάσης οι οποίοι ανήκουν στον πάροχο B. Στην περίπτωση που μόλις περιγράφηκε, η φάση SLA Monitor θα πρέπει να πιστοποιεί ότι οι διαμοιραζόμενοι πόροι κατανέμονται σε κάθε πάροχο με δίκαιο τρόπο, χωρίς να υπερβαίνονται τα όρια που ορίζονται στις συμφωνίες SLA. Εάν η φάση του SLA Monitor είναι επιτυχής, ο SDN Agent Host προωθεί το αίτημα για NV HO του οικιακού παρόχου στον κατάλληλο OpeNB.

2.3.3.4 Φάση αποδοχής συνδέσεων (NV Admission Control Phase)

Στη φάση αυτή ο OpeNB που προσδιορίστηκε ως κατάλληλος για την υποδοχή της κινητής συσκευής αποφασίζει εάν πράγματι έχει τη δυνατότητα να αποδεχθεί την αίτηση για NV HO ή όχι. Ο ρόλος της φάσης NV Admission Control είναι να εκτιμά τη διαθεσιμότητα πόρων στον OpeNB και να αποφαινεται εάν εκείνος μπορεί να ικανοποιήσει την απαιτούμενη QoS από την κινητή συσκευή. Επίσης, ο OpeNB εκτιμά τις επιπτώσεις που ενδέχεται να προκληθούν από την αποδοχή της κινητής συσκευής ενός άλλου παρόχου στην απόδοση των κινητών συσκευών του δικτύου όπου ανήκει εκείνος. Η φάση του NV Admission Control μπορεί είτε να δώσει προτεραιότητα στις κινητές συσκευές του δικτύου υποδοχής της νέας σύνδεσης, είτε να χειριστεί όλες τις κινητές συσκευές με τον ίδιο τρόπο, είτε να βασιστεί στο φόρτο των κυψελών ανεξάρτητα από τις κινητές συσκευές.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πάροχοι δικτύων προσυμφωνούν μεταξύ τους για το τμήμα και το εύρος του φάσματος που μπορούν να διαθέσουν σε άλλους παρόχους, πρόκειται δηλαδή για τις προκαθορισμένες συμφωνίες SLAs. Με τον τρόπο αυτό, δηλαδή τη σύναψη συμφωνιών πριν κάποιος πάροχος χρειαστεί επιπρόσθετους πόρους, ενοικιάζεται τμήμα του φάσματος του κάθε παρόχου ανάλογα με τη διαθεσιμότητα.

3. ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΣ ΡΑΔΙΟ-ΠΟΡΩΝ ΜΕ DEVICE-CENTRIC ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1 Ανάγκη για μετάβαση σε device-centric προσέγγιση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο επισημάνθηκε η ανάγκη για Διαμοιρασμό Ραδιο-πόρων (Radio Resource Sharing - RRS) μεταξύ διαφορετικών παρόχων κινητών και ασύρματων επικοινωνιών, προκειμένου να καλυφθούν οι ολοένα αναδυόμενες ανάγκες των χρηστών, αποφεύγοντας ωστόσο τη λήψη μέτρων, όπως η πύκνωση των δικτύων μέσω της εγκατάστασης επιπρόσθετου εξοπλισμού. Μία απόφαση για αύξηση του πλήθους σταθμών βάσης, αποτελεί αφενός απειλή για τη βιωσιμότητα των παρόχων, καθώς οδηγεί σε αύξηση των CAPEX και OPEX, και αφετέρου εντείνει το βαθμό ετερογένειας και πολυπλοκότητας του δικτύου, αναδεικνύοντας παράλληλα νέα σενάρια παρεμβολών. Από την άλλη, οι περιπτώσεις όπου δικτυακοί πόροι παραμένουν αναξιοποίητοι για μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι ουκ ολίγες.

Ο συνδυασμός των δύο ανωτέρω παραγόντων, ενέπνευσε τους συγγραφείς του [79] ώστε να προτείνουν μια multi-tenant αρχιτεκτονική βασιζόμενη στην SDN τεχνολογία, η οποία εστιάζει στο δίκτυο πρόσβασης (network-centric) προκειμένου να επιτευχθεί RRS μεταξύ διαφορετικών παρόχων. Σύμφωνα με την εν λόγω αρχιτεκτονική, αν δύο πάροχοι έχουν εγκαθιδρύσει SLAs, είναι δυνατή η εξυπηρέτηση των συσκευών του ενός από σταθμούς βάσης του άλλου, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης εικονικών σταθμών βάσης (VeNBs) με τα χαρακτηριστικά αυτών του οικιακού δικτύου της συσκευής. Μία τέτοια λύση, παρά την αποτελεσματικότητα και τα πολλαπλά πλεονεκτήματά της, επιβαρύνει σημαντικά τα δίκτυα των παρόχων με επιπρόσθετη σηματοδότηση, καθώς οι αποφάσεις για έναρξη των διαδικασιών εγκαθίδρυσης, οι αιτήσεις εγκαθίδρυσης, οι αποφάσεις για αποδοχή/απόρριψη εγκαθίδρυσης και τελικά η ίδια η εγκαθίδρυση και αποδέσμευση των εικονικών σταθμών βάσης, λαμβάνουν χώρα στα δίκτυα των συνεργαζόμενων παρόχων. Κάτι τέτοιο, δίνει με τη σειρά του το έναυσμα για εξεύρεση μίας λύσης με το ίδιο τεχνολογικό υπόβαθρο, η οποία, ωστόσο, θα φροντίζει για τη μείωση της μεταδιδόμενης σηματοδότησης. Στην κατεύθυνση αυτή η προσοχή στρέφεται στις κινητές συσκευές.

Οι σημερινές κινητές συσκευές, όπως τα smartphones, τα tablets και τα laptops διαθέτουν εντυπωσιακές υπολογιστικές δυνατότητες, παρά το μικρό τους μέγεθος. Επιπλέον, δεδομένης της μικρής διάρκειας ζωής τους, η οποία κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα δύο χρόνια, πολλές φορές διαθέτουν πολύ πιο εξελιγμένο hardware σε σχέση με αυτό των σταθμών βάσης. Παράλληλα, οι κινητές συσκευές ίσως αποτελούν την καταλληλότερη συνιστώσα ενός δικτύου για τη λήψη αποφάσεων σε ζητήματα διαχείρισης ραδιο-πόρων και δικτυακών πόρων, δεδομένων των μετρήσεων που πραγματοποιούν. Με βάση τα ανώτερο δεδομένα, στο παρόν κεφάλαιο, προτείνεται μια device-centric προσέγγιση του RRS μεταξύ διαφορετικών παρόχων, σύμφωνα με την οποία δεν είναι το δίκτυο αυτό που πρέπει να προσαρμόζεται στις ανάγκες του χρήστη και να αναδιατάσσεται, αλλά η κινητή συσκευή, η οποία θα υποστηρίζει multitenancy τεχνικές και θα προσαρμόζεται ανάλογα με τα δεδομένα του δικτύου στο οποίο επιθυμεί να συνδεθεί. Με άλλα λόγια, αντί να προσαρμοστεί το δίκτυο στα δεδομένα της συσκευής, προσαρμόζεται η συσκευή με βάση τα δεδομένα του «ξένου» δικτύου. Συνεπώς, γίνεται λόγος για αυτόνομες και έξυπνες συσκευές, στις οποίες το PHY επίπεδο είναι αποκομμένο από τις εφαρμογές προκειμένου να υποστηρίζεται η δημιουργία πολλαπλών στιγμιότυπων, καθένα από τα οποία θα δημιουργείται κατ' απαίτηση και θα «υποδύεται» μέσα σε ένα ξένο δίκτυο ότι ανήκει σε αυτό. Μία τέτοια συσκευή θα μπορούσε να ονομαστεί virtual UE (VUE).

Με βάση τη νέα αυτή προσέγγιση, το σημείο απόφασης μετατοπίζεται από το σταθμό βάσης στην κινητή συσκευή, καθώς η συσκευή θα είναι αυτή που με κριτήριο τις μετρήσεις της, αλλά και πληροφορίες που τις προσφέρονται από το δίκτυο, θα λαμβάνει την απόφαση για την εξυπηρέτηση της από το σταθμό βάσης, κάποιου άλλου παρόχου.

Παρόλα ταύτα, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προκύπτει από την εφαρμογή μίας τέτοιας αρχιτεκτονικής λύσης, δεν είναι η μείωση σηματοδοσίας και εμπλοκής του δικτύου στις διαδικασίες RRS, αλλά η δυνατότητα εγκαθίδρυσης παράλληλων συνδέσεων από την κινητή συσκευή, καθεμία από τις οποίες μπορεί να εγκαθιδρύεται στο δίκτυο διαφορετικού παρόχου και να εξυπηρετεί διαφορετικού τύπου κίνηση. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε το επόμενο σενάριο:

Δεδομένου ενός UE με οικιακό δίκτυο το A, είναι εφικτή η εγκατάσταση ενός VUE1, το οποίο θα εγκαθιδρύει σύνδεση με έναν σταθμό βάσης eNB1 του παρόχου B για κίνηση τύπου VoIP, ενός VUE2, για την εγκαθίδρυση σύνδεσης με έναν σταθμό βάσης eNB2 του παρόχου Γ για live streaming, ενώ παράλληλα θα διατηρεί τη σύνδεση με το οικιακό του δίκτυο αν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Επιπρόσθετα, μία τέτοια ικανότητα διατήρησης παράλληλων συνδέσεων, οι οποίες έχουν ως άκρα διαφορετικά VUEs, δίνει τη δυνατότητα για διαχωρισμό της uplink και της downlink κίνησης σε διαφορετικές συνδέσεις. Για παράδειγμα, καθίσταται εφικτή η λήψη της downlink κίνησης στο οικιακό δίκτυο, ενώ η uplink κίνηση μπορεί να στέλνεται μέσω του «ξένου» δικτύου στο οποίο έχει συνδεθεί το UE.

Τελικά, μία device-centric προσέγγιση, όπως αυτή προτείνεται στην παρούσα ενότητα, φέρνει ένα βήμα πιο κοντά στην πραγματικότητα την ιδέα του διαμοιρασμού ραδιο-πόρων, όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών παρόχων, αλλά και μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, με το RRS να προσφέρεται ως μία over-the-top υπηρεσία, η οποία θα παρέχεται από κάποιον «τρίτο» πάροχο SDN υπηρεσιών πελάτη του οποίου θα αποτελεί ο κάτοχος της κινητής συσκευής, προκειμένου να του παρέχεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης από δίκτυα «ξένων» παρόχων.

3.2 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου για τη device-centric προσέγγιση

Έχοντας παρουσιάσει την αναγκαιότητα για τη διαμόρφωση μίας device-centric προσέγγισης κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί στη συνέχεια η προτεινόμενη δομή που θεωρείται ότι πρέπει να ακολουθήσει η αρχιτεκτονική του δικτύου για την υλοποίηση της υπηρεσίας του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων με device-centric προσέγγιση. Η εν λόγω δομή διαφέρει σε αρκετά σημεία από την αντίστοιχη που παρουσιάστηκε στην [79], κυρίως ως προς τα αρχιτεκτονικά στοιχεία που θα διαθέτει.

Ως πρώτο βήμα θεωρείται ένα μοντέλο της ήδη υπάρχουσας αρχιτεκτονικής, το οποίο δε διαφέρει από την προσέγγιση [79]. Αποτελείται δηλαδή από ένα κλασικό σύστημα μακροκυψελών LTE-A, ένα σύστημα μικρών κυψελών LTE-A, ένα σύστημα Wi-Fi και ένα μεμονωμένο ιδιωτικό AP, το οποίο δεν ανήκει σε κάποιο δίκτυο, όπως αναπαραστάθηκε στην εικόνα 2.2. Το σύστημα μακροκυψελών LTE-A αλλά και το σύστημα μικρών κυψελών LTE-A αποτελούνται, όπως αναφέρθηκε στην [79], από το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN το οποίο περιλαμβάνει έναν αριθμό από σταθμούς βάσης (H)eNBs (μεγαλύτερους για το σύστημα μακροκυψελών και μικρότερους για το σύστημα μικρών κυψελών), με HeNBs να συμβολίζει τους eNBs του οικιακού δικτύου κάθε συνδρομητή, δηλαδή του δικτύου με το οποίο ο συνδρομητής διαθέτει συμβόλαιο παροχής υπηρεσιών. Αποτελούνται επίσης και από το δίκτυο κορμού, το οποίο απαρτίζεται από οντότητες MME, S-GWs και P-GW με τις λειτουργικότητες που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και όπως αναφέρονται στην [79]. Αναφορικά

με το Wi-Fi σύστημα, το δίκτυο πρόσβασης του συνίσταται από έναν αριθμό Wi-Fi Access Points (APs) ενώ το δίκτυο κορμού του περιλαμβάνει έναν αριθμό από Wi-Fi Access Gateways (WAGs). Στην περίπτωση του AP που δεν ανήκει σε κάποιο δίκτυο Wi-Fi αλλά είναι ιδιωτικό (για παράδειγμα εγκατεστημένο από κάποιο τερματικό χρήστη), δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη WAG, καθώς το μεμονωμένο αυτό AP συνδέεται απευθείας στο Διαδίκτυο. Έως το σημείο αυτό, το μοντέλο που θεωρείται είναι το ίδιο με το μοντέλο ενός σημερινού συστήματος κινητών επικοινωνιών που θεωρήθηκε στην [79]. Και εδώ όμως απαιτούνται κάποια ακόμη νέα αρχιτεκτονικά στοιχεία και λειτουργικότητες που ξεφεύγουν από τη δομή της αρχιτεκτονικής των συστημάτων LTE-A και Wi-Fi έτσι ώστε να υποστηριχθεί η προτεινόμενη ιδέα του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων για τα συστήματα 5^{ης} γενιάς, τα οποία είναι διαφοροποιημένα από εκείνα που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω μελέτη. Παρακάτω περιγράφονται οι αρχιτεκτονικές βελτιώσεις που απαιτούνται για τη device-centric προσέγγιση και δίνεται μία σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής που θα προκύψει προσθέτοντας τα νέα στοιχεία και λειτουργικότητες που θα υποστηρίξουν δυνατότητα RRS μέσω της προσέγγισης αυτής.

Η πρώτη αρχιτεκτονική εξέλιξη που εισάγεται είναι ο εξοπλισμός των κινητών συσκευών με δυνατότητες τεχνολογίας SDN, έτσι ώστε μέσω κατάλληλης προσαρμογής να μπορούν να συνδέονται σε διαφορετικούς παρόχους την ίδια στιγμή. Ο νέος αυτός τύπος κινητών συσκευών, οι οποίες αναφέρονται ως OpenUEs, έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν το φυσικό τους επίπεδο από τα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο εισάγεται ένα επιπρόσθετο επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλων, το οποίο καλείται Hypervisor επίπεδο. Το εν λόγω επίπεδο παρεμβάλλεται ανάμεσα στο φυσικό επίπεδο και στα ανώτερα του και εξυπηρετεί τους UEs ώστε να εικονικοποιήσουν τον εαυτό τους. Προκειμένου να μπορεί να λειτουργήσει σωστά το επίπεδο του Hypervisor, εισάγεται μία επιπλέον δυνατότητα στους UEs. Πρόκειται για τη δυνατότητα να δημιουργούν πολλαπλά στιγμιότυπα λογισμικού από το δεύτερο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων τους και πάνω. Κάθε τέτοιο στιγμιότυπο ονομάζεται εικονικό UE (virtual UE - VUE), και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει τη λειτουργικότητα ενός πραγματικού UE ο οποίος θα μπορεί να συνδέεται ταυτόχρονα σε διαφορετικό δίκτυο.

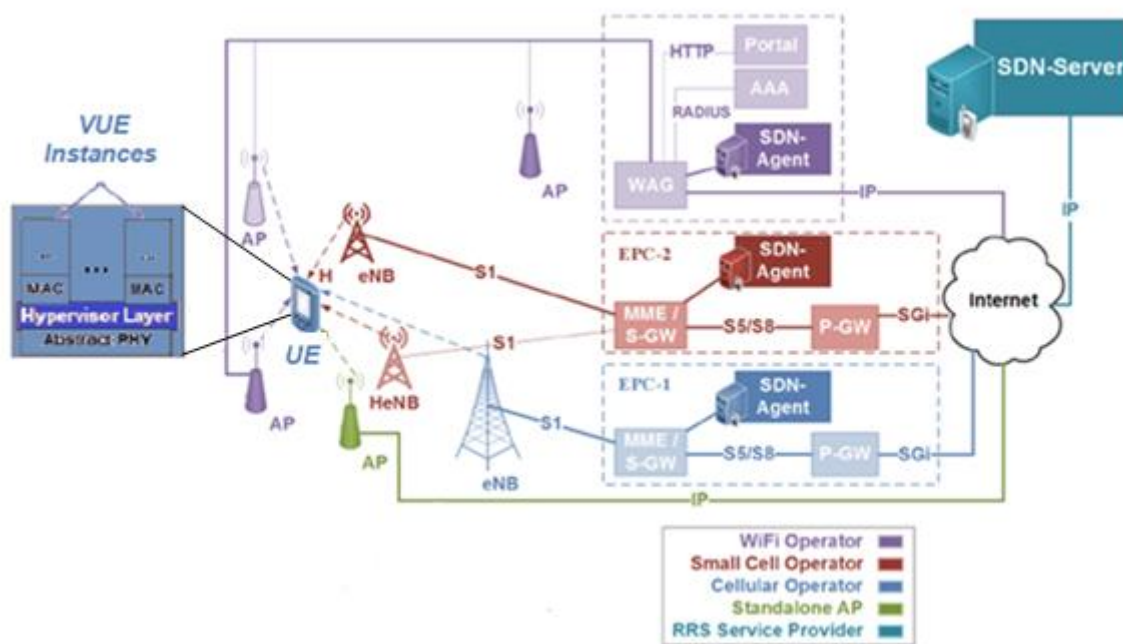
Επίσης, στη device-centric προσέγγιση του RRS είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός SDN Agent στο δίκτυο κάθε παρόχου, όπως ακριβώς έχει προταθεί και στην [79]. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πάροχος ο οποίος επιθυμεί να συμμετάσχει στο διαμοιρασμό των δικτυακών πόρων με άλλους παρόχους θα πρέπει να είναι εξοπλισμένος με έναν SDN Agent στο τμήμα του δικτύου κορμού του. Ο SDN Agent είναι επιφορτισμένος με τη διατήρηση μίας σφαιρικής εικόνας της κατάστασης του δικτύου πρόσβασης του δικτύου. Κάτι τέτοιο μπορεί να το επιτύχει μέσω της απόκτησης μετρήσεων της ποιότητας του σήματος που πραγματοποιεί η κινητή συσκευή, καθώς και μετρήσεων του φόρτου των κυψελών από την υποδομή του δικτύου των σταθμών βάσης. Η χρησιμότητα των εν λόγω μετρήσεων είναι φανερή, αφού ο SDN Agent αποκτώντας τέτοιου είδους γνώση έχει τη δυνατότητα να προβλέπει ανά πάσα στιγμή τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα των ραδιοπόρων στο σύνολο της υποδομής του δικτύου πρόσβασης.

Σε αντιδιαστολή με την πρόταση στην [79], στη device-centric προσέγγιση οι σταθμοί βάσης των διάφορων τύπων δικτύων (συστήματα μακροκυψελών LTE-A, συστήματα μικρών κυψελών LTE-A, συστήματα Wi-Fi και μεμονωμένα AP) δεν εξοπλίζονται με δυνατότητες τεχνολογίας SDN, ούτε και εισάγεται επίπεδο Hypervisor στη στοίβα πρωτοκόλλων των σταθμών βάσης.

Το τελευταίο στοιχείο που είναι απαραίτητο να προστεθεί και στη device-centric προσέγγιση είναι ο SDN Server. Παρά το γεγονός ότι κάθε SDN Agent είναι ελεγκτής

στο δίκτυο όπου είναι εγκατεστημένος, ο SDN Server, όπως και στην [79], είναι υπεύθυνος για την υλοποίηση της δυνατότητας RRS ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους δικτύων από τα οποία αποτελείται το 5G δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ο SDN Server συλλέγει πληροφορίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα πόρων ανά πάροχο δικτύου, εξυπηρετεί την εκτέλεση όλων των απαραίτητων λειτουργιών για τις χρεώσεις των συνδρομητών και επίσης ελέγχει τις επιπτώσεις που ενδέχεται να προκύψουν από τις υπογεγραμμένες συμφωνίες για παροχή υπηρεσιών μεταξύ των παρόχων (SLAs). Τέλος, ο SDN Server μπορεί επιπλέον να παίξει το ρόλο του ρυθμιστή για τις χρεώσεις των συνδρομητών οι συσκευές των οποίων επωφελούνται από το διαμοιρασμό των πόρων, ώστε να μην υπάρξει καμία παρατυπία από οποιαδήποτε πλευρά.

Παρακάτω αναπαρίσταται σχηματικά η μορφή της αρχιτεκτονικής που προτείνεται να διαμορφωθεί σύμφωνα με τα νέα στοιχεία και λειτουργίες που απαιτείται να προστεθούν προκειμένου να υλοποιηθεί η υπηρεσία RRS από την πλευρά της συσκευής.



Εικόνα 3.1: Η δομή της αρχιτεκτονικής όπως προτείνεται να διαμορφωθεί με προσέγγιση από την πλευρά της συσκευής

Συνοψίζοντας την περιγραφή της αρχιτεκτονικής που θα υποστηρίξει τη δυνατότητα RRS με device-centric προσέγγιση, αναφέρουμε συγκεντρωτικά τα βασικά στοιχεία που απαιτείται να προστεθούν μαζί με τις απαραίτητες λειτουργικότητες που πρέπει να διαθέτουν :

- **OpenUE**

- Διαθέτει δυνατότητες SDN και συνεπώς δυνατότητα σύνδεσης σε διαφορετικούς παρόχους ταυτόχρονα.
- Υλοποιεί ένα επίπεδο Hypervisor το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του φυσικού επιπέδου της στοίβας πρωτοκόλλων UE και των ανωτέρων του.
- Φιλοξενεί πολλαπλά στιγμιότυπα λογισμικού VUE.
- Συλλέγει μετρήσεις από τις κινητές συσκευές και αξιολογεί την κατάσταση στην οποία βρίσκονται.

- Υποστηρίζει λογικές διεπαφές μεταξύ των εικονικοποιημένων VUEs και των σταθμών βάσης που υποδέχονται τα εν λόγω στιγμιότυπα.

- **SDN Agent**

- Διευθύνει τη λειτουργία RRS στην περιοχή ενός συγκεκριμένου δικτυακού παρόχου.
- Υιοθετεί τις πολιτικές RRS στο επίπεδο Hypervisor των (H)OpeNBs/OpeNAPs.
- Παρακολουθεί την κατάσταση των κινητών συσκευών, για ένα συγκεκριμένο δικτυακό πάροχο.
- Παρακολουθεί και ελέγχει τα SLAs του συγκεκριμένου δικτυακού παρόχου, ο οποίος συναγωνίζεται με άλλους για την κατανομή φάσματος με βάση την τρέχουσα διαθεσιμότητα πόρων.

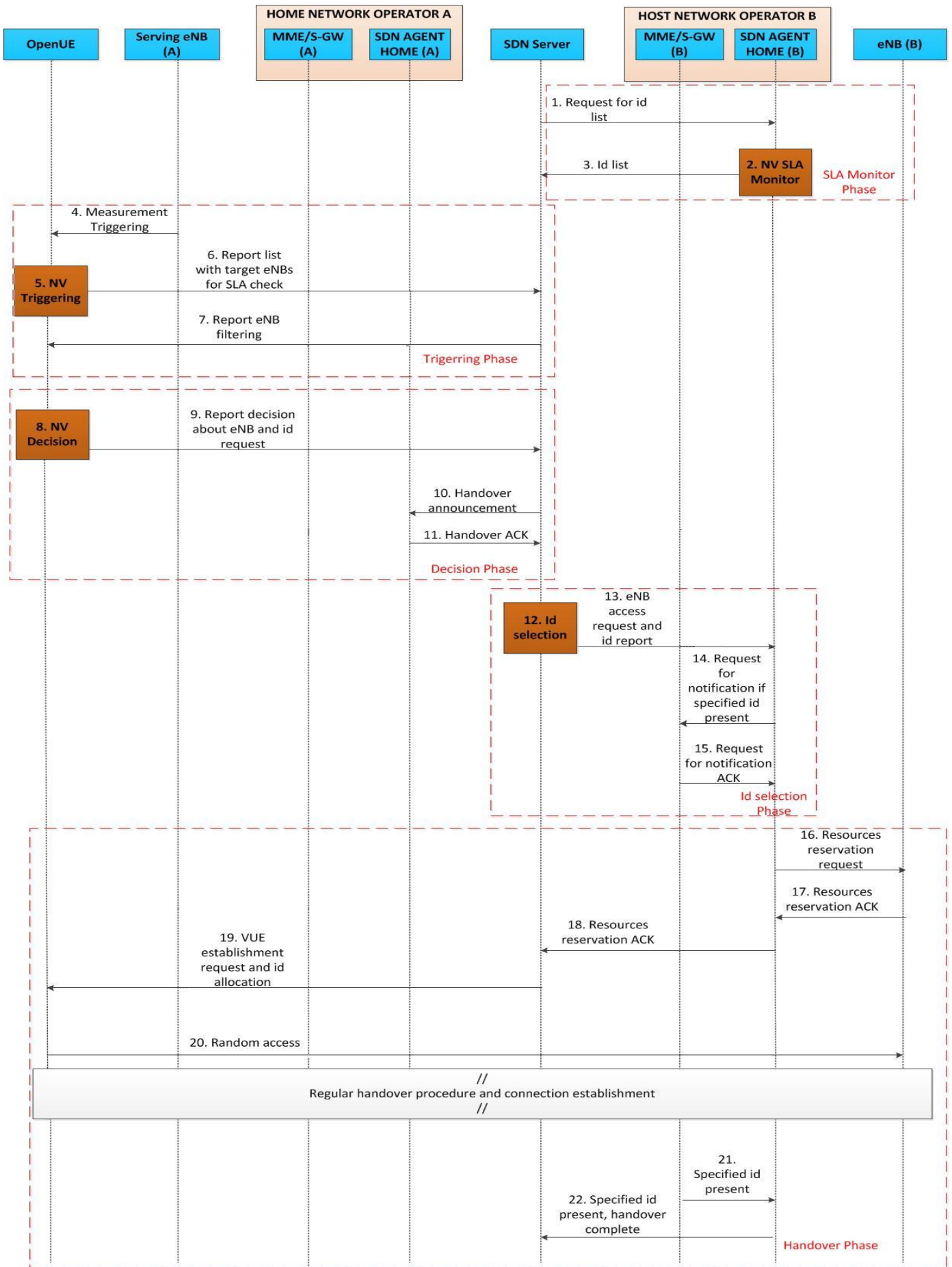
- **SDN Server**

- Διευθύνει τη λειτουργία RRS μεταξύ πολλαπλών δικτυακών παρόχων.
- Αποτελεί το σημείο αναφοράς για την πραγματοποίηση της υπηρεσίας RRS.
- Παρακολουθεί τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα των πόρων μεταξύ των διαφορετικών δικτύων.
- Παρακολουθεί και ελέγχει τα SLAs μεταξύ των παρόχων και ελέγχει τη διαδικασία του συναγωνισμού μεταξύ τους για την απόκτηση φάσματος.
- Εκχωρεί μοναδικό αναγνωριστικό στην κινητή συσκευή όταν εκείνη εισέρχεται σε νέο δίκτυο.
- Αποτελεί το σημείο αναφοράς για την πραγματοποίηση της χρέωσης των δικτυακών παρόχων αλλά και των συνδρομητών.

3.3 Ροή σηματοδοσίας στη device-centric προσέγγιση

Στην υποενότητα αυτή περιγράφεται συγκεντρωτικά η ροή της σηματοδοσίας που προτείνεται να λαμβάνει χώρα για την υλοποίηση της υπηρεσίας διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων μέσω της device-centric προσέγγισης η οποία εισάγεται στο παρόν κεφάλαιο. Η εν λόγω σηματοδοσία ξεκινά να πραγματοποιείται για πρώτη φορά όταν μία κινητή συσκευή που είναι εγγεγραμμένη σε ένα δικτυακό πάροχο A και εξυπηρετείται από έναν eNB που ανήκει σε αυτόν κρίνει απαραίτητο να αποκτήσει σύνδεση με κάποιον eNB ο οποίος ανήκει σε έναν άλλο δικτυακό πάροχο B. Στη device-centric προσέγγιση, κυρίαρχης σημασίας είναι ο ρόλος του SDN Server, ο οποίος αποτελεί το σημείο αναφοράς για την υλοποίηση της υπηρεσίας RRS και λόγω της συνολικής εικόνας των επιμέρους δικτύων από τα οποία αποτελείται το δίκτυο, διαθέτει αυξημένες αρμοδιότητες. Μία από τις κύριες αρμοδιότητές του είναι η εκχώρηση ενός μοναδικού αναγνωριστικού-ταυτότητας (id) στην κινητή συσκευή όταν αυτή εισέρχεται σε ξένο δίκτυο, επιλέγοντας από ένα σύνολο id που διαθέτει για κάθε διαφορετική περιοχή της υποδομής του δικτύου (Tracking Area -TA).

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται σχηματικά η ροή σηματοδότησης όπως πρόκειται να περιγραφεί στη συνέχεια. Τα βήματα της εν λόγω ροής είναι αριθμημένα, ενώ οι κρίσιμες φάσεις της διαδικασίας αυτής διακρίνονται στα ορθογώνια με καφέ χρώμα και θα αναλυθούν στην επόμενη υποενότητα.



Εικόνα 3.2: Η προτεινόμενη ροή σηματοδότησης για τη device-centric προσέγγιση

Ως πρώτο βήμα της διαδικασίας σηματοδότησης μέσα στο δίκτυο, SDN Server ζητάει από τον SDN Agent κάθε δικτύου να του αποστείλει μία λίστα με ids τα οποία διαθέτει για εκχώρηση σε νέες κινητές συσκευές που εισέρχονται στο δίκτυό του. Διατηρώντας τις εν λόγω λίστες, ο SDN Server είναι πλέον σε θέση να αναλαμβάνει εκείνος την εκχώρηση ids στα UEs αντί για τον εκάστοτε SDN Agent κάθε φορά (βήμα 1). Ως απάντηση στο αίτημα του SDN Server, ο κάθε SDN Agent πραγματοποιεί διαδικασία NV SLA Monitor ώστε να ελέγξει τις συμφωνίες που έχει συνάψει με άλλους παρόχους (βήμα 2) και στη συνέχεια αποστέλλει τη λίστα με τα ids (βήμα 3). Όταν κριθεί απαραίτητο, ο eNB του οικιακού δικτύου που εξυπηρετεί την κινητή συσκευή ζητά από αυτή να πραγματοποιήσει ένα σύνολο από προσδιορισμένες φυσικές μετρήσεις, στέλνοντάς της ένα μήνυμα "Measurement Triggering" (βήμα 4). Η κινητή συσκευή στη συνέχεια προχωράει σε διαδικασία μετρήσεων και με βάση τα αποτελέσματα αυτών αποφασίζει εάν χρειάζεται να δημιουργήσει σύνδεση με κάποιον άλλο σταθμό βάσης (βήμα 5). Εάν μία τέτοια σύνδεση κριθεί απαραίτητη, η κινητή συσκευή αποστέλλει μία λίστα με όλους τους eNBs που κρίνει κατάλληλους για να την υποδεχθούν στον SDN Server (βήμα 6), από τον οποίο ζητάει να ελέγξει με ποιους από τους εν λόγω eNBs υπάρχει κάποια SLA με το δίκτυο A στο οποίο ανήκει η συσκευή. Ως απάντηση στο αίτημα της συσκευής, ο SDN Server προχωράει σε διαδικασία filtering (φιλτραρίσματος) και αποστέλλει τη λίστα των eNBs με τους οποίους ο πάροχος δικτύου A στον οποίο είναι εγγεγραμμένη η κινητή συσκευή έχει υπογεγραμμένη κάποια SLA (βήμα 7). Η εν λόγω λίστα είναι δυνατόν να επιστρέφεται σε μορφή ενός πίνακα στον οποίο θα είναι καταγεγραμμένοι όλοι οι eNBs τους οποίους ανέφερε η κινητή συσκευή στο βήμα 6 καθώς και μία ένδειξη αντίστοιχη στον καθένα από αυτούς (για παράδειγμα ένα bit το οποίο θα παίρνει τις τιμές 0 ή 1) η οποία θα υποδεικνύει εάν υπάρχει ή όχι κάποια SLA μεταξύ του παρόχου A και του παρόχου στον οποίο ανήκει ο κάθε eNB. Η κινητή συσκευή στη συνέχεια, διαθέτοντας τις πληροφορίες σχετικά με τις SLAs είναι σε θέση να επιλέξει από την αρχική λίστα την οποία έστειλε στον SDN Server στο βήμα 6 τον eNB ο οποίος είναι καταλληλότερος για εκείνη και του οποίου το δίκτυο έχει υπογεγραμμένη συμφωνία με το δίκτυο της συσκευής. Η εν λόγω φάση λήψης της απόφασης για τον κατάλληλο eNB ονομάζεται NV Decision Phase (βήμα 8). Μετά τη λήψη της απόφασης για τον eNB που θα φιλοξενήσει το κινητό, ο UE αναφέρει την απόφασή του στον SDN Server γνωστοποιώντας του τον επιλεγμένο eNB και ζητώντας του ένα προσωρινό id με το οποίο θα εισέλθει στο νέο δίκτυο (βήμα 9). Στο σημείο αυτό ο SDN Server ενημερώνει τον SDN Agent Home για το γεγονός ότι πρόκειται να πραγματοποιηθεί μεταπομπή (βήμα 10) και εκείνος αποκρίνεται αντίστοιχα (βήμα 11). Σημειώνεται ότι ο SDN Agent Home δε γνώριζε τίποτα για τη διαδικασία μεταπομπής της συσκευής και ενημερώθηκε μόνο λίγο πριν αυτή πραγματοποιηθεί. Δηλαδή το οικιακό δίκτυο διατηρείται εκτός της διαδικασίας του HO και απλώς λαμβάνει μία ενημέρωση την κατάλληλη χρονική στιγμή. Στη συνέχεια, ο SDN Server προχωράει στη φάση Id Selection (βήμα 12), δηλαδή επιλέγει το id που θα εκχωρηθεί στην κινητή συσκευή και κατόπιν στέλνει στον SDN Agent Host αίτημα πρόσβασης στον επιλεγμένο eNB το οποίο περιλαμβάνει το id που επιλέχθηκε για την κινητή συσκευή και την ταυτότητα του eNB που προσδιορίστηκε ως κατάλληλος (βήμα 13).

- Το id που επιλέχθηκε για την κινητή συσκευή είναι απαραίτητο, καθώς με τη λήψη του ο SDN Agent Host αναγνωρίζει ότι πρόκειται για δικό του id και άρα μπορεί να είναι σίγουρος ότι το εν λόγω id στάλθηκε από τον ίδιο στον SDN Server κατά τη διαδικασία NV SLA Monitor όπου ελέγχθηκαν οι συμφωνίες με άλλους παρόχους, πιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την ταυτότητα του οικιακού παρόχου.
- Η ταυτότητα του eNB είναι επίσης απαραίτητη, προκειμένου να έχει τη δυνατότητα ο SDN Agent Host να προωθήσει το eNB Access Request στον εν

λόγω eNB και να του ζητήσει τη δέσμευση των απαιτούμενων ραδιοπόρων για την κινητή συσκευή (βήμα 16).

Πριν πραγματοποιηθεί αίτημα για τη δέσμευση ραδιοπόρων στον eNB, ο SDN Agent Host ζητάει από την MME του δικτύου του να τον ειδοποιήσει σε περίπτωση που εκείνη εντοπίσει το προαναφερθέν id στο δίκτυο (βήμα 14) και εκείνη αποκρίνεται με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης (βήμα 15). Στη συνέχεια και αφού οι πόροι δεσμευτούν ο eNB αποστέλλει μήνυμα επιβεβαίωσης της δέσμευσής τους στον SDN Agent Host (βήμα 17) το οποίο προωθείται και στον SDN Server (βήμα 18). Εκείνος με τη σειρά του στέλνει στην κινητή συσκευή ένα αίτημα δημιουργίας ενός εικονικού στιγμιότυπου VUE του εαυτού της ώστε να δημιουργηθεί η νέα σύνδεση, ενώ παράλληλα της γνωστοποιεί και το id το οποίο της έχει εκχωρηθεί για τη σύνδεση στο δίκτυο B (βήμα 19). Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται το αίτημα για σύνδεση από τον UE στον eNB του ξένου δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει και το UE id (βήμα 20) που είναι απαραίτητο στον eNB ώστε να αναγνωρίσει τον UE ως δικό του UE, δηλαδή εγγεγραμμένο στο δίκτυό του. Στη συνέχεια ακολουθεί η συνήθης διαδικασία μεταπομπής που ακολουθείται στα σημερινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών προκειμένου να εγκατασταθεί η νέα σύνδεση μεταξύ του UE και του νέου eNB. Τα τελευταία βήματα στη ροή σηματοδότησης της device-centric προσέγγισης ύστερα από την εγκαθίδρυση της σύνδεσης είναι η ενημέρωση του SDN Agent Host από την αντίστοιχη MME ότι εντοπίστηκε στο δίκτυο κινητή συσκευή με το δεδομένο id (βήμα 21), ο οποίος με τη σειρά του προωθεί την ειδοποίηση στον SDN Server και τον ενημερώνει ότι η διαδικασία της μεταπομπής έχει ολοκληρωθεί (βήμα 22).

Η παραπάνω προτεινόμενη ροή σηματοδότησης καλύπτει όλες τις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη. Όσον αφορά στις διαδικασίες χρέωσης, αυτές θα πραγματοποιούνται στον SDN Server, ο οποίος έχοντας λάβει την ενημέρωση από τον SDN Agent Host ότι εντοπίστηκε στο δίκτυό του το id που εκχωρήθηκε στον UE θα πιστοποιεί την πραγματοποίηση της μεταπομπής και θα μπορεί να χρεώνει τόσο τους παρόχους όσο και το συνδρομητή δίκαια και χωρίς κινδύνους παρατυπιών.

3.4 Βασικά στάδια σηματοδότησης της device-centric προσέγγισης

Έχοντας περιγράψει τη ροή σηματοδότησης που προτείνεται για τη device-centric προσέγγιση κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν στη συνέχεια αναλυτικότερα οι σημαντικότερες φάσεις λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνονται στην εν λόγω ροή σηματοδότησης.

3.4.1 Φάση παρακολούθησης SLA (NV SLA Monitor Phase)

Στη συγκεκριμένη φάση ο SDN Agent Host καλείται να αποστείλει στον SDN Server μία λίστα με ids που ορίζει ο ίδιος για το δίκτυό του και τα οποία μπορούν να κατανεμηθούν ως προσωρινά αναγνωριστικά σε κινητές συσκευές. Ο SDN Server θα διατηρήσει την εν λόγω λίστα ώστε να έχει τη δυνατότητα να εκχωρεί ο ίδιος ids στα UEs αντί να χρειάζεται να τα εκχωρεί ο SDN Agent Host σε κάθε μεταπομπή. Για να δημιουργηθεί και να αποσταλεί η εν λόγω λίστα, ο SDN Agent Host πραγματοποιεί πρώτα έναν έλεγχο των συναφθεισών συμφωνιών του με τους άλλους παρόχους. Όταν αργότερα εμφανιστεί κάποιο από τα ids της λίστας στο δίκτυό του, θα γνωρίζει ότι ο ίδιος το γνωστοποίησε στον SDN Server, και με αυτό τον τρόπο θα μπορεί να πιστοποιεί την ταυτότητα του οικιακού παρόχου του UE.

3.4.2 Φάση ενεργοποίησης (NV Triggering Phase)

Η συγκεκριμένη φάση αποτελεί το πέμπτο βήμα της ροής σηματοδότησης που εξελίσσεται για την εξυπηρέτηση του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων και εκτελείται από την κινητή συσκευή. Ουσιαστικά στη φάση αυτή, ο UE αποφασίζει εάν είναι απαραίτητο να πραγματοποιήσει μία νέα σύνδεση σε έναν άλλο σταθμό βάσης ή όχι, προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες του χρήστη. Η φάση του NV Triggering αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας δημιουργίας νέας σύνδεσης, όπου τιμές όπως η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στην κινητή συσκευή, η λαμβανόμενη ποιότητα σήματος στην κινητή συσκευή ή ο φόρτος της κυψέλης συγκρίνονται με σχετικές ή απόλυτες τιμές κατωφλίου (thresholds). Η επιλογή του αλγόριθμου για τη διαδικασία NV Triggering αφήνεται να πραγματοποιηθεί από τους παρόχους, έτσι ώστε να έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν τις προσωπικές τους στρατηγικές διαχείρισης του δικτύου. Δύο πιθανοί αλγόριθμοι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία του NV Triggering είναι εκείνοι που προτάθηκαν στην ερευνητική εργασία [79] και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Και οι δύο εν λόγω αλγόριθμοι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο πρώτος αλγόριθμος που προτάθηκε στην [79] για τη διαδικασία του NV Triggering και βασίζεται στις μετρήσεις RSRQ αναμένεται να επιτύχει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση στις κινητές συσκευές, αφού τους επιτρέπει να συνδεθούν στο σταθμό βάσης που τους παρέχει τις βέλτιστες συνθήκες ποιότητας σήματος, ανεξάρτητα από το δίκτυο στο οποίο ανήκει. Ταυτόχρονα όμως κάτι τέτοιο ενδέχεται να προκαλέσει αυξημένα κόστη ενοικίασης στον οικιακό πάροχο ή υπερβολική μεταφορά κίνησης σε δίκτυο άλλου παρόχου, στην περίπτωση όπου η ποιότητα σήματος του δικτύου ενός γειτονικού παρόχου είναι συνεχώς καλύτερη από αυτή του οικιακού. Όσον αφορά στο δεύτερο αλγόριθμο, ο οποίος βασίζεται στο φόρτο της κυψέλης, αναμένεται να αναπληρώσει τα μειονεκτήματα του πρώτου, εφόσον πραγματοποιεί νέα σύνδεση μόνο στην περίπτωση όπου ο φόρτος στον eNB του οικιακού παρόχου είναι υπερβολικός. Συνεπώς, θα υπάρξει μείωση του αριθμού των νέων συνδέσεων και των εξόδων ενοικίασης για τον οικιακό πάροχο, όμως ενδέχεται η ποιότητα του σήματος να μην ικανοποιεί την κινητή συσκευή. Για τους προαναφερθέντες λόγους, παρακάτω προτείνεται ένας τρίτος αλγόριθμος για τη διαδικασία του NV Triggering, ο οποίος συνυπολογίζει τα αποτελέσματα διαφορετικών ειδών μετρήσεων, αντί να βασίζεται σε ένα μόνο είδος μέτρησης.

Ο τρίτος αλγόριθμος που προτείνεται χρησιμοποιεί και τις δύο αλγοριθμικές προσεγγίσεις που προτάθηκαν στην [79]. Πιο συγκεκριμένα, βασικότερο κριτήριο για τη εγκατάσταση μίας νέας σύνδεσης αποτελεί ο φόρτος της κυψέλης του eNB του οικιακού δικτύου. Παρ' όλα αυτά, λαμβάνεται σημαντική μέριμνα για την ποιότητα του σήματος καθώς τίθεται ένα threshold για τις τιμές των μετρήσεων RSRQ, έτσι ώστε εάν οι μετρήσεις αυτές πέσουν κάτω από το όριο που έχει τεθεί, ο eNB να θεωρείται ακατάλληλος για την εξυπηρέτηση της συγκεκριμένης κινητής συσκευής. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη ο φόρτος της κυψέλης, χωρίς όμως να αγνοείται η ποιότητα του σήματος που θα λαμβάνει η κινητή συσκευή μετά τη δημιουργία της νέας σύνδεσης.

3.4.3 Φάση απόφασης για το κατάλληλο σημείο σύνδεσης (NV Decision Phase)

Παρακάτω περιγράφεται η φάση λήψης απόφασης για τον κατάλληλο eNB ο οποίος μπορεί να εξυπηρετήσει την κινητή συσκευή, μία φάση που πραγματοποιείται στο πέμπτο βήμα της ροής σηματοδότησης. Συγκεκριμένα, η κινητή συσκευή αποφασίζει ποιο είναι το καταλληλότερο σημείο σύνδεσης για εκείνη μέσα στο κυψελωτό δίκτυο άλλων παρόχων, αφού έχει λάβει από τον SDN Server μία συγκεντρωτική λίστα με τους

eNBs τους οποίους έχει κρίνει κατάλληλους με βάση την προηγούμενη φάση και των οποίων οι πάροχοι διαθέτουν κάποια SLA με τον οικιακό πάροχο. Συνεπώς η εν λόγω φάση πραγματοποιείται μόνο εφόσον ο οικιακός πάροχος διαθέτει προκαθορισμένες συμφωνίες SLA με άλλους παρόχους, κάτι που του επιτρέπει να συμμετάσχει στο διαμοιρασμό των ραδιο-πόρων. Επιπλέον, στη φάση αυτή συμπεριλαμβάνεται και η απόφαση για την παλιά σύνδεση της κινητής συσκευής. Πιο συγκεκριμένα, μία εκ των επιλογών που διαθέτει ο UE είναι να διακόψει πλήρως την παλιά σύνδεση και όλη η κίνηση να εξυπηρετείται πλέον από το νέο σταθμό βάσης. Κάτι τέτοιο θα σήμαινε ουσιαστικά τη μεταπομπή του (NV HO) στο νέο eNB. Εκτός της παραπάνω επιλογής όμως, υπάρχει η δυνατότητα διατήρησης και των δύο συνδέσεων παράλληλα, κάτι που δεν αποτελεί μεταπομπή. Δηλαδή, μπορεί ο UE να παραμείνει συνδεδεμένος με τον eNB του δικτύου A, ενώ το στιγμιότυπο VUE να συνδεθεί ταυτόχρονα στο νέο eNB του ξένου δικτύου διοχετεύοντας ένα μέρος της κίνησης (το οποίο μπορεί να είναι είτε οι εισερχόμενες κλήσεις είτε άλλο περιεχόμενο που μεταφορτώνεται) σε αυτόν. Με αυτό τον τρόπο η κινητή συσκευή έχει τη δυνατότητα μέσω της device-centric προσέγγισης να συνδέεται ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικούς παρόχους.

3.4.4 Φάση επιλογής id για τον UE (Id selection Phase)

Όπως προαναφέρθηκε, όταν η κινητή συσκευή αποφασίζει να πραγματοποιήσει μεταπομπή, είναι απαραίτητο να λάβει ένα προσωρινό αναγνωριστικό (id) το οποίο αντιστοιχεί στο δίκτυο όπου εισέρχεται. Με τον τρόπο αυτό η κινητή συσκευή αποκτά μία προσωρινή ταυτότητα με την οποία γίνεται αναγνωρίσιμη στο νέο δίκτυο στο οποίο θα συνδεθεί, για όσο χρόνο διατηρήσει τη σύνδεσή της σε αυτό. Στην παρούσα φάση ο SDN Server διατηρώντας λίστες με τα ids που αντιστοιχούν σε κάθε δίκτυο, εξετάζει σε ποιο δίκτυο θα μεταφερθεί η κινητή συσκευή και της εκχωρεί ένα εκ των ids που έχουν οριστεί από το εν λόγω δίκτυο. Η επιλογή id γίνεται με κριτήρια του SDN Server, τα οποία σίγουρα περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα των ids ανά πάσα χρονική στιγμή.

3.5 Βελτιστοποιήσεις στην προτεινόμενη σηματοδότηση

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν αναλυτικά η ροή σηματοδότησης και τα στάδια απόφασης της device-centric προσέγγισης παρέχοντας μία συνολική εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας της RRS υπηρεσίας. Δεδομένου όμως ότι τα ζητήματα ασφαλείας, χρονισμού και κατανάλωσης ενέργειας τίθενται στο επίκεντρο των 5G συστημάτων, κρίνεται απαραίτητη η επανεξέταση της προτεινόμενης λύσης προκειμένου να εφαρμοστούν βελτιώσεις προς ικανοποίηση ενδεχόμενων κενών στους προαναφερθέντες τομείς. Οι εν λόγω βελτιώσεις παρατηρούνται και στις πέντε φάσεις που σημειώνονται στα τετράγωνα με κόκκινο περίγραμμα στην Εικόνα 3.2. Με βάση τις προτεινόμενες αλλαγές, η ροή σηματοδότησης διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι βελτιώσεις που προτείνονται για καθεμία από τις πέντε φάσεις που σημειώνεται στην Εικόνα 3.2.

- **Βελτιστοποιήσεις στη Φάση παρακολούθησης SLA**

Επανεξετάζοντας τη ροή σηματοδότησης, η πρώτη βελτίωση που εισάγεται αφορά στον μηχανισμό απόκτησης της λίστας των διαθέσιμων eNBs από τον OpenUE. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι τα τρία πρώτα βήματα του μηχανισμού που αφορούν στην ενημέρωση του SDN Server σχετικά με τη λίστα των διαθέσιμων ids από τα συνεργαζόμενα δίκτυα παραμένουν ως έχουν. Ο SDN Server ζητάει από τον SDN Agent κάθε δικτύου να του αποστείλει μία λίστα με ids τα οποία διαθέτει προς εκχώρηση σε νέες κινητές συσκευές που επιθυμούν να εισέλθουν στο δίκτυό του κάνοντας χρήση της RRS υπηρεσίας. Ως απόκριση στο αίτημα του SDN

Server, ο SDN Agent πραγματοποιεί τη διαδικασία “NV SLA Monitor”, ώστε να ελέγξει τις συμφωνίες που έχουν συναφθεί με άλλους παρόχους (βήμα 2) και στη συνέχεια του αποστέλλει τη λίστα με τα ids (βήμα 3). Έπειτα, μετά την απόδοση της λίστας, ο SDN Agent του ξένου δικτύου στέλνει αίτημα προς την MME του ίδιου δικτύου, προκειμένου να ζητήσει να ενημερώνεται κάθε φορά που κάποιο UE που κάνει χρήση ενός εκ των ids τη λίστας συνδέεται στο δίκτυο (βήμα 4). Με τη σειρά της η MME αποκρίνεται με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης ACK (βήμα 5). Η διαφορά έγκειται ότι στο βελτιστοποιημένο μηχανισμό η εκτέλεση των βημάτων 4 και 5 εμφανίζεται νωρίτερα στο εν λόγω σχήμα, πριν αποφασιστεί το id που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από τον OpenUE. Αυτό συμβαίνει διότι η ενημέρωση των OpenUEs σχετικά με τα διαθέσιμα ids γίνεται πλέον με πιο ευέλικτο τρόπο. Συγκεκριμένα, ο SDN Server αναλαμβάνει την περιοδική αποστολή λίστας με τα διαθέσιμα ids για κάθε πάροχο στους OpenUEs, ώστε εκείνοι να γνωρίζουν ανά πάσα στιγμή τις δυνατές επιλογές id. Όπως γίνεται φανερό, ο SDN Agent δεν χρειάζεται να ενημερώνεται για το υποψήφιο id της νέας σύνδεσης (βήμα 13 στην Εικόνα 3.2) από τον SDN Server και κατά συνέπεια δε ζητά ενημέρωση από την MME για ένα συγκεκριμένο id, αλλά γενικότερα για όποιο id της λίστας παρουσιαστεί στο δίκτυο. Η φάση παρακολούθησης SLA αποτελείται τώρα από τα βήματα 1 έως 5, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3.

- **Βελτιστοποιήσεις στις Φάσεις ενεργοποίησης και απόφασης**

Στο μηχανισμό που προτάθηκε παραπάνω φάνηκε ότι μετά τη φάση της παρακολούθησης SLA, ο eNB του οικιακού δικτύου που εξυπηρετεί την κινητή συσκευή ζητά από αυτή την πραγματοποίηση μετρήσεων, στέλνοντάς ένα μήνυμα “Measurement Triggering” και η συσκευή πραγματοποιεί μετρήσεις και αποφασίζει για το αν πρέπει να συνδεθεί με κάποιο άλλο σταθμό βάσης (“NV Triggering”). Στη συνέχεια, αποστέλλει στον SDN Server μία λίστα με τα eNBs, για τα οποία παρουσιάστηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τις μετρήσεις, προκειμένου ο δεύτερος να του επιστρέψει «φιλτραρισμένη» την εν λόγω λίστα προσδιορίζοντας τα eNBs που ανήκουν σε παρόχους δικτύων με τους οποίους έχουν εγκαθιδρυθεί SLAs. Έπειτα, ο OpenUE αποφασίζει με ποιο από τα συνεργαζόμενα eNBs θα ήθελε να συνδεθεί (κατά τη φάση “NV decision”) και στέλνει ένα μήνυμα αίτησης στον SDN Server αναφέροντάς του το eNB που επέλεξε και ζητώντας ένα id προκειμένου να συνδεθεί στο νέο δίκτυο. Ωστόσο, όλο η ανωτέρω διαδικασία εμπλέκει την ανταλλαγή πολλών μηνυμάτων μεταξύ των δικτυακών οντοτήτων αυξάνοντας σημαντικά την ανταλλασσόμενη σηματοδοσία με αποτέλεσμα την εισαγωγή σημαντικών χρόνων καθυστέρησης, αλλά και επιβαρύνοντας ενεργειακά την συσκευή OpenUE, η οποία περιορίζεται από τις δυνατότητες της μπαταρίας της. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η εν λόγω επιβάρυνση, εισάγεται η ιδέα αποστολής περιοδικών πακέτων από τον SDN Server προς τους OpenUEs σε επίπεδο Tracking Area, μέσω των οποίων θα γνωστοποιεί όλα τα eNBs που ανήκουν σε δίκτυα παρόχων με τους οποίους έχουν εγκαθιδρυθεί SLAs και κατά συνέπεια είναι διαθέσιμα να δεχτούν συνδέσεις. Προκειμένου μάλιστα να επιτευχθεί η λιγότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος από τη μεριά του OpenUE, η λήψη των εν λόγω πακέτων θα μπορούσε να γίνεται με βάση κάποιον αλγόριθμο που θα εισάγει κριτήρια για το πότε υπάρχει ανάγκη ενημέρωσης της συσκευής για τις SLAs. Με βάση τον αλγόριθμο, αν η συσκευή δεν επιθυμεί να ενημερωθεί για κάποιο χρονικό διάστημα, τότε μπορεί να απορρίπτει τα λαμβανόμενα πακέτα, ή να αποθηκεύει τις πληροφορίες του τελευταίου πακέτου που ελήφθη και να τις αναγνώσει όταν χρειαστεί. Τα εν λόγω πακέτα, ωστόσο, πέρα από τα διαθέσιμα eNBs, θα διαφημίζουν και τα διαθέσιμα ids ανά eNB ανά πάροχο. Με αυτές τις βελτιώσεις στον μηχανισμό, αποφεύγεται η κίνηση σηματοδοσίας που αφορά τον

έλεγχος των SLAs για κάθε λίστα μετρήσεων που αναφέρει ο OpenUE, αλλά και την αίτηση και εκχώρηση ενός id (βήματα 6, 7 και 19 στην Εικόνα 3.2). Επιπρόσθετα, τα σημεία αποφάσεων μειώνονται σημαντικά, καθώς το “NV Triggering” και το “NV Decision” ενοποιούνται σε μία φάση, ενώ το “Id Selection” παύει να υφίσταται από τη μεριά του SDN Server και ενσωματώνεται στη φάση του NV Decision. Κατά αυτό τον τρόπο, αφενός εμφανίζεται κέρδος από την σκοπιά των υπολογιστικών πόρων και αφετέρου από τη σκοπιά της κλιμάκωσης, καθώς ο κύριος όγκος αποφάσεων λαμβάνεται από τις συσκευές και όχι κεντρικά από τον SDN Server.

- **Βελτιστοποιήσεις στη Φάση επιλογής id**

Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται και σχηματικά ότι με βάση τον γενικευμένο μηχανισμό της device-centric προσέγγισης ο SDN server κατά τη φάση “Id selection” αποφασίζει το id το οποίο θα δοθεί στον OpenUE και του το γνωστοποιεί μέσω ενός μηνύματος “VUE establishment” κατά το οποίο ζητά από τον OpenUE να δημιουργήσει ένα νέο instance και να κάνει χρήση του επιλεγμένου id για σύνδεση στο νέο δίκτυο. Στην προτεινόμενη βελτιστοποιημένη διαδικασία τα βήματα είναι διαφορετικά. Πιο συγκεκριμένα, στο βήμα 6 του διαγράμματος της Εικόνας 3.3 συναντάται το “Measurement Triggering” μήνυμα το οποίο, όπως και στο baseline σχήμα (Εικόνα 3.2), στέλνεται από τον eNB που εξυπηρετεί την κινητή συσκευή, προκειμένου να ζητήσει την πραγματοποίηση μετρήσεων. Ως επακόλουθο, η συσκευή προβαίνει σε μετρήσεις, εκτιμά το αν θα πρέπει να συνδεθεί με κάποιον άλλο eNB και με βάση τις πληροφορίες της λίστας των eNBs-ids που λάμβανε περιοδικά, αποφασίζει η ίδια με ποιο eNB θα συνδεθεί, ποιο id θα δεσμεύσει και τελικά προβαίνει στην εγκαθίδρυση του VUE (βήμα 7 – “NV Triggering and Decision”). Αφού πραγματοποιηθούν όλες οι απαραίτητες διεργασίες για την δημιουργία του VUE στιγμιοτύπου, ο Open UE είναι πλέον σε θέση να στείλει αίτημα σύνδεσης στον νέο eNB κάνοντας χρήση του επιλεγμένου id (βήμα 8). Από το σημείο αυτό και έπειτα, λαμβάνουν χώρα οι συνήθεις διεργασίες handover, με την ολοκλήρωση των οποίων η MME του ξένου δικτύου, ενημερώνει τον SDN Agent Host σχετικά με το νέο id που εμφανίστηκε στο δίκτυο, όπως είχε ζητηθεί ήδη στο βήμα 4. Τελικά, ο SDN Agent Host με τη σειρά του ενημερώνει τον SDN Server (Specified id Present – βήμα 9) προκειμένου να έχει γνώση σχετικά με την μεταπομπή, αφενός για λόγους χρεώσεων και αφετέρου προκειμένου να ανανεώσει τη λίστα των ids που στέλνει με περιοδικά μηνύματα προς τους OpenUEs (βήμα 10).

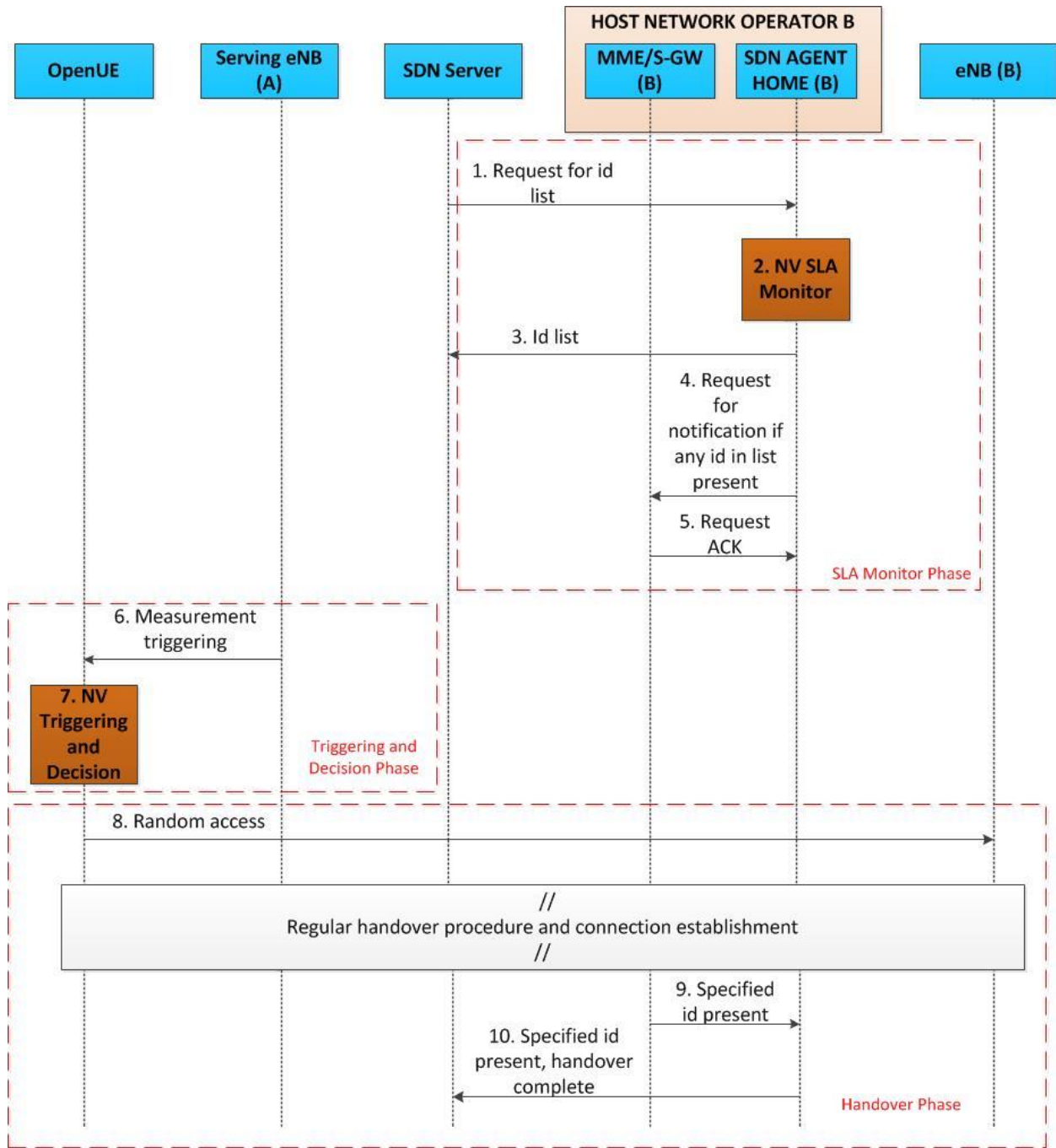
Με τις παραπάνω βελτιώσεις στις τέσσερις πρώτες φάσεις της ροής σηματοδότησης στη device-centric προσέγγιση τελικά επιτυγχάνεται και βελτιστοποίηση στα βήματα τα οποία συμπεριλαμβάνονται στη διαδικασία του handover καθεαυτή. Πιο συγκεκριμένα αφαιρούνται τα βήματα της ζήτησης για δέσμευση πόρων στον eNB που πρόκειται να εξυπηρετήσει τον OpenUE καθώς και των μηνυμάτων επιβεβαίωσης και της προώθησής τους στον SDN Server. Ένα βήμα που επίσης αφαιρείται είναι η αίτηση στον OpenUE για δημιουργία εικονικού στιγμιοτύπου VUE καθώς και η ανακοίνωση σε αυτόν του id που του εκχωρήθηκε για τη σύνδεσή του σε νέο δίκτυο, καθώς αυτό του είναι ήδη γνωστό από τα πρώτα βήματα της διαδικασίας. Η συνήθης διαδικασία του handover καθώς και η ειδοποίηση ότι μία συσκευή με id του ξένου παρόχου εισήλθε στο δίκτυό του παραμένουν ως έχουν.

Ολοκληρώνοντας την παράθεση των βημάτων ροής σηματοδότησης, γίνεται μία σύνοψη των βελτιώσεων που προτείνονται ως προς τα επιμέρους βήματα σε σχέση με την baseline λύση, προκειμένου ο μηχανισμός να απελευθερωθεί από τις εν γένει περιπτές ανταλλαγές μηνυμάτων που προκαλούν φόρτο σηματοδότησης και ως εκ τούτου, σπατάλη των δικτυακών πόρων. Πρωτίστως, έχουν αφαιρεθεί τα βήματα ενημέρωσης

του SDN Agent Home από τον SDN Server, σχετικά με το επικείμενο handover της κινητής συσκευής (βήματα 10 και 11 στην Εικόνα 3.2). Η αφαίρεση των εν λόγω βημάτων συνίσταται στο γεγονός ότι αφενός η ύπαρξη τους δεν προσφέρει κάποια επιπρόσθετη λειτουργικότητα στον προτεινόμενο μηχανισμό, καθώς το οικιακό δίκτυο δεν είναι απαραίτητο να ενημερώνεται για τα handovers μιας συσκευής προς ξένα δίκτυα, αν βέβαια θεωρήσουμε τον SDN Server ως μία πλήρως έμπιστη οντότητα που θα διαχειριστεί αντικειμενικά και με ακεραιότητα τις επικείμενες χρεώσεις για τις υπηρεσίες που θα χρησιμοποιήσει η κινητή συσκευή ως μέλος του ξένου δικτύου. Ο SDN Agent Home, μάλιστα, είναι δυνατόν να μην υπάρχει καν στο οικιακό δίκτυο κορμού, κάτι που σημαίνει ότι το οικιακό δίκτυο ακόμη κι αν δεν χρησιμοποιεί SDN τεχνικές δεν εμποδίζει τα OpenUEs από το να συνδεθούν σε ξένα δίκτυα. Ο μόνος περιορισμός που εγείρει η εν λόγω απουσία αφορά το γεγονός ότι το οικιακό δίκτυο δεν θα μπορεί να προσφέρει τις υπηρεσίες του ως «ξένο» δίκτυο σε άλλα OpenUEs. Επιπλέον, στα πλαίσια της νέας προτεινόμενης λύσης, έχουν αφαιρεθεί τα βήματα 13,16,17,18,19 της Εικόνας 3.2, που αφορούν την αποστολή αιτήματων πρόσβασης προς το επιλεγμένο eNB και την δέσμευση ραδιοπόρων πριν τη δημιουργία του VUE. Η αφαίρεση των εν λόγω από το μηχανισμό, τον φέρνει πιο κοντά στη διαδικασία μεταπομπής, όπως αυτή πραγματοποιείται μεταξύ σταθών βάσης του ίδιου παρόχου, ενέχοντας ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις τον κίνδυνο δημιουργίας του VUE, αλλά τελικά την μη ολοκλήρωση της μεταπομπής, λόγω ενδεχόμενης έλλειψης πόρων στον επιλεγμένο eNB.

Τέλος, προτείνεται η εισαγωγή μιας επιπρόσθετης δικλείδας ασφαλείας σχετικά με τη συχνότητα κατά την οποία ο ίδιος ο OpenUE μπορεί να προβαίνει σε διαδικασίες handover, αλλά και τον μέγιστο αριθμό παράλληλων συνδέσεων σε διαφορετικά δίκτυα, κατά τις οποίες ένας OpenUE κάνει χρήση πολλών διαφορετικών ids. Κατάχρηση των ανωτέρω είναι δυνατόν να λάβει χώρα από κακόβουλο λογισμικό οδηγώντας σε επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών (denial-of-service – DoS) και πλημμύρας του δικτύου από μηνύματα σηματοδοσίας.

Αν και ο βελτιστοποιημένος μηχανισμός είναι σημαντικά πιο λιτός σε σχέση με το βασικό σχήμα, εμπεριέχει όλα τα απαραίτητα στάδια για μία ορθή λειτουργία της device-centric προσέγγισης σε 10 βήματα αντί για 22 βήματα, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της κίνησης σηματοδοσίας στα δίκτυα, εξοικονόμηση μπαταρίας για τις συσκευές και ενίσχυση της ασφάλειας σε περιπτώσεις επιθέσεων, όπως επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών.



Εικόνα 3.3: Η ροή της σηματοδότησης device-centric προσέγγισης με βελτιστοποιήσεις (optimized)

3.6 Συγκριτική ανάλυση των network-centric και device-centric προσεγγίσεων για το διαμοιρασμό ραδιο-πόρων

Έχοντας περιγράψει τις network-centric και device-centric προσεγγίσεις για την υλοποίηση της υπηρεσίας RRS, παρακάτω ακολουθεί μία συγκριτική ανάλυση μεταξύ τους, τα αποτελέσματα της οποίας συνοψίζονται σε πίνακα.

Με την προσέγγιση από την πλευρά του δικτύου (network-centric) που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο επιτυγχάνεται το αποτέλεσμα η κινητή συσκευή να μην αντιλαμβάνεται καθόλου το σύνολο των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μεταπομπή της από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο, ούτε και τον τρόπο με τον οποίο γενικότερα υλοποιείται η υπηρεσία του διαμοιρασμού των

ραδιο-πόρων. Με άλλα λόγια, η συσκευή αντιλαμβάνεται ότι πρόκειται να μεταβεί σε άλλο σταθμό βάσης μόνο όταν στο τέλος της ροής σηματοδότησης της δοθεί η εντολή να πραγματοποιήσει τη διαδικασία της μεταπομπής. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι η μπαταρία του UE δεν καταπονείται με την κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας και συνεπώς ο χρόνος ζωής της μεγιστοποιείται. Εκτός αυτού, υπάρχουν λιγότερα κενά ασφαλείας εφόσον οι διαδικασίες RRS λαμβάνουν χώρα στις οντότητες του δικτύου, οι οποίες είναι δυσκολότερο να παραβιαστούν από τις κινητές συσκευές. Αφού στην προσέγγιση αυτή οι κινητές συσκευές δε συμμετέχουν ενεργά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για το διαμοιρασμό ραδιοπόρων, τυχόν παραβίασή τους δε θα επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα σε ολόκληρη την έκταση του δικτύου. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της εν λόγω προσέγγισης είναι η ευκολία που παρουσιάζεται στις διαδικασίες της χρέωσης, καθώς μέσω της εγκαθίδρυσης του tunnel μεταξύ του οικιακού δικτύου και του VeNB ο νέος σταθμός εξυπηρέτησης ουσιαστικά μεταφέρεται στο οικιακό δίκτυο. Συνεπώς η χρέωση γίνεται εντός του οικιακού δικτύου και δε χρειάζεται τρίτη οντότητα για την παρακολούθησή της. Παρά το συγκεκριμένο όφελος που αποκομίζεται από το tunnel, η εγκαθίδρυσή του αποτελεί ταυτόχρονα και μειονέκτημα, αφού με τον τρόπο αυτό δεσμεύονται περισσότεροι πόροι του δικτύου. Ένα ακόμη ζήτημα το οποίο χρήζει αντιμετώπισης είναι η αυξημένη σηματοδότηση μεταξύ των δικτυακών οντοτήτων που απαιτείται προκειμένου να υλοποιηθεί η υπηρεσία RRS επιτυχώς και με τρόπο διαφανή προς την κινητή συσκευή. Όταν ειδικότερα ο αριθμός των μεταπομπών των κινητών συσκευών είναι μεγάλος, η σηματοδότηση αυξάνεται σημαντικά και κατά συνέπεια αυξάνεται και ο φόρτος εντός του δικτύου.

Στη device-centric προσέγγιση η οποία περιγράφηκε στο παρόν κεφάλαιο φάνηκε ότι αντιμετωπίζονται αρκετά από τα προβλήματα που εγείρονται από τη network-centric προσέγγιση, με τη χρήση των σύγχρονων αυτόνομων και έξυπνων συσκευών. Χάρη στις υψηλές υπολογιστικές δυνατότητες των σύγχρονων κινητών συσκευών καθίσταται δυνατή η προσαρμογή του UE στα δεδομένα του δικτύου αντί για το αντίθετο, και συνεπώς η σηματοδότηση που διεξάγεται εντός του δικτύου μειώνεται σε σημαντικό ποσοστό, καθώς η κινητή συσκευή είναι τώρα υπεύθυνη για το μεγαλύτερο τμήμα των απαιτούμενων ενεργειών και το δίκτυο δε χρειάζεται να αναπροσαρμόζεται ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών. Επιπλέον, το δίκτυο αποδεσμεύεται από την παρακολούθηση της κινητής συσκευής, καθώς όπως προαναφέρθηκε εκείνη λειτουργεί με πιο ανεξάρτητο τρόπο και προσαρμόζεται στις ανάγκες του χρήστη χωρίς να αντιλαμβάνεται το δίκτυο σημαντικές μεταβολές. Δεδομένου του γεγονότος ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται από την ίδια τη συσκευή σε συνεργασία με τον SDN Server, ο χρόνος λήψης τους είναι μικρότερος σε σχέση με τον αντίστοιχο στη network-centric προσέγγιση. Επιπρόσθετα, η εν λόγω προσέγγιση παρέχει τη δυνατότητα διατήρησης πολλών παράλληλων συνδέσεων, ακόμα και διαχωρισμού της uplink από τη downlink κίνηση σε διαφορετικές συνδέσεις. Στα πλεονεκτήματα επίσης συγκαταλέγεται και η μείωση των CAPEX και OPEX για τους παρόχους, αφού ο βαθμός ευφυΐας της αρχιτεκτονικής εντοπίζεται στον UE και όχι στους σταθμούς βάσης του δικτύου πρόσβασης.

Η εν λόγω προσέγγιση όμως εγείρει το πρόβλημα του χρόνου ζωής της μπαταρίας της κινητής συσκευής. Αν και οι δυνατότητες του hardware βελτιώνονται με ταχύτερους ρυθμούς, απαιτείται πολύ περισσότερη ενέργεια από το κινητό για τη device-centric προσέγγιση, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής της μπαταρίας. Φυσικά το εν λόγω ζήτημα χρήζει μελέτης προκειμένου να μετριαστεί με τη σταδιακή πρόοδο και ανάπτυξη στις δυνατότητες του υλικού των συσκευών. Ένα ακόμη μελανό σημείο αποτελεί το ζήτημα της ασφάλειας, καθώς οι κινητές συσκευές μπορούν να παραβιαστούν ευκολότερα σε σχέση με τα δομικά στοιχεία του δικτύου, για παράδειγμα μέσω της εγκατάστασης κακόβουλου λογισμικού (malware) σε αυτές, κάτι που μπορεί

να έχει επίδραση στην απόδοση του δικτύου. Τέλος, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η πραγματοποίηση της χρέωσης χρειάζεται να γίνεται από κάποιο τρίτο μέρος, και συγκεκριμένα τον SDN Server, κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας της.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας ο οποίος συνοψίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο προσεγγίσεων και απεικονίζεται συνοπτικά μία σύγκριση μεταξύ τους.

Πίνακας 3.1: Σύνοψη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των network-centric και device-centric προσεγγίσεων για το διαμοιρασμό ραδιο-πόρων

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Network-centric	<ul style="list-style-type: none"> • Λιγότερα κενά ασφαλείας • Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας • Μεγαλύτερη ευκολία στη διαδικασία της χρέωσης, αφού ο VeNB «έρχεται» στο οικιακό δίκτυο • Η κινητή συσκευή δεν αντιλαμβάνεται τις διαδικασίες για την υλοποίηση του RRS 	<ul style="list-style-type: none"> • Η εγκαθίδρυση του tunnel δεσμεύει περισσότερους δικτυακούς πόρους • Αυξημένη σηματοδότηση και συνεπώς αυξημένος φόρτος στο δίκτυο • Αύξηση CAPEX και OPEX για τους παρόχους, λόγω της λήψης αποφάσεων εντός του δικτύου
Device-centric	<ul style="list-style-type: none"> • Οι έξυπνες κινητές συσκευές προσαρμόζονται στο δίκτυο • Λήψη αποφάσεων από τις συσκευές, άρα μειωμένη σηματοδότηση εντός του δικτύου • Μικρότερος χρόνος λήψης αποφάσεων • Δυνατότητα πολλών παράλληλων συνδέσεων • Διαχωρισμός uplink και downlink κίνησης • Μείωση CAPEX και OPEX για τους παρόχους 	<ul style="list-style-type: none"> • Περισσότερα κενά ασφαλείας • Μικρότερος χρόνος ζωής της μπαταρίας • Η πραγματοποίηση της χρέωσης πρέπει να γίνει από κάποια τρίτη οντότητα

3.7 Ανοιχτές προκλήσεις και θέματα για μελλοντική έρευνα

Στις παραπάνω ενότητες περιγράφηκαν αναλυτικά οι αρχιτεκτονικές βελτιώσεις στις οποίες θα μπορούσε να βασιστεί η υπηρεσία Διαμοιρασμού των Ραδιο-πόρων, καθώς και η διαδικασία που θα ακολουθήσει η υπηρεσία RRS καθαυτή. Είναι γεγονός όμως πως εγείρεται ένας αριθμός από προκλήσεις σχετικά με το εν λόγω πεδίο έρευνας, οι

οποίες θα πρέπει να διευθετηθούν προκειμένου να μπορέσουν τόσο οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας όσο και οι πάροχοι κινητών δικτύων να επωφεληθούν από την προτεινόμενη τεχνική του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων. Οι προκλήσεις αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

3.7.1 Αυθεντικοποίηση, Αδειοδοτήσεις και Πολιτικές Χρέωσης (Authentication, Authorization and Accounting – AAA)

Σύμφωνα με την υπηρεσία RRS, η οποία βασίζεται στην τεχνολογία SDN, είναι δυνατή η χρήση της δικτυακής υποδομής και πόρων που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους δικτύου με δυναμικό τρόπο. Δηλαδή, είναι δυνατόν να αποφασίζεται απευθείας και ανά πάσα στιγμή ο τρόπος κατανομής των διαθέσιμων δικτυακών πόρων στους παρόχους. Συνεπώς, εγείρεται ο προβληματισμός για την επιλογή της βέλτιστης τοποθεσίας όπου θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν οι λειτουργίες AAA, δεδομένου του γεγονότος ότι οι κινητές συσκευές μπορούν πλέον να χρησιμοποιούν τη δικτυακή υποδομή που βρίσκεται εκτός του οικιακού παρόχου τους. Είναι βέβαιο πως όλες οι εμπλεκόμενες δικτυακές οντότητες (στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι κινητές συσκευές και οι υποδομές των κινητών παρόχων) θα πρέπει να αυθεντικοποιούνται και να λαμβάνουν αδειοδοτήσεις από ένα έμπιστο υποσύστημα το οποίο θα είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες AAA. Μία προσέγγιση για την επίλυση του εν λόγω προβληματισμού είναι η αυθεντικοποίηση όλων των εμπλεκόμενων μερών στον SDN Server, ο οποίος βρίσκεται στον πάροχο υπηρεσιών RRS. Κάτι τέτοιο προσφέρει το πλεονέκτημα ότι ο SDN Server με τον τρόπο αυτό έχει τη δυνατότητα να ελέγχει όλες τις SLAs που έχει συνάψει κάθε δικτυακός πάροχος, να πραγματοποιεί όλες τις απαραίτητες ενέργειες για την υλοποίηση της προτεινόμενης υπηρεσίας RRS και να αδειοδοτεί την κινητή συσκευή ώστε να αποκτά πρόσβαση στον στοχευμένο σταθμό βάσης.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα σχετικά με τις λειτουργίες AAA αποτελεί η τοποθεσία όπου πρέπει να φιλοξενούνται οι λειτουργίες χρέωσης για την υπηρεσία RRS. Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη υπηρεσία RRS δίνεται ως δικτυακή υπηρεσία στους παρόχους, ενώ ως υπηρεσία επιπέδου εφαρμογής στις κινητές συσκευές, και συνεπώς οι πολιτικές χρέωσης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας. Και σε αυτό το ζήτημα, καταλληλότερη λύση κρίνεται η χρήση του SDN Server για την υποστήριξη των λειτουργιών χρέωσης.

3.7.2 Παρακολούθηση των SLAs

Η υπηρεσία RRS επιτρέπει σε παρόχους διαφορετικών δικτύων να διαμοιράζονται on demand τους πόρους τους και την υποδομή τους, αφού υποστηρίζεται από κατάλληλη δομή αρχιτεκτονικής. Όπως ήδη περιγράφηκε, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός SDN Agent σε κάθε δίκτυο για τους λόγους που αναφέρθηκαν. Εκτός αυτού όμως, απαραίτητη είναι και η σύναψη SLAs μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών RRS και των παρόχων δικτύου. Συνεπώς, η παρακολούθηση και η διαπραγμάτευση σχετικά με τις εν λόγω SLAs αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της προτεινόμενης υπηρεσίας RRS, αφού χρησιμεύουν ιδιαίτερα στον προσδιορισμό του συνόλου των υποψήφιων σταθμών βάσης στους οποίους μία κινητή συσκευή μπορεί να έχει πρόσβαση. Αντίστοιχα, και οι πάροχοι δικτύων πρέπει να είναι σε θέση να πιστοποιούν ότι μία εισερχόμενη αίτηση RRS βρίσκεται σε συμφωνία με τους όρους που έχουν θέσει οι ίδιοι. Σε κάθε περίπτωση, εγείρονται προβληματισμοί σχετικοί με θέματα υλοποίησης, που

περιλαμβάνουν τη συχνότητα με την οποία θα μπορούν να ανανεώνονται οι SLAs και οι συμφωνημένες χρεώσεις φάσματος μεταξύ του παρόχου RRS και των παρόχων δικτύου, την πιθανότητα η συχνότητα αυτή να επηρεάζει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της υπηρεσίας RSS καθώς και τη δυνατότητα να υπάρξει ένα υψηλό ποσοστό αντιστάθμισης του φόρτου που επιφέρει η υλοποίηση της υπηρεσίας RRS με την αποδοτικότητα της υπηρεσίας.

3.7.3 Προσαρμογή χρεώσεων φάσματος σε πραγματικό χρόνο – «Δημοπρασία» Φάσματος (Spectrum Auction)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι απαραίτητη η σύναψη SLAs μεταξύ του παρόχου της υπηρεσίας RRS και των παρόχων δικτύου, με κάποιες δεδομένες χρεώσεις φάσματος. Όμως, θα ήταν πολύ προτιμότερο να υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής των εν λόγω χρεώσεων σε πραγματικό χρόνο, καθώς με τον τρόπο αυτό θα υπάρξει αναβάθμιση της ανταγωνιστικότητας στην αγορά και ανάπτυξη καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων. Στοχεύοντας στην κατεύθυνση αυτή, κάθε πάροχος δικτύου θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα να συμμετάσχει σε αναπροσαρμογές της συμφωνηθείσης χρέωσης φάσματος, λαμβάνοντας υπόψη και την κατάσταση του δικτύου του όσον αφορά στη διαθεσιμότητα πόρων σε μία δεδομένη γεωγραφική περιοχή ή χρονική περίοδο. Κατά συνέπεια, ένα ζήτημα κρίσιμης σημασίας που εγείρεται είναι η ρύθμιση της αγοράς του φάσματος προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι οι εμπλεκόμενες οντότητες δεν πραγματοποιούν ενέργειες εις βάρος των χρηστών ή του παρόχου της υπηρεσίας RRS. Ιδανικά, οι SDN Agents θα συμμετάσχουν στις διαδικασίες «δημοπρασίας» του φάσματος και ο SDN Server θα διαθέτει τη δυνατότητα να ρυθμίζει και να ελέγχει την αγορά του φάσματος.

3.7.4 Παρακολούθηση και έλεγχος μετρήσεων

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης υλοποίησης RRS εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, στους οποίους συμπεριλαμβάνεται η ικανότητα των SDN Agents να διατηρούν συνεχώς μία ενημερωμένη εικόνα για την κατάσταση του δικτύου τους, η ικανότητα του SDN Server να διαχειρίζεται αποδοτικά την πληροφορία που ανταλλάσσεται μεταξύ των διαφορετικών δικτύων, καθώς και η συχνή αξιολόγηση του ραδιο-περιβάλλοντος από τις κινητές συσκευές μέσω μετρήσεων σχετικές με την ποιότητα του σήματος. Ωστόσο, μία προσπάθεια για διατήρηση ενημερωμένης εικόνας της κατάστασης των διαφορετικών δικτύων ενδέχεται να αυξήσει σημαντικά την πολυπλοκότητα και τη σηματοδότηση που διεξάγεται, καθώς και να θέσει σε κίνδυνο την αξιοπιστία της υπηρεσίας RRS. Συνεπώς, η διαδικασία της παρακολούθησης και του ελέγχου των μετρήσεων θα πρέπει να σχεδιαστεί πολύ προσεκτικά κατά μήκος ολόκληρης της αλυσίδας δικτύων και οντοτήτων που εμπλέκονται στο διαμοιρασμό ραδιο-πόρων.

3.7.5 Τεχνικές ενίσχυσης χρήσης SDN (SDN Enforcement Techniques)

Οι τεχνικές ενίσχυσης της χρήσης SDN αναφέρονται τόσο στα κριτήρια ενεργοποίησης όσο και στις στρατηγικές λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται πριν από την εισαγωγή της υπηρεσίας RRS μεταξύ των διαφορετικών δικτύων. Οι εν λόγω τεχνικές αναμένεται να έχουν εξαιρετικής σημασίας επίδραση στην αξιοπιστία και στην

αποδοτικότητα της υπηρεσίας RRS λόγω του μεγάλου αριθμού οντοτήτων που εμπλέκονται σε αυτήν. Ένα κρίσιμο ζήτημα αποτελεί το σημείο αναφοράς στο οποίο εφαρμόζονται οι τεχνικές αυτές. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση της υπηρεσίας διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων εξαρτάται άμεσα από την προσέγγιση η οποία φανερώνει αν οι τεχνικές επιβολής SDN εκτελούνται στα κινητά τερματικά (προσέγγιση από την πλευρά της συσκευής) ή στο δίκτυο, δηλαδή στο σταθμό βάσης ο οποίος εξυπηρετεί το κινητό τερματικό (προσέγγιση από την πλευρά του δικτύου).

3.7.6 Έλεγχος αποδοχής συνδέσεων με SDN (SDN-Aware Admission Control)

Στην παραπάνω παράγραφο αναφέρθηκε ότι η απόδοση της υπηρεσίας του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων εξαρτάται από τις τεχνικές ενίσχυσης της χρήσης SDN. Ένας ακόμη παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται είναι οι στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της αποδοχής αιτήσεων συνδέσεων από τα στοχευμένα σημεία όπου η κινητή συσκευή έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί. Οι παραδοσιακές στρατηγικές ελέγχου της αποδοχής των αιτήσεων συνδέσεων δε θα διαθέτουν την ικανότητα να προβλέψουν και να εξυπηρετήσουν επαρκώς το φόρτο κίνησης που θα προκύψει ως επακόλουθο των αιτημάτων για σύνδεση από εγγεγραμμένες και μη εγγεγραμμένες κινητές συσκευές σε ένα δίκτυο. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο φόρτος σηματοδοσίας και διοίκησης σε περίπτωση απόρριψης μίας εισερχόμενης RRS αίτησης στο δίκτυο. Για τους προαναφερθέντες λόγους, η ανάπτυξη στρατηγικών για τον έλεγχο της αποδοχής αιτήσεων συνδέσεων είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της αποδοτικότητας του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων μεταξύ διαφορετικών δικτυακών παρόχων.

3.7.7 Σηματοδοσία από άκρο σε άκρο και βελτιστοποίηση

Όπως έγινε εμφανές από τα παραπάνω, η υπηρεσία του διαμοιρασμού των ραδιο-πόρων περιλαμβάνει πολλές δικτυακές οντότητες, οι οποίες χρειάζεται να επικοινωνούν ομαλά μεταξύ τους. Συνεπώς, ένα ακόμη ζήτημα το οποίο είναι εξαιρετικής σημασίας και χρήζει προσοχής αποτελεί η βελτιστοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ των εν λόγω οντοτήτων οι οποίες απαρτίζουν την αλυσίδα της υπηρεσίας RRS. Πιο συγκεκριμένα, κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση άμεσων λογικών διεπαφών ή/και tunnels για φυσική επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων δικτυακών οντοτήτων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση της σηματοδοσίας και οι καθυστερήσεις που θα προέκυπταν. Όμως, η ενσωμάτωση των προαναφερθέντων διεπαφών και tunnels μεταξύ των διαφορετικών υποδομών δικτύων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο και την ανθεκτικότητα των δικτύων, καθώς και από την αξιοπιστία που παρέχουν τα δίκτυα για έγκυρη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη της διαθεσιμότητας ραδιο-πόρων προς διαμοιρασμό.

3.7.8 Θέματα ασφάλειας

Ένα ζήτημα το οποίο εγείρεται κυρίως στη device-centric προσέγγιση είναι το επίπεδο ασφάλειας που υπάρχει στις διαδικασίες του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, όταν η αρμοδιότητα της λήψης αποφάσεων ανήκει κυρίως στα δομικά στοιχεία του δικτύου τα κενά ασφαλείας είναι λιγότερα από τα αντίστοιχα που υπάρχουν στην περίπτωση όπου η κινητή συσκευή λαμβάνει τις αποφάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία

μεμονωμένη κινητή συσκευή μπορεί να παραβιαστεί ευκολότερα από ότι τα δικτυακά στοιχεία, για παράδειγμα μέσω της εγκατάστασης κακόβουλου λογισμικού σε αυτές. Αντίθετα οι δικτυακές οντότητες διαθέτουν υψηλότερα μέτρα προστασίας από κακόβουλες επιθέσεις, καθώς πιθανή παραβίασή τους ενδέχεται να οδηγήσει σε προβλήματα σε όλη την έκταση του δικτύου. Αναμένεται η περαιτέρω έρευνα σχετικά με το θέμα της ασφάλειας των κινητών συσκευών, ώστε με την εξέλιξη του software να αναπτυχθούν ακόμη ισχυρότερα πακέτα λογισμικού τα οποία θα μειώνουν τα κενά ασφαλείας και θα ισχυροποιούν το επίπεδο ασφάλειας της device-centric προσέγγισης ώστε να ανταγωνίζεται το αντίστοιχο της network-centric προσέγγισης.

3.7.9 Διάρκεια ζωής μπαταρίας UE

Οι σημερινές αυτόνομες και έξυπνες συσκευές διαθέτουν ισχυρές υπολογιστικές δυνατότητες, αφού το hardware που περιλαμβάνουν εξελίσσονται συνεχώς. Ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μίας κινητής συσκευής έχει αυξηθεί αισθητά και πλέον αγγίζει ακόμη και τις είκοσι ώρες σε συνεχή αναπαραγωγή video [80]. Παρ' όλα αυτά, στην προτεινόμενη device-centric προσέγγιση ο UE επιβαρύνεται με τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων και ενημέρωση των κατάλληλων δικτυακών οντοτήτων για αυτές και ο φόρτος του αυξάνεται. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας από πλευράς του είναι μεγαλύτερη, κάτι που έχει επιπτώσεις και στο χρόνο ζωής της μπαταρίας της κινητής συσκευής και πιο συγκεκριμένα τη μείωσή του, λόγω των ενεργειών που πρέπει να πραγματοποιήσει ο UE. Το συγκεκριμένο ζήτημα αναμένεται να διευθετηθεί σταδιακά με την ολοένα και μεγαλύτερη πρόοδο στην κατασκευή του υλικού και τις αυξανόμενες δυνατότητες και ευφυΐα που διαθέτει με την πάροδο του χρόνου.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 5G ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΥ ΡΑΔΙΟ-ΠΟΡΩΝ

Στο παρόν και τελευταίο κεφάλαιο της μελέτης γύρω από το διαμοιρασμό ραδιο-πόρων (RRS) με χρήση SDN multi-tenant τεχνικών, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν έμπρακτα τα οφέλη μίας τέτοιας υλοποίησης ως λύση για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση δικτύου σε επίπεδο συστήματος, έχοντας ως μετρικές ποιότητας την απόδοση ως προς την μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση (average delay) και αυτή ως προς τη μέση διεκπεραιωτική ικανότητα (average throughput). Η εν λόγω προσομοίωση απαρτίζεται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος εξετάζονται οι προαναφερθείσες μετρικές ως προς την αύξηση του φόρτου του δικτύου, ενώ στο δεύτερο μέρος επανεξετάζονται ως προς την πυκνότητα του δικτυακού εξοπλισμού. Η σχετική προσομοίωση δικτύου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου LTE-sim [81], ενός open source λογισμικού, το οποίο αναπτύχθηκε από ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου του Μπάρι της Ιταλίας.

4.1 Αρχιτεκτονική και Στοιχεία Δικτύου προσομοίωσης

Στο πλαίσιο της εν λόγω προσομοίωσης θεωρήθηκαν τρία αλληλεπικαλυπτόμενα δίκτυα, τα οποία ανήκουν σε τρεις διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός δικτύου μακροκυψελών (macrocell) LTE-A, ενός δικτύου φεμτοκυψελών (femtocell) LTE-A και ενός δικτύου σταθμών βάσης WiFi (WiFi Access Points – WiFi APs), τα οποία ανήκουν αντίστοιχα στον Πάροχο Α (Operator A), Πάροχο Β (Operator B) και Πάροχο Γ (Operator C). Ο Πίνακας 4.1 παρέχει μία συνολική εικόνα των δομικών στοιχείων κάθε δικτύου.

Πίνακας 4.1: Δομικά στοιχεία επιμέρους δικτύων προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Πλήθος eNB Οικιακού Δικτύου - Πάροχος Α	7 eNBs
Πλήθος UE ανά Macrocell - Πάροχος Α	Μέρος Α: 10,30,60,90 Ues Μέρος Β: 40 Ues
Πλήθος κτηρίων με εξοπλισμό HeNB ανά Macrocell-Παρόχος Β	Μέρος Α: 5 κτήρια Μέρος Β: 3,6,9 κτήρια
Πλήθος κτηρίων με εξοπλισμό WiFi AP ανά Macrocell- Παρόχος Γ	Μέρος Α: 5 κτήρια Μέρος Β: 3,6,9 κτήρια
Πλήθος HeNB ανά κτήριο - Πάροχος Β	2 HeNBs
Πλήθος WiFi AP ανά κτήριο - Πάροχος Γ	2 Aps
Πλήθος UE ανά Femtocell - Πάροχος Β	2 Ues
Πλήθος UE ανά WiFi AP - Πάροχος Γ	2 UEs
Ακτίνα Macrocell Οικιακού Δικτύου - Πάροχος Α	0,5km

Το δίκτυο του παρόχου A αποτελείται από 7 macrocells ακτίνας 0,5km έκαστη, οι οποίες εξυπηρετούνται από eNBs και ορίζουν την ευρύτερη γεωγραφική περιοχή της προσομοίωσης. Το δίκτυο του παρόχου B αποτελείται από femtocells ομοιόμορφα καταναμημένες μέσα στην περιοχή που ορίζεται από κάθε macrocell του παρόχου A, ομαδοποιημένες σε κτήρια, καθένα από τα οποία περιέχει εγκατεστημένα δύο HeNBs, επίσης ομοιόμορφα καταναμημένα σε αυτό. Παρόμοια με το δίκτυο του παρόχου B, ορίζεται και το δίκτυο του παρόχου Γ, με τη μόνη διαφορά ότι απαρτίζεται από WiFi APs αντί των HeNBs.

Όσον αφορά το πλήθος των femtocells του παρόχου B, στο πρώτο μέρος της προσομοίωσης ορίζεται στις 10 ανά macrocell - 5 κτήρια με 2 HeNBs. Η ίδια τοποθέτηση ισχύει και για τα APs του παρόχου Γ - 5 κτήρια με 2 APs. Ωστόσο, στο δεύτερο μέρος αυτής, σε κάθε σενάριο, το πλήθος των κτηρίων μεταβάλλεται προκειμένου να εξεταστούν οι μετρικές απόδοσης ως προς την αύξηση των HeNBs και των APs.

Αναφορικά με το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται από το δίκτυο του παρόχου A, αυτό μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες των σεναρίων στο πρώτο μέρος της προσομοίωσης, ενώ στο δεύτερο μέρος χρησιμοποιείται σταθερό πλήθος - 40 UEs ανά macrocell. Το πλήθος των χρηστών των δικτύων B και Γ, ορίζεται στους 2 UEs ανά femtocell και ανά WiFi AP, με στόχο οι εν λόγω σταθμοί βάσης να μην διαχειρίζονται μεγάλο φόρτο ώστε να διαθέτουν ελεύθερους πόρους. Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι οι UEs είναι ομοιόμορφα καταναμημένοι μέσα σε κάθε macrocell, femtocell και WiFi AP περιοχή κάλυψης αντίστοιχα. Σχετικά με τον τύπο υπηρεσιών που ζητείται από τους UEs, επιλέχθηκε η ροή video κωδικοποιημένου στα 440kbps με την μέθοδο H.264/MPEG4 και με ανώτατο όριο καθυστέρησης τα 100ms. Η εν λόγω επιλογή βασίστηκε ως επί το πλείστο στα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, αναφορικά με την έξαρση της χρήσης video, η οποία αναμένεται τα επόμενα χρόνια να δημιουργήσει τον κύριο όγκο κίνησης δεδομένων από κινητές συσκευές. Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει κάποιες επιπρόσθετες μεταβλητές που επιλέχθηκαν κατά την παραμετροποίηση του εργαλείου προσομοίωσης.

Πίνακας 4.2: Μεταβλητές δικτύου προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Συνολικό Εύρος Ζώνης Οικιακού Δικτύου - Πάροχος A	10 MHz
Κατανομή κτηρίων εντός Μακροκυψέλης - Πάροχοι B και Γ	Κανονική
Ταχύτητα UE	3 km/h - πεζοί
Κατανομή HeNB μέσα στο κτήριο	Κανονική
Κατανομή WiFi μέσα στο κτήριο	Κανονική
Μοντέλο Κινητικότητας UE	Τυχαίας Κατεύθυνσης
Μοντέλο Απώλειας Μονοπατιού (Path Loss)	$L = 128.1 + 37,6 \log_{10}(R)$
Μοντέλο Απόκλισης Εξασθένησης Σήματος (Fading)	Μοντέλο Jakes
Τύπος Χρονοπρογραμματιστή Δικτύου Κατερχόμενης Ζεύξης (Downlink Scheduler)	MLWDF

Εφαρμογή	Video streaming κωδικοποιημένο στα 440 kbps
----------	---

4.2 Βασικές Τεχνικές Λεπτομέρειες Προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν οι τεχνικές αναλογίες του δικτύου προσομοίωσης με το προτεινόμενο πρωτόκολλο **«Διαμοιρασμού Ραδιο-πόρων με Device-Centric Προσέγγιση»**.

Το Δίκτυο macrocell του παρόχου A λαμβάνει το ρόλο του **«Home Network»**, ενώ τα δίκτυα των παρόχων B και Γ που έχουν δομηθεί με femtocells και WiFi APs αντίστοιχα, λαμβάνουν τους ρόλους των **«Host Networks»**. Θεωρείται, ότι κάθε εγγεγραμμένο UE στο δίκτυο A διαθέτει **«OpenUE»** δυνατότητες, και ως εκ τούτου δύναται να εξυπηρετηθεί είτε από το οικιακό του δίκτυο είτε από δίκτυα άλλων παρόχων, με τους οποίους ο πάροχος A έχει εγκαθιδρύσει SLAs. Στην παρούσα προσομοίωση, **SLAs** έχουν υπογραφεί μεταξύ του παρόχου A και B, αλλά και του παρόχου A και Γ, προκειμένου οι OpenUEs του παρόχου A να μπορούν να συνδεθούν στα δίκτυα femtocell και WiFi AP, αν αυτό κριθεί σκόπιμο κατά την **«NV-Trigging»** φάση. Επισημαίνεται ότι για τους χρήστες των δικτύων B και Γ δεν υποστηρίζεται η μεταπομπή τους προς ξένα δίκτυα, παραμόνο εντός του οικιακού τους δικτύου. Δεδομένων των δύο αλγορίθμων που έχουν προταθεί, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μία σειρά σεναρίων κατά την οποία ακολουθείται ο **«RSRQ»** αλγόριθμος και μία κόνοντας χρήση του αλγορίθμου **«Φόρτου Κυψέλης» (Offload)**. Πιο συγκεκριμένα, κατά τον RSQR αλγόριθμο, αν οι OpenUEs επιλέξουν την μεταπομπή τους (NV-HO) σε κάποιο εκ των δύο Host Networks, τότε όλες οι σχετικές αιτήσεις ικανοποιούνται χωρίς κάποιον περιορισμό εφόσον ο SDN server έχει διαθεσιμότητα από ids κατά την φάση **«Id Selection»**. Από την άλλη, κατά τον Offload αλγόριθμο, κάθε φορά που ένας OpenUE επιθυμεί να εκτελέσει NV-HO, πραγματοποιείται αρχικά έλεγχος φόρτου της κυψέλης στην οποία βρίσκεται. Αν ο φόρτος κυψέλης έχει ξεπεράσει το κατώφλι που έχει τεθεί από τον πάροχο A, τότε το NV-HO πραγματοποιείται εφόσον ο SDN server έχει διαθεσιμότητα από ids κατά την φάση **«Id Selection»**. Όσον αφορά τη φάση **«NV-Decision»**, επιλέχθηκε η πραγματοποίηση εξολοκλήρου μεταπομπής των συνδέσεων των OpenUEs στους νέους σταθμούς βάσης των Host Networks, αντί της διατήρησης παράλληλων συνδέσεων. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι αποφάσεις μεταπομπής είναι βασισμένες στην ισχύ λαμβανόμενου σήματος.

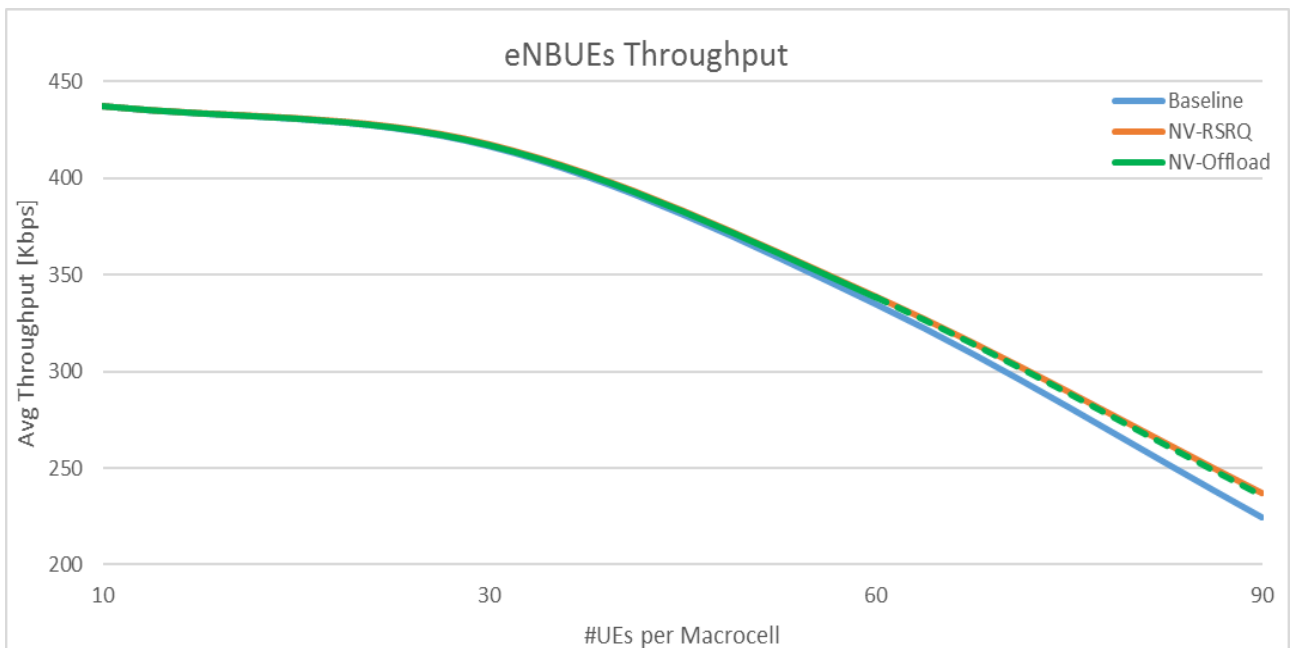
4.3 Μέρος A - Προσομοίωση με μεταβαλλόμενο φόρτο κυψέλης

Το πρώτο μέρος της προσομοίωσης έχει ως στόχο να εξετάσει την απόδοση των χρηστών ενός δικτύου, το οποίο κάνει χρήση της υπηρεσίας RRS με device-centric προσέγγιση, σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόδοση που θα παρουσίαζαν αν εξυπηρετούνταν εξολοκλήρου από τον οικιακό τους πάροχο. Η εν λόγω μελέτη αναπτύσσεται σε σχέση με την αύξηση του πλήθους των χρηστών ανά μακροκυψέλη. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται προσομοίωση του ίδιου δικτύου μέσω τριών σεναρίων:

- **Baseline:** Στο παρόν σενάριο δεν γίνεται χρήση της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας και ως εκ τούτου προσομοιώνεται η λειτουργία ενός τυπικού δικτύου κινητών επικοινωνιών, όπου κάθε UE μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο από το δίκτυο του οικιακού του παρόχου.

- **NV-RSRQ:** Στο παρόν σενάριο γίνεται χρήση της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας, με τον RSRQ αλγόριθμο να επιλέγεται στο κομμάτι του NV-Triggering. Ως εκ τούτου, καθένας από τους OpenUEs του παρόχου A δύναται να εξυπηρετηθεί από τα δίκτυα των παρόχων B και Γ, εφόσον η ισχύς λαμβανόμενου σήματος από τους σταθμούς των host networks είναι μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών του home network.
- **NV-Offload:** Στο παρόν σενάριο γίνεται χρήση της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας, με τον Offload αλγόριθμο να επιλέγεται στο κομμάτι του NV-Triggering. Ως εκ τούτου, καθένας από τους OpenUEs του παρόχου A δύναται να εξυπηρετηθεί από τα δίκτυα των παρόχων B και Γ, εφόσον η ισχύς λαμβανόμενου σήματος από τους σταθμούς των host networks είναι μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών του home network και παράλληλα ο φόρτος κυψέλης έχει ξεπεράσει το κατώφλι που τίθεται από τον πάροχο A. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως τιμή κατωφλίου το 95%.

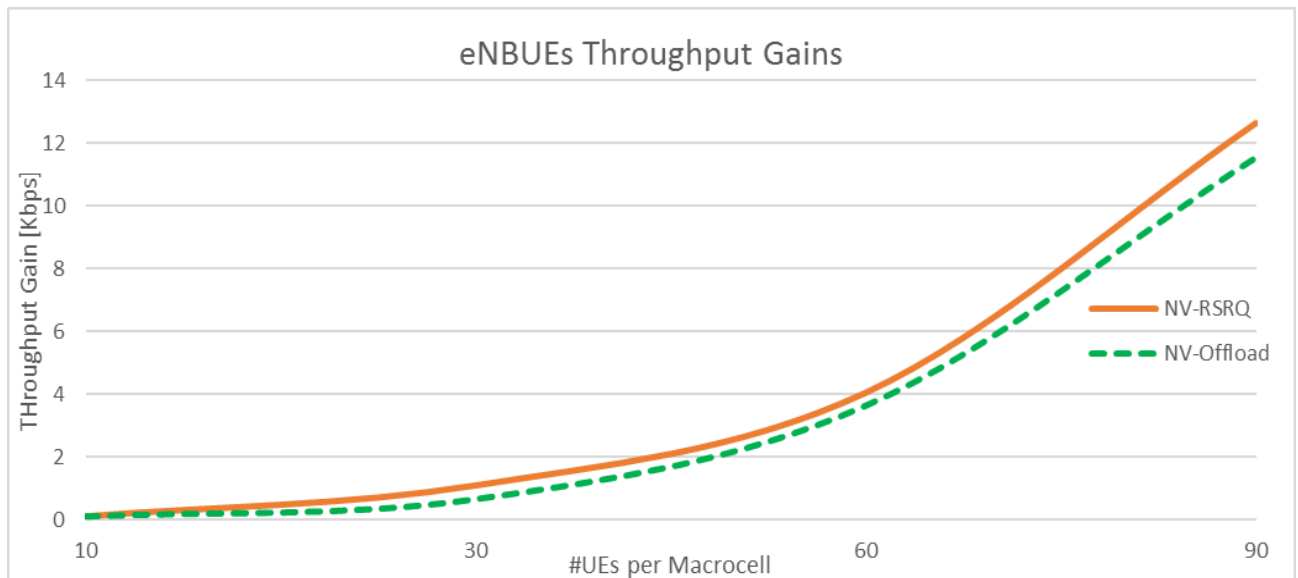
Καθένα από τα προαναφερθέντα σενάρια εκτελέστηκε μεταβάλλοντας το πλήθος των χρηστών του παρόχου A ανά macrocell, το οποίο έλαβε τις τιμές 10, 30, 60 και 90 (UEs per macrocell - άξονας χ των διαγραμμάτων). Το πλήθος των κτηρίων για τους παρόχους B και Γ παραμένει σταθερό λαμβάνοντας την τιμή 5 κτήρια ανά κυψέλη ανά πάροχο. Προς χάρη ευκολίας, οι UEs οι οποίοι «εγκατέλειψαν» το δίκτυο του παρόχου A και επέλεξαν να λαμβάνουν υπηρεσίες από τα δίκτυα των παρόχων B και Γ θα αναφέρονται ως OpenUEs, ενώ οι εναπομείναντες θα αναφέρονται ως eNBUEs.



Σχήμα 4.1: Μέσω throughput για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου A, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

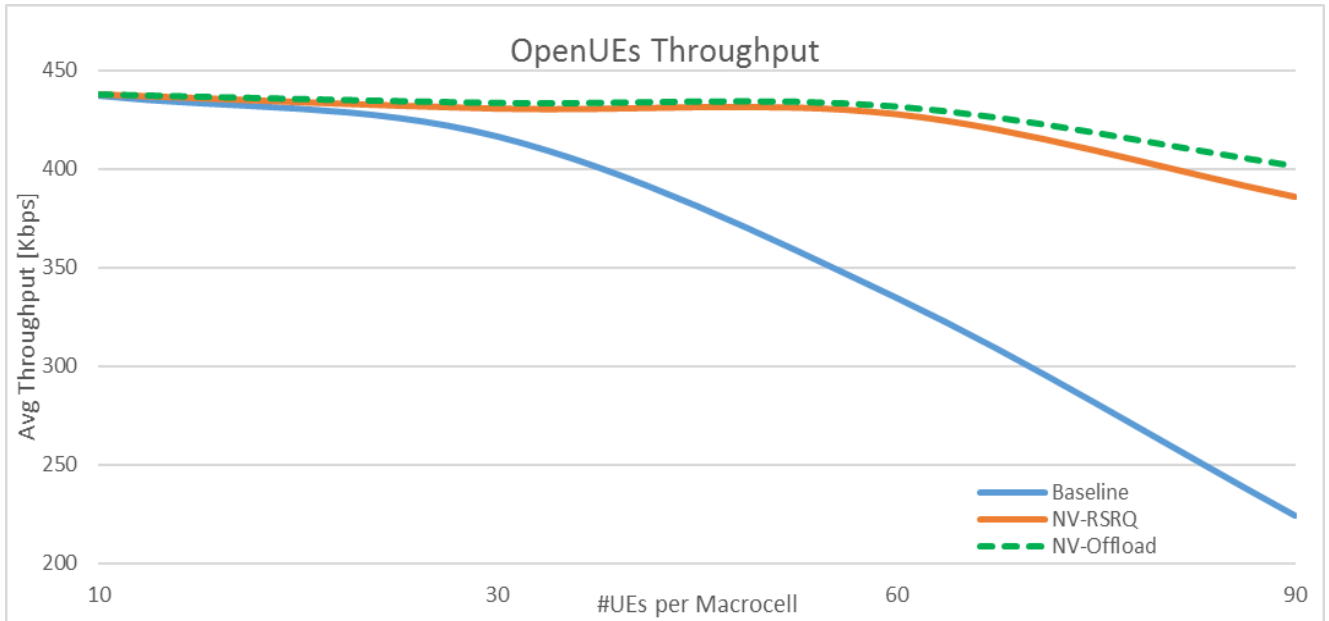
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η απόδοση από τη σκοπιά του μέσου throughput ανά χρήστη, με μονάδα μέτρησης τα Kbps, για τους εγγεγραμμένους UEs στο δίκτυο του παρόχου A που συνέχισαν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το οικιακό τους δίκτυο. Αν και στα σενάρια των 10 και 30 UEs ανά macrocell, δεν είναι εύκολα αντιληπτό, το throughput μετά τη χρήση των δύο NV αλγορίθμων είναι σε κάθε περίπτωση υψηλότερο

σε σχέση με αυτό στο baseline σενάριο. Το προαναφερθέν αποτέλεσμα προκύπτει από το γεγονός ότι κατά την εφαρμογή του RRS πρωτοκόλλου κάποιοι εκ των OpenUEs αποχώρησαν από το οικιακό τους δίκτυο, επιτρέποντας στους εναπομείναντες UEs να κάνουν χρήση περισσότερων πόρων. Για του λόγου το αληθές παρουσιάζεται το επόμενο διάγραμμα κέρδους:



Σχήμα 4.2: Κέρδη ως προς το μέσο throughput για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου A, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

Μελετώντας το Σχήμα 4.2 γίνεται ξεκάθαρο ότι οι eNBUEs έχουν καλύτερες επιδόσεις στο throughput σε σχέση με το baseline σενάριο καθώς η γραφική κέρδους λαμβάνει θετικές τιμές. Παράλληλα, είναι πλέον ευδιάκριτο ότι η χρήση RRS με τον RSRQ αλγόριθμο οδηγεί σε υψηλότερο throughput σε σχέση με τον Offload αλγόριθμο, αν και δεν μπορεί να μην σχολιαστεί το γεγονός ότι οι τιμές δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα σημαντικές αποκλίσεις. Το εν λόγω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι κατά το NV-RSRQ σενάριο καθίστατο δυνατό να αποχωρήσει από το δίκτυο του παρόχου A μεγαλύτερο πλήθος από OpenUEs σε σχέση με το NV-Offload σενάριο. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι το κέρδος στο throughput είναι μεγαλύτερο καθώς αυξάνεται το πλήθος των UEs ανά macrocell.

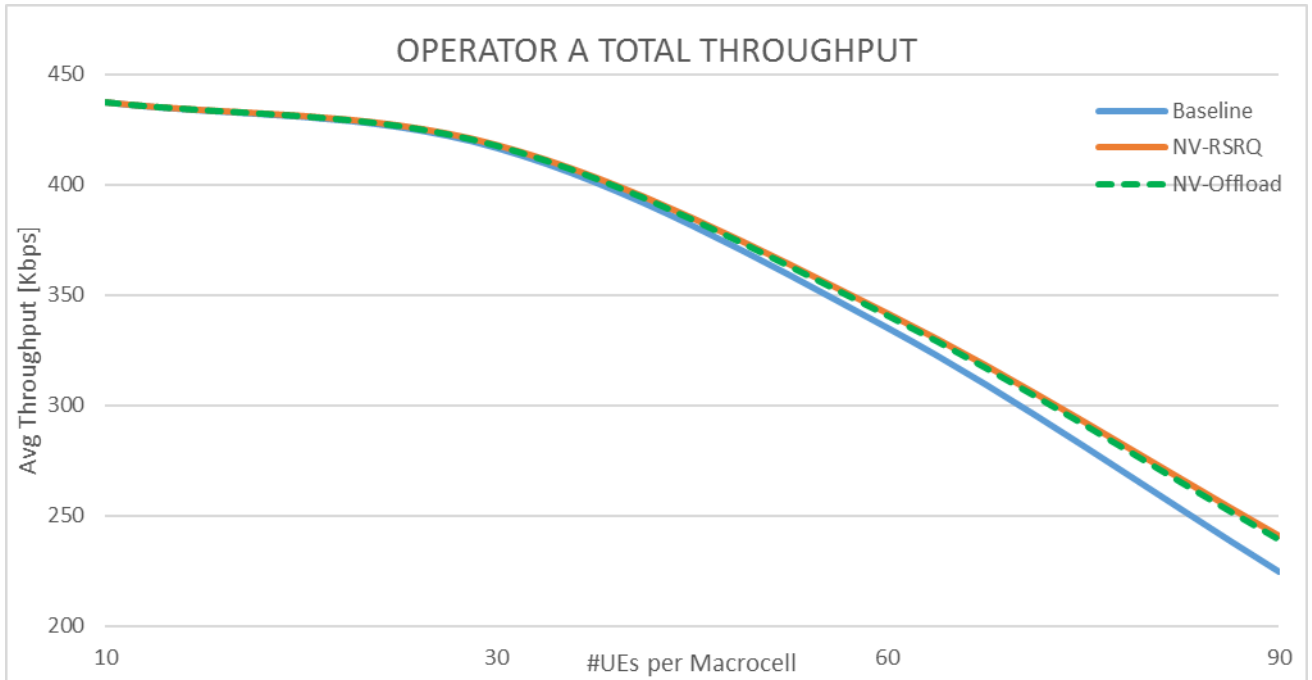


Σχήμα 4.3: Μέσω throughput για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

Εν συνεχεία, ανατρέχοντας στο Σχήμα 4.3, προκύπτει ένα ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα για την παρούσα προσομοίωση. Κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου RRS πρωτοκόλλου, παρουσιάζονται βελτιώσεις στο throughput, όχι μόνο για τους UEs που παρέμειναν στο δίκτυο του παρόχου Α, αλλά και για τους UEs που επέλεξαν να μεταβούν στα host networks των παρόχων Β και Γ. Το εν λόγω αποτέλεσμα είναι επίσης αναμενόμενο, καθώς οι OpenUEs αποχώρησαν από το οικιακό τους δίκτυο προκειμένου να απολαύσουν υπηρεσίες καλύτερου QoS. Παράλληλα, γίνεται εμφανές ότι οι OpenUEs παρουσιάζουν εντυπωσιακή αύξηση στο λαμβανόμενο throughput σε σχέση με το baseline σενάριο αλλά και σε σχέση με αυτό των eNBUEs, η οποία αγγίζει το 78,9%. Το κέρδος στο throughput, μάλιστα, φαίνεται να αυξάνεται όλο και περισσότερο καθώς αυξάνεται το πλήθος των χρηστών στο δίκτυο του παρόχου Α. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στο Σχήμα 4.2 αναφορικά με τους eNBUEs, αν και στην περίπτωση του NV-RSRQ σεναρίου οι OpenUEs παρουσιάζουν σχεδόν 12-πλάσιο κέρδος και στην περίπτωση του NV-Offload σεναρίου σχεδόν 15-πλάσιο.

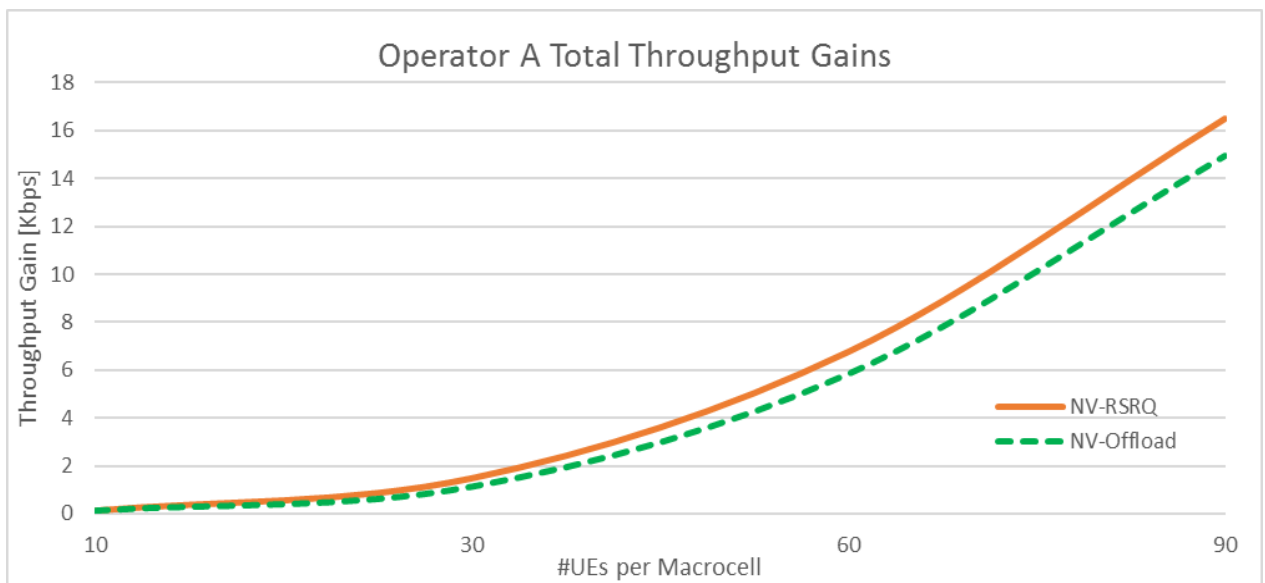
Παρατηρώντας το Σχήμα 4.1 και σχήμα 4.3, διαπιστώνουμε ότι αυξανόμενου του πλήθους των χρηστών ανά macrocell, το throughput στο baseline σενάριο μειώνεται σημαντικά, ακολουθώντας πτώση που αγγίζει έως και το 48,6%, καθώς οι UEs του παρόχου Α χρειάζεται να ανταγωνίζονται όλο και περισσότερο για τους πόρους του δικτύου. Το εν λόγω γεγονός κάνει την εφαρμογή του προτεινόμενου RRS πρωτοκόλλου να φαντάζει όλο και πιο επιτακτική, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση σε καταστάσεις φόρτου, τόσο για τους χρήστες που εγκαταλείπουν το δίκτυο, όσο και γι' αυτούς που παραμένουν.

Στρέφοντας την προσοχή μας και πάλι στο Σχήμα 4.3, παρατηρούμε ότι, αν και για τα δύο πρώτα σενάρια των 10 και 30 UEs, οι RSRQ και Offload αλγόριθμοι έχουν πολύ κοντινές αποδόσεις ως προς το throughput, η «ψαλίδα» ανοίγει στην πορεία, με τον Offload αλγόριθμο να επιδεικνύει καλύτερα αποτελέσματα για τους OpenUEs. Η εν λόγω συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι κατά το NV-RSRQ σενάριο οι UEs που πραγματοποίησαν NV-HO προς τα δίκτυα των παρόχων Β και Γ είναι περισσότεροι και ως εκ τούτου ο ανταγωνισμός για τους πόρους στα host networks αυξάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το NV-Offload σενάριο.



Σχήμα 4.4: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου A, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

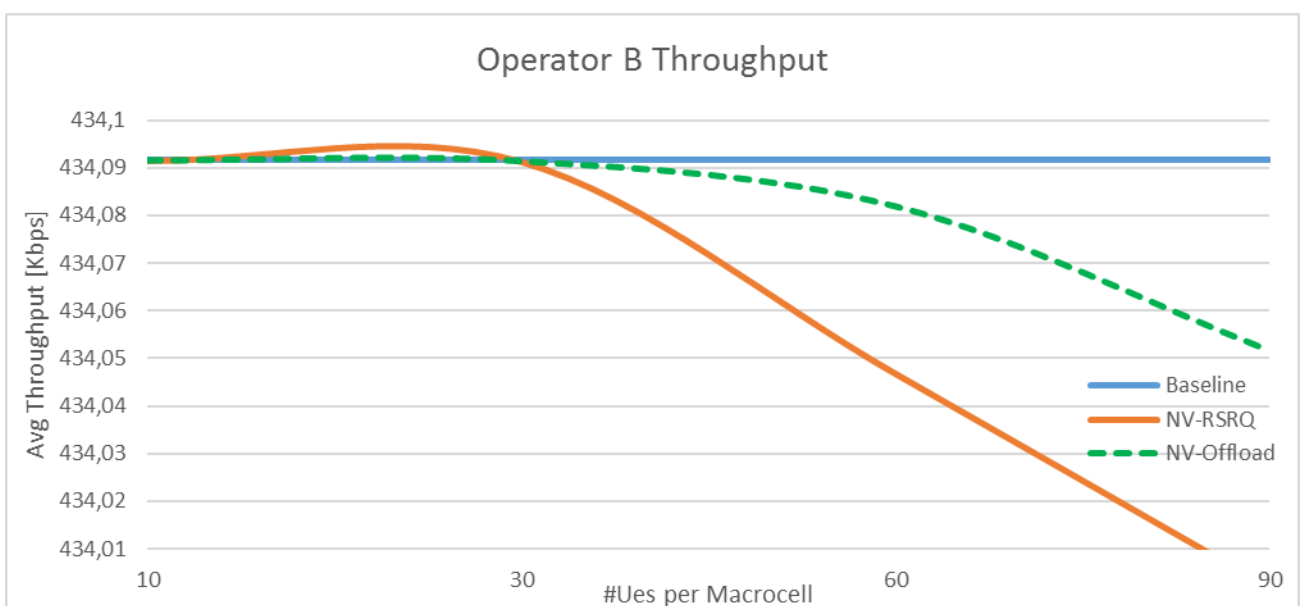
Εξετάζοντας την απόδοση ως προς το throughput για το σύνολο των UEs που ανήκουν στον πάροχο A, ανεξαρτήτως του αν έκαναν χρήση των OpenUE δυνατοτήτων τους ή απλά συνέχισαν να εξυπηρετούνται από τον οικιακό τους πάροχο, διαπιστώνουμε ότι και στα δύο NV σενάρια οι επιδόσεις είναι καλύτερες σε σχέση με το baseline σενάριο. Επιπρόσθετα, από το σενάριο των 60UEs και έπειτα, είναι ευδιάκριτο ότι ο RSRQ αλγόριθμος υπερτερεί του Offload, το οποίο καθίσταται περισσότερο εμφανές μέσω του επόμενου γραφήματος κέρδους:



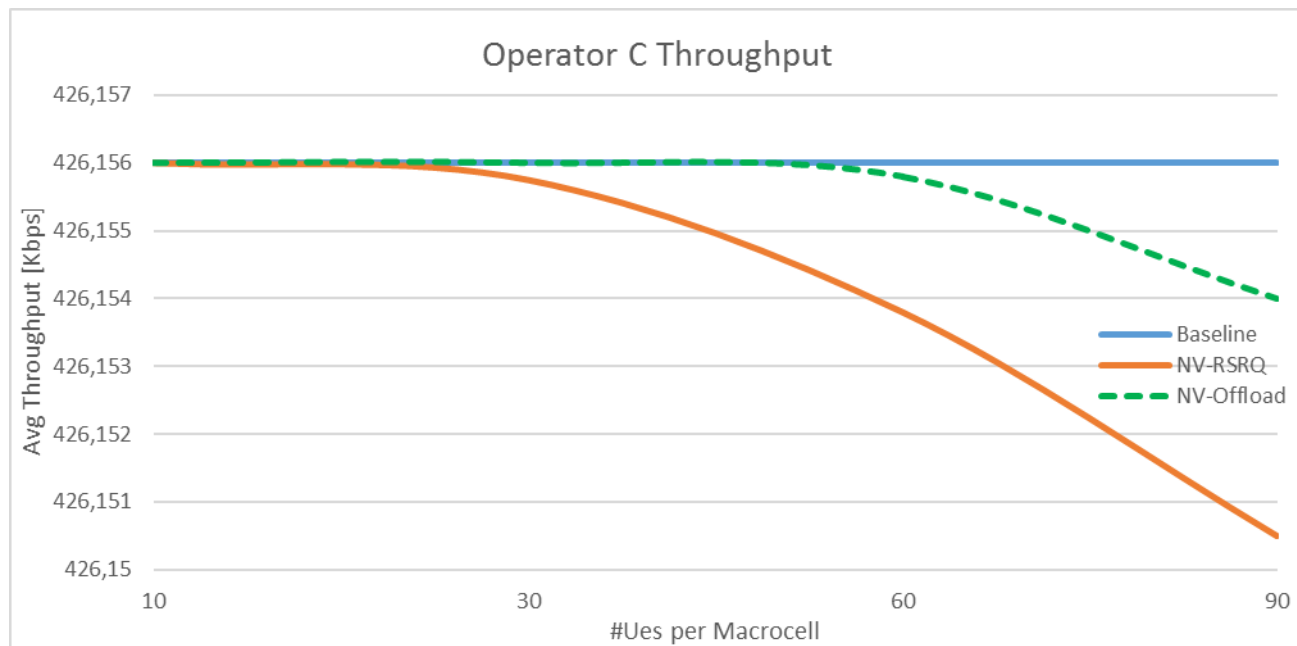
Σχήμα 4.5: Κέρδη ως προς το μέσο throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου A, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

Με βάση το Σχήμα 4.5 διαπιστώνεται ότι η διαφορά στην απόδοση των δύο αλγορίθμων είναι μικρή και κινείται κοντά στο 1 Kbps. Ωστόσο, το δεδομένο αποτέλεσμα είναι απόρροια της τοπολογίας δικτύου που επιλέχθηκε. Πιο συγκεκριμένα, αν ήταν εφικτό να θεωρηθεί περισσότερος εξοπλισμός από HeNBs και WiFi APs, τότε όλο και περισσότεροι OpenUEs θα εκκινούσαν NV-HOs και ως εκ τούτου θα απελευθερώνονταν όλο και μεγαλύτερα ποσοστά πόρων στο δίκτυο του παρόχου Α. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά των δύο αλγορίθμων ως προς την απόδοση θα μεγάλωνε, με τον RSRQ να αποδεικνύεται πολύ πιο αποδοτικός.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη γύρω από το throughput, καθίσταται απαραίτητο να εξεταστεί η επιβάρυνση που μπορεί να επιφέρει, η εφαρμογή του προτεινόμενου RRS πρωτοκόλλου στα host networks. Παρατηρώντας τα Σχήματα 4.6 και 4.7, γίνεται φανερό ότι κατά τη χρήση των δύο NV σεναρίων, το μέσο throughput των χρηστών στα δίκτυα των παρόχων Β και Γ έχει υποστεί μειώσεις. Το εν λόγω αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, καθώς η μεταπομπή των OpenUEs οδήγησε σε αύξηση της ζήτησης δικτυακών πόρων στα host networks. Επιπλέον, παρατηρείται ότι καθώς το πλήθος των UEs ανά κυψέλη αυξάνεται, το μέσο throughput στα δίκτυα Β και Γ μειώνεται περισσότερο, αποτέλεσμα το οποίο πηγάζει από το γεγονός ότι αυξανόμενου του πλήθους των UEs ανά macrocell, αυξάνεται επίσης και το πλήθος των UEs που επιθυμούν να εκτελέσουν NV-HOs προς τα δίκτυα άλλων παρόχων. Ωστόσο, μελετώντας προσεκτικότερα τα παρακάτω διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι η εν λόγω μείωση είναι εξαιρετικά μικρή, και πιο συγκεκριμένα της τάξης του δευτέρου δεκαδικού ψηφίου για τους UEs του παρόχου Β και του τρίτου δεκαδικού ψηφίου για τους UEs του παρόχου Γ. Δεδομένου ότι το δίκτυο του παρόχου Γ αποτελείται από WiFi APs, τα οποία συνιστούν σταθμούς βάσης μικρότερης ισχύος συγκριτικά με τα HeNBs, είναι αναμενόμενο να προσελκύει λιγότερους OpenUEs και ως αποτέλεσμα οι μειώσεις στο μέσο throughput είναι ακόμη μικρότερες. Τα παραπάνω εξαγόμενα αποκτούν εξέχουσα σημασία, αν ανατρέχοντας στο Σχήμα 4.3 θυμηθούμε ότι τα κέρδη στο throughput για τους OpenUEs είναι εντυπωσιακά υψηλά.



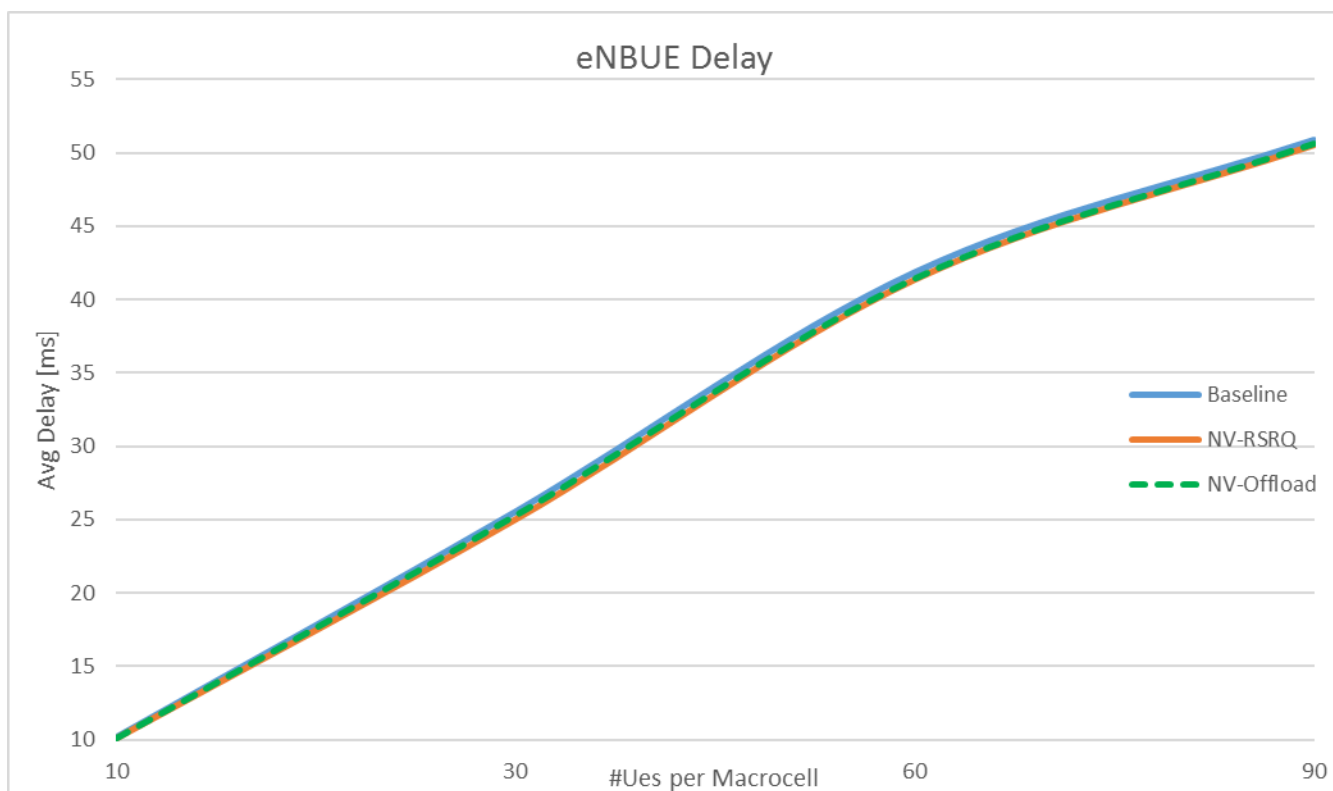
Σχήμα 4.6: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου Β, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης



Σχήμα 4.7: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

Συμπερασματικά, κατά χρήση της RRS υπηρεσίας, επιτεύχθηκε αύξηση του μέσου throughput των UEs που συνέχισαν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το δίκτυο του παρόχου Α, καθώς η ζήτηση για ράδιο-πόρους μειώθηκε, επιτρέποντας στους εναπομείναντες UEs να τους αξιοποιήσουν προκειμένου να επιτύχουν υψηλότερες αποδόσεις. Παρόλα αυτά, για τους OpenUEs που επέλεξαν να μεταβούν στα δίκτυα των παρόχων Β και Γ, κρίνοντας ότι οι συνθήκες στα host networks είναι ευνοϊκότερες, σημειώθηκε εντυπωσιακή αύξηση του μέσου throughput. Το πλέον σημαντικό εξαγόμενο, ωστόσο, είναι το γεγονός ότι το «αντίτιμο» για τα προαναφερθέντα κέρδη είναι μηδαμινό σε σχέση με αυτά, καθώς η μείωση του μέσου throughput στα host networks κινείται από μηδενικά έως πολύ μικρά επίπεδα. Κατά συνέπεια, οι επιδόσεις των UEs στα δίκτυα των παρόχων Β και Γ δεν επηρεάστηκαν παρά μόνον ελάχιστα, σε βαθμό που δεν μπορεί να γίνει αντιληπτός κατά την εμπειρία χρήσης.

Εν συνεχεία, η μελέτη εστιάζεται στη δεύτερη μετρική απόδοσης, που εξετάστηκε κατά την παρούσα προσομοίωση, αυτή της μέσης από άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης. Τα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουν την εικόνα της εν λόγω παραμέτρου, όπως διαμορφώθηκε σε καθένα από τα εξεταζόμενα σενάρια.



Σχήμα 4.8: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου A, αυξανομένου του φόρτου κυψέλης

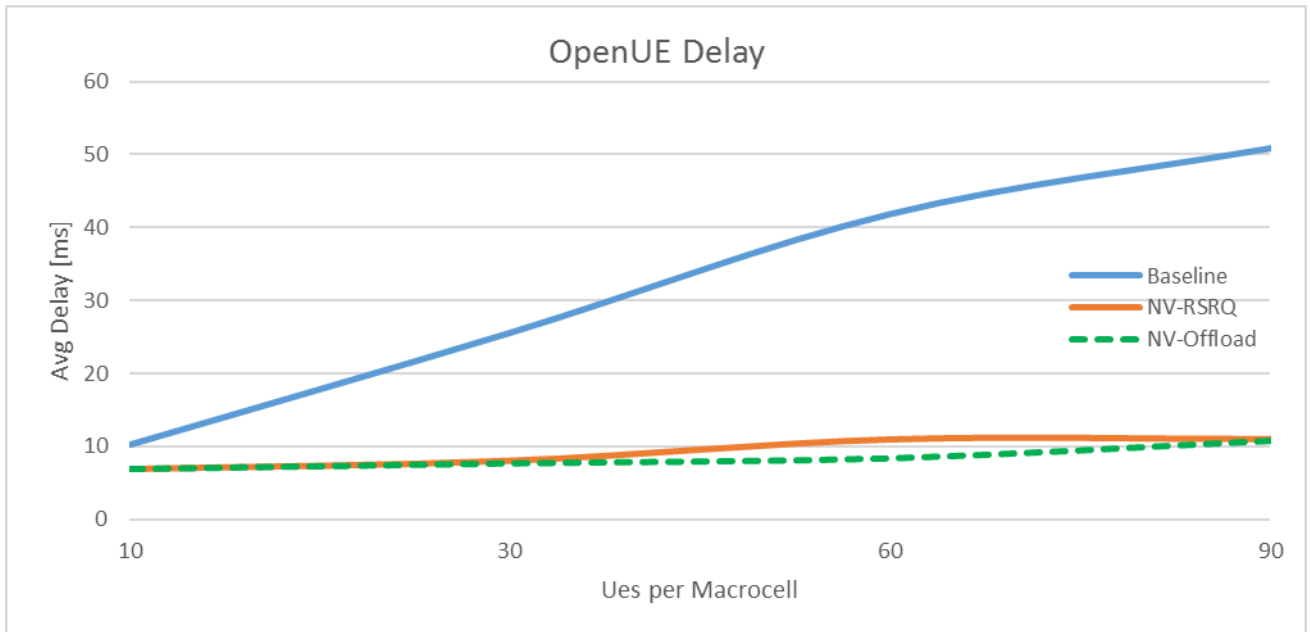
Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η μέση καθυστέρηση για τους eNBUEs του παρόχου A, μετρημένη σε ms, όπως διαμορφώθηκε με βάση τους δύο NV αλγορίθμους. Διαπιστώνεται ότι οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο αλγορίθμων, αλλά και σε σχέση με το baseline σενάριο, δεν είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτες. Για το λόγο αυτό παρατίθεται ο βοηθητικός Πίνακας 4.3.

Πίνακας 4.3: Κέρδη ως προς τη μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου A, αυξανομένου του φόρτου κυψέλης

eNBUE Delay [ms]		
Baseline	NV-RSRQ	NV-Offload
10,22675	10,1335	10,1335
25,583	25,0595	25,297
41,8805	41,4015	41,4095
50,892	50,5675	50,5845

Με βάση τις τιμές που εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι η εφαρμογή της RRS υπηρεσίας ευνόησε τους eNBUEs, τόσο στην περίπτωση του NV-RSRQ σεναρίου, όσο και στην περίπτωση του NV-Offload. Παρατηρούμε ότι η μέση από άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση μειώνεται στα δύο NV σενάρια σε σχέση με το

baseline και μάλιστα στο NV-RSRQ οι επιδόσεις είναι καλύτερες. Τα εν λόγω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, καθώς η αποχώρηση των OpenUEs από το οικιακό τους δίκτυο οδήγησε στη μείωση του φόρτου ανά κυψέλη, η οποία με τη σειρά της συνέβαλε στην καλύτερη διαχείριση των ροών δεδομένων από τους χρονοπρογραμματιστές πακέτων των eNBs, επιτρέποντας τελικά στους eNBUEs να λαμβάνουν δεδομένα ταχύτερα.

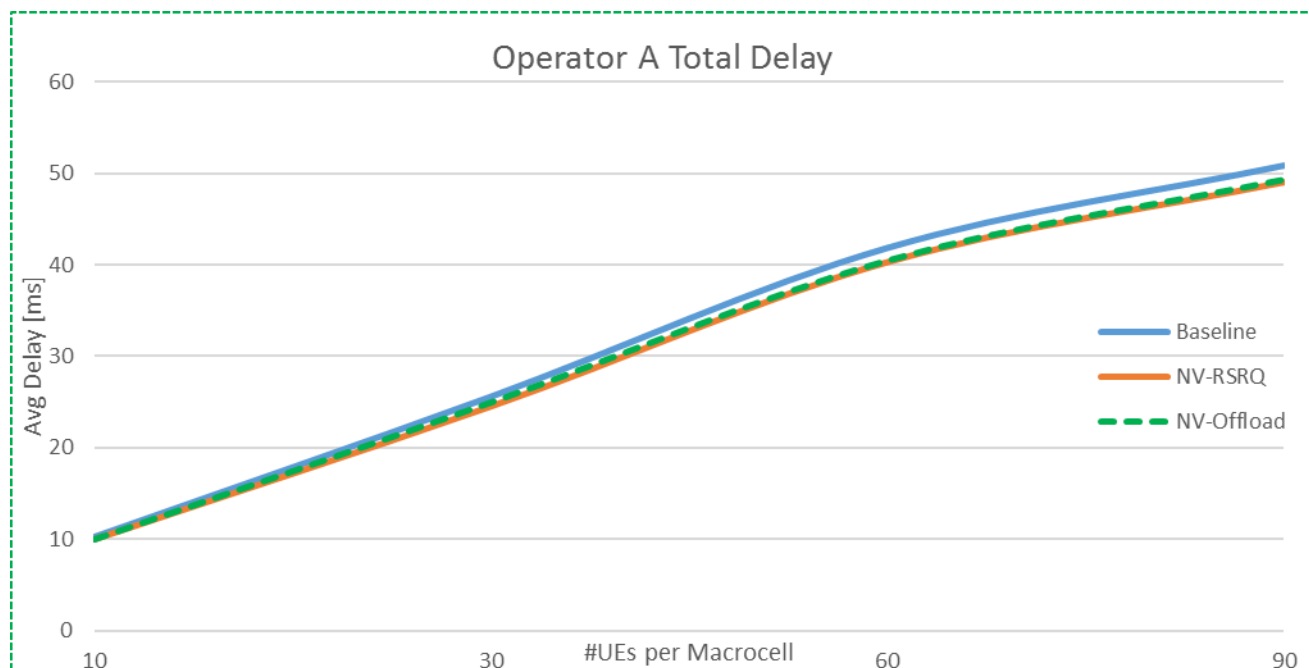


Σχήμα 4.9: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

Εν συνεχεία, εξετάζοντας το Σχήμα 4.9, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για τους UEs που επέλεξαν να εξυπηρετηθούν από τα δίκτυα των παρόχων Β και Γ είναι εξίσου εντυπωσιακά σε σχέση με αυτά που παρουσίασαν για τη μετρική του throughput. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο RRS πρωτόκολλο επιτεύχθηκε μείωση στη μέση καθυστέρηση έως και 78,8% με τον Offload αλγόριθμο και έως 78,4% με τον RSRQ αλγόριθμο. Το εν λόγω αποτέλεσμα προκύπτει από το γεγονός ότι οι OpenUEs, μέσω της χρήσης της RRS υπηρεσίας, αξιοποίησαν την ευκαιρία να εξυπηρετηθούν από πλησιέστερους σε αυτούς σταθμούς βάσης. Ως εκ τούτου, μειώνοντας την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και UE επιτυγχάνεται μείωση στην καθυστέρηση διάδοσης. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι οι σταθμοί που απαρτίζουν τα host networks είναι λιγότερο επιβαρυνμένοι σε σχέση με τους eNBs, συνεισφέρει εξίσου σημαντικά στον ταχύτερο χρονοπρογραμματισμό των πακέτων με προορισμό τους OpenUEs. Αν και οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα δύο NV σενάρια είναι εξαιρετικά μικρές, παρατηρείται ότι με τη χρήση του Offload αλγορίθμου οι χρόνοι καθυστέρησης είναι καλύτεροι, καθώς η προσέλευση χρηστών προς τα host networks είναι μικρότερη και ως εκ τούτου και η επιβάρυνση των δικτύων.

Εστιάζοντας περισσότερο στο baseline σενάριο διαπιστώνουμε ότι, όσο αυξάνεται το πλήθος των εξυπηρετούμενων από τον πάροχο Α UEs, τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιβάρυνση στη μέση καθυστέρηση, η οποία φαίνεται σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου να 5πλασιάζεται. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή της RRS υπηρεσίας κρίνεται σημαντική προκειμένου να βελτιώσει τη μέση καθυστέρηση τόσο για τους UEs που επέλεξαν να

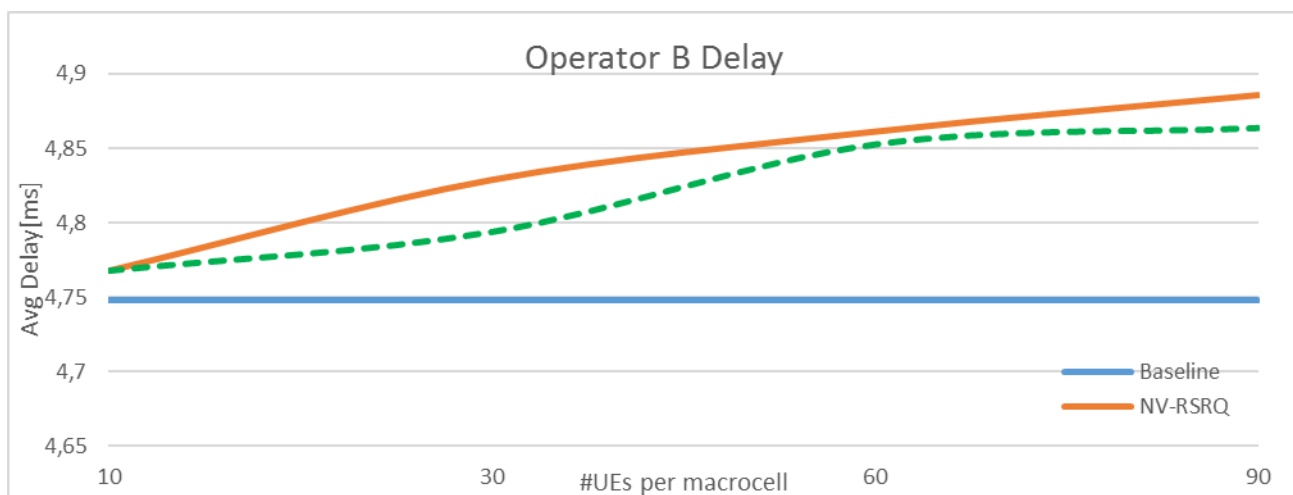
αποχωρήσουν από το δίκτυο του παρόχου A, όσο και γι' αυτούς συνεχίζουν να εξυπηρετούνται από αυτό.



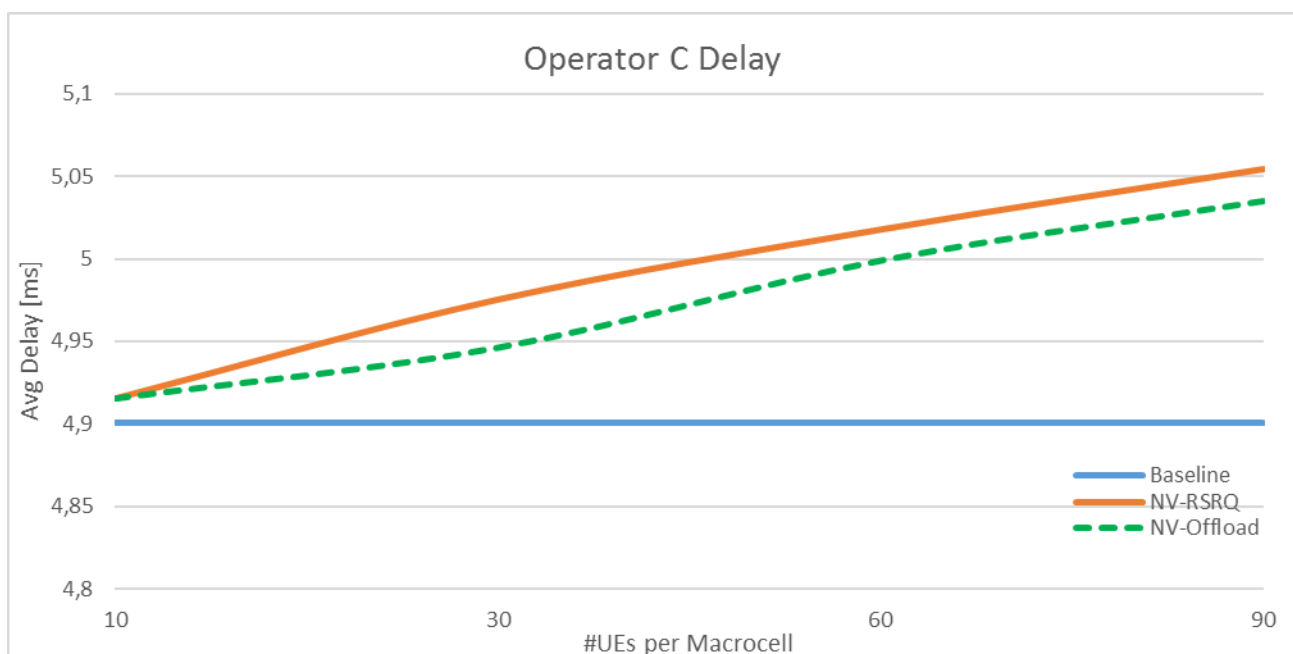
Σχήμα 4.10: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου A, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η συνολική εικόνα της μέσης από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης για τους UEs του παρόχου A. Αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης γίνονται περισσότερο εμφανή τα θετικά αποτελέσματα που επιφέρει ο διαμοιρασμός πόρων μεταξύ των παρόχων, με τον RSRQ αλγόριθμο να αποδεικνύεται ελαφρώς καλύτερο.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη σε σχέση με την παράμετρο της καθυστέρησης, ανατρέχουμε στα Σχήματα 4.11 και 4.12 προκειμένου να εντοπίσουμε τις επιπτώσεις που επέφερε η χρήση της RRS υπηρεσίας για τους UEs των host networks. Όπως ήταν αναμενόμενο, η μέση καθυστέρηση τόσο για τους χρήστες του δικτύου B όσο και για τους χρήστες του δικτύου Γ εμφανίζει αύξηση, η οποία, ωστόσο, είναι αναλογικά πολύ μικρή σε σχέση με τα οφέλη των χρηστών του δικτύου A. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η επιβάρυνση για το δίκτυο του παρόχου B είναι μόλις 2,43%, ενώ για το δίκτυο του παρόχου Γ 2,74%.



Σχήμα 4.11: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Β, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης



Σχήμα 4.12: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Γ, αυξανόμενου του φόρτου κυψέλης

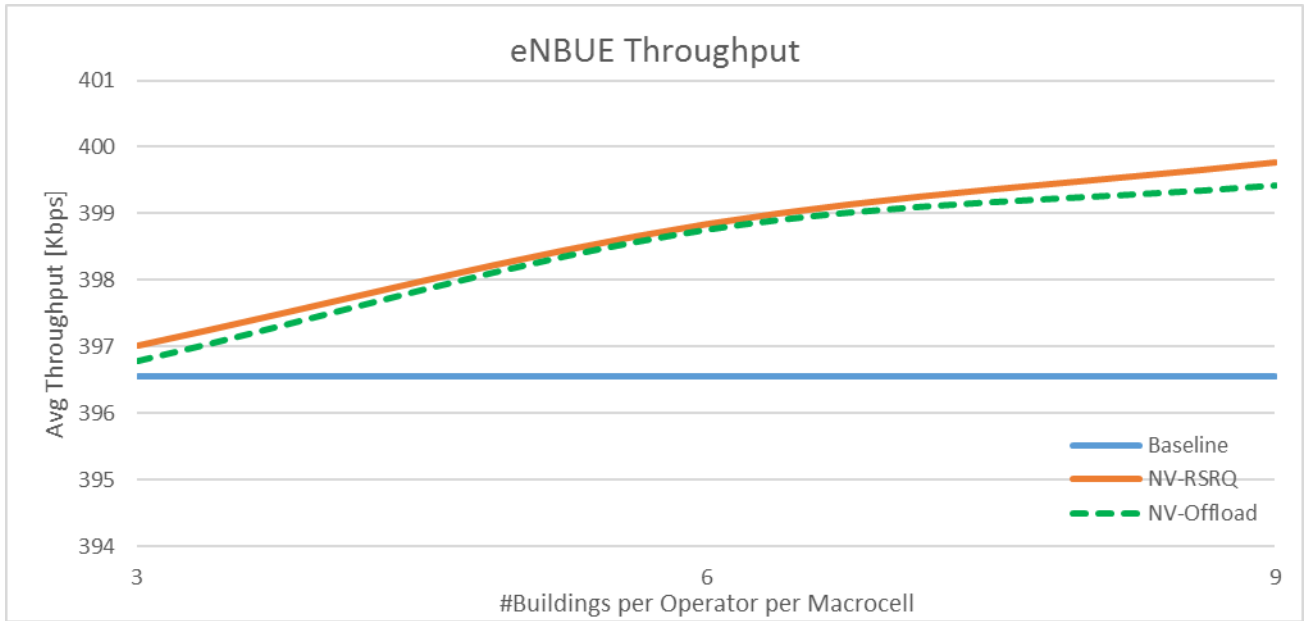
Συνοψίζοντας, μέσω της χρήσης της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας επιτυγχάνεται εντυπωσιακά υψηλότερη απόδοση τόσο ως προς το μέσο throughput, όσο και ως προς τη μέση καθυστέρηση για τους UEs του παρόχου Α που επιλέγουν να εξυπηρετηθούν από τα δίκτυα των παρόχων Β και Γ. Ωστόσο, ωφελημένοι, αν και σε μικρότερο βαθμό, αποδεικνύονται και οι UEs που συνεχίζουν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το οικιακό τους δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση το όφελος για τους UEs του παρόχου Α επιτυγχάνεται εις βάρος της απόδοσης των UEs των δύο host networks. Το εν λόγω «τίμημα», ωστόσο, αποδεικνύεται ήσσονος σημασίας συγκρινόμενο με τα αποκομίζοντα κέρδη. Αναφορικά με τους δύο αλγορίθμους της NV-Trigging φάσης, αν και με τη χρήση του RSRQ επιτυγχάνονται υψηλότερες επιδόσεις για το σύνολο των UEs του παρόχου Α, οι διαφοροποιήσεις του σε σχέση με τα αποτελέσματα μετά τη χρήση του Offload αλγορίθμου, είναι ιδιαίτερα μικρές.

4.4 Μέρος Β - Προσομοίωση με μεταβαλλόμενη πυκνότητα δικτύου

Το δεύτερο και τελευταίο μέρος της παρούσας προσομοίωσης έχει ως στόχο να εξετάσει την απόδοση των χρηστών ενός δικτύου, το οποίο κάνει χρήση της υπηρεσίας RRS με device-centric προσέγγιση, σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόδοση που θα παρουσίαζαν αν εξυπηρετούνταν μόνο από τον οικιακό τους πάροχο. Η εν λόγω μελέτη αναπτύσσεται σε σχέση με την αύξηση του πλήθους του εξοπλισμού HeNB και WiFi AP και ως εκ τούτου του πλήθους των κτηρίων ανά κυψέλη. Όπως και στο πρώτο μέρος, πραγματοποιείται προσομοίωση του ίδιου δικτύου μέσω τριών σεναρίων:

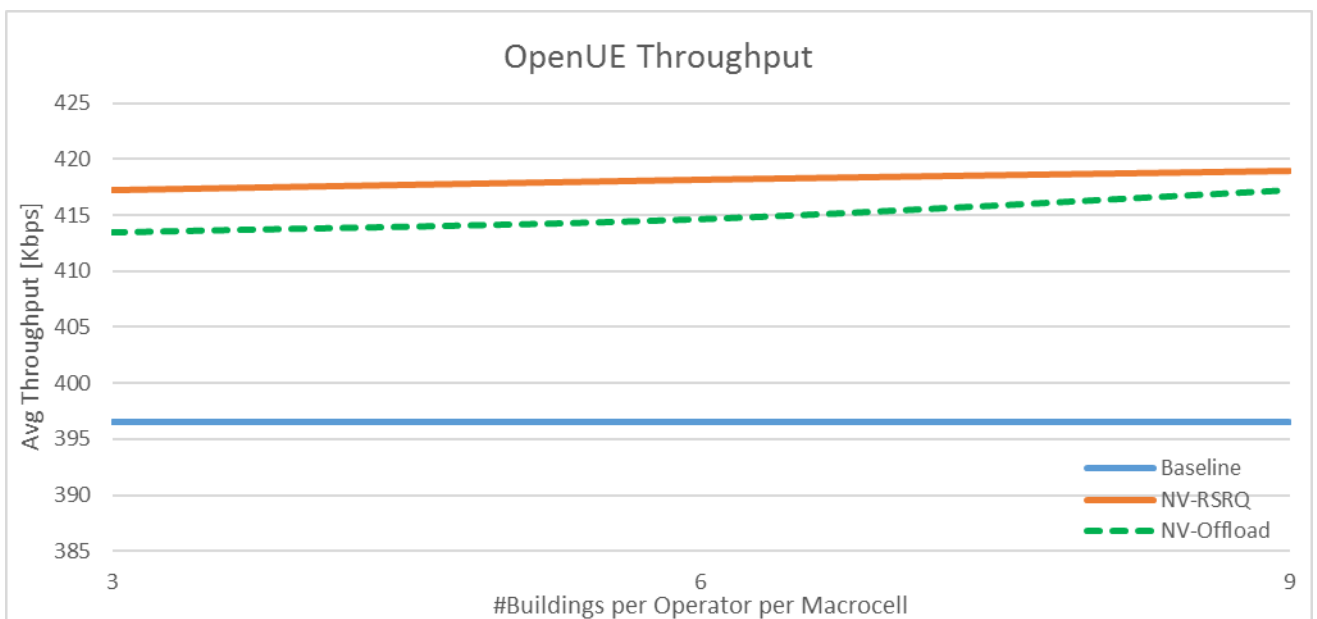
- **Baseline:** Στο παρόν σενάριο δεν γίνεται χρήση της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας και ως εκ τούτου προσομοιώνεται η λειτουργία ενός τυπικού δικτύου κινητών επικοινωνιών, όπου κάθε UE μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο από το δίκτυο του παρόχου στον οποίο ανήκει.
- **NV-RSRQ:** Στο παρόν σενάριο γίνεται χρήση της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας, με τον RSRQ αλγόριθμο να επιλέγεται στο κομμάτι του NV-Triggering. Ως εκ τούτου, καθένας από τους OpenUEs του παρόχου A δύναται να εξυπηρετηθεί από τα δίκτυα των παρόχων B και Γ, εφόσον η ισχύς λαμβανόμενου σήματος από τους σταθμούς των host networks είναι μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών του home network.
- **NV-Offload:** Στο παρόν σενάριο γίνεται χρήση της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας, με τον Offload αλγόριθμο να επιλέγεται στο κομμάτι του NV-Triggering. Ως εκ τούτου, καθένας από τους OpenUEs του παρόχου A δύναται να εξυπηρετηθεί από τα δίκτυα των παρόχων B και Γ, εφόσον η ισχύς λαμβανόμενου σήματος από τους σταθμούς των host networks είναι μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών του home network και παράλληλα ο φόρτος κυψέλης έχει ξεπεράσει το κατώφλι που τίθεται από τον πάροχο A. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως τιμή κατωφλίου το 95%.

Καθένα από τα προαναφερθέντα σενάρια εκτελέστηκε μεταβάλλοντας το πλήθος των κτηρίων των παρόχων B και Γ. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι σε κάθε υπό-σενάριο θεωρήθηκαν ισάριθμα κτήρια για τους δύο παρόχους. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη προσομοίωση θεωρήθηκαν 3 κτήρια για το δίκτυο του παρόχου B και 3 κτήρια για το δίκτυο του παρόχο Γ ανά macrocell, ενώ στα επόμενα υπό-σενάρια το πλήθος μεταβλήθηκε σε 6 και 9 (άξονας χ των διαγραμμάτων). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα σενάρια το πλήθος των UEs του παρόχου A παραμένει σταθερό - 40 UEs ανά κυψέλη.



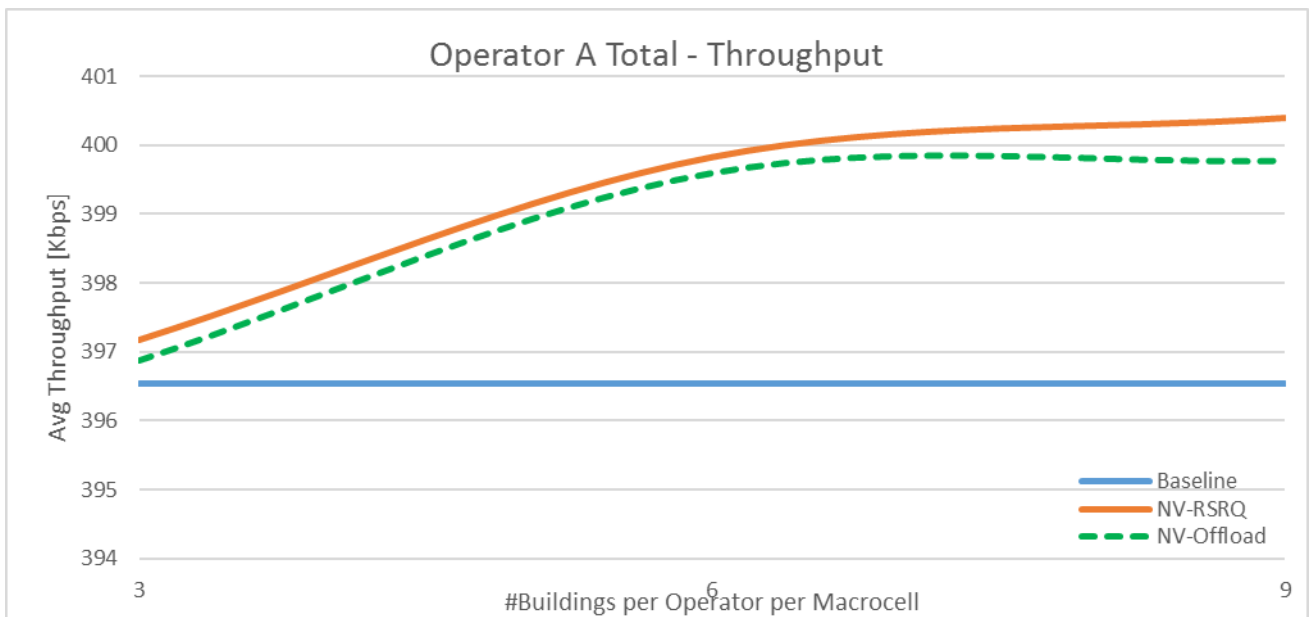
Σχήμα 4.13: Μέσω throughput για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου Α, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται η γραφική της απόδοσης ως προς το throughput για τους eNBUEs του παρόχου Α. Παρατηρούμε ότι η εφαρμογή των RRS σεναρίων επέφερε κέρδη για τους χρήστες, τα οποία μάλιστα αυξάνονται όσο αυξάνεται το πλήθος των κτηρίων και ως εκ τούτου ο δικτυακός εξοπλισμός των παρόχων Β και Γ. Το εν λόγω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς όσο αυξάνεται η πυκνότητα των femtocells και των WiFi APs, τόσο αυξάνονται και οι πιθανότητες ένας UE του παρόχου Α να εντοπίσει κάποιον σταθμό με υψηλότερη ισχύ σήματος και συνεπώς να εκκινήσει διαδικασίες NV-HO, απελευθερώνοντας τελικά πόρους τους οποίους μπορούν να αξιοποιήσουν οι εναπομείναντες UEs. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι αν και οι αποκλίσεις των τιμών μεταξύ των αλγορίθμων RSRQ και Offload είναι ιδιαίτερα μικρές, ο RSRQ παρουσιάζει καλύτερη απόδοση για τους ίδιους λόγους που παρατέθηκαν στο πρώτο μέρος της προσομοίωσης.



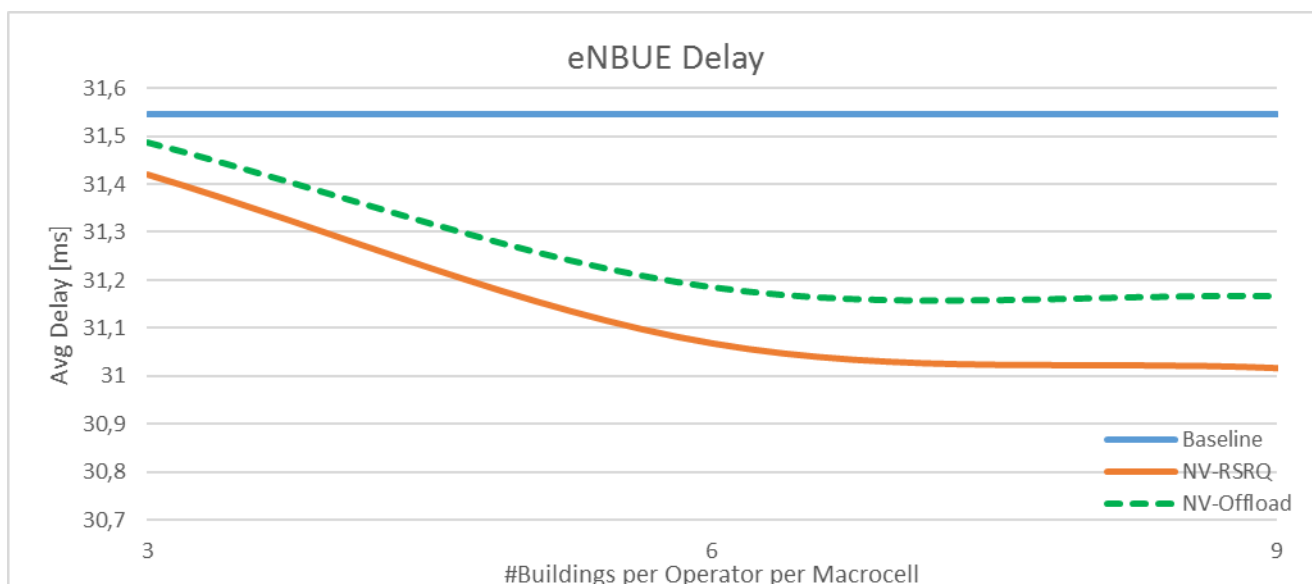
Σχήμα 4.14: Μέσω throughput για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου

Καλύτερες επιδόσεις ως προς το throughput, δεν σημειώνονται μόνο για τους eNBUEs, αλλά επίσης και για τους OpenUEs, οι οποίες μάλιστα εμφανίζονται συγκριτικά υψηλότερες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Πιο συγκεκριμένα, για τους OpenUEs επιτυγχάνεται σχεδόν 7-πλάσιο κέρδος σε σχέση με αυτό των UEs που συνέχισαν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το δίκτυο του παρόχου A. Παράλληλα, πρέπει να σημειώσουμε ότι και οι δυο αλγόριθμοι οδηγούν σε υψηλότερο throughput σε σχέση με αυτό του baseline σεναρίου, το οποίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά σε σχέση με τον εξοπλισμό των host networks. Επιπλέον, γι' ακόμη μία φορά παρατηρούμε ότι οι δύο αλγόριθμοι δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, με τον RSRQ, ωστόσο, να έχει καλύτερες επιδόσεις. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι αυξανόμενων των κτηρίων παρατηρείται ότι οι γραμμές των δύο NV σεναρίων τείνουν να συναντηθούν και ως εκ τούτου να εμφανίσουν ακόμη μικρότερες διαφορές στις επιδόσεις τους.



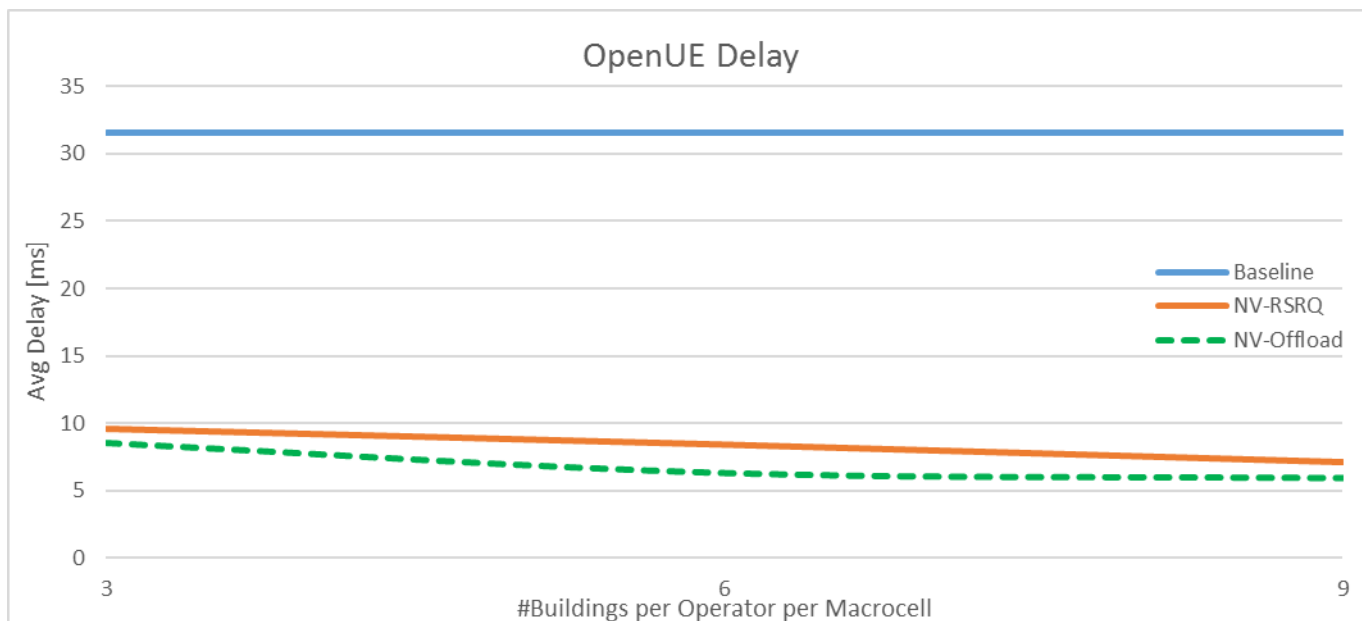
Σχήμα 4.15: Μέσω throughput για το σύνολο των UEs του Παρόχου A, αυξανόμενης της πυκνότητας δικτύου

Ανατρέχοντας στο Σχήμα 4.15 αποκτούμε μία συνολική εικόνα για το μέσο throughput των UEs του παρόχου A, όπως αυτό διαμορφώνεται μετά τη δυνατότητα των OpenUEs να εκτελέσουν NV-HOs προς σταθμούς βάσης διαφορετικών παρόχων, από τους οποίους λαμβάνουν ισχυρότερο σήμα. Διαπιστώνουμε ότι με τη χρήση της RRS υπηρεσίας επιτυγχάνονται κέρδη ως προς το μέσο throughput, τα οποία μάλιστα αυξάνονται όσο πυκνότερο γίνεται το δίκτυο των παρόχων B και Γ. Οι RSRQ και Offload αλγόριθμοι επιτυγχάνουν παραπλήσια αποτελέσματα, με τον RSRQ, ωστόσο, να υπερτερεί. Γίνεται εμφανές, μάλιστα, ότι όσο πυκνότερα καθίστανται τα host networks τόσο περισσότερο ο RSRQ τείνει να παρουσιάσει υψηλότερες επιδόσεις, ανοίγοντας την «ψαλίδα» με τον Offload αλγόριθμο. Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας σχετικά με το throughput, αξίζει να αναφερθεί ότι η επιβάρυνση στα δίκτυα των παρόχων B και Γ λόγω της κατανάλωσης δικτυακών πόρων από τους OpenUEs, είναι σχεδόν μηδενική και για το λόγο αυτό δεν παρατίθενται σχετικά διαγράμματα.

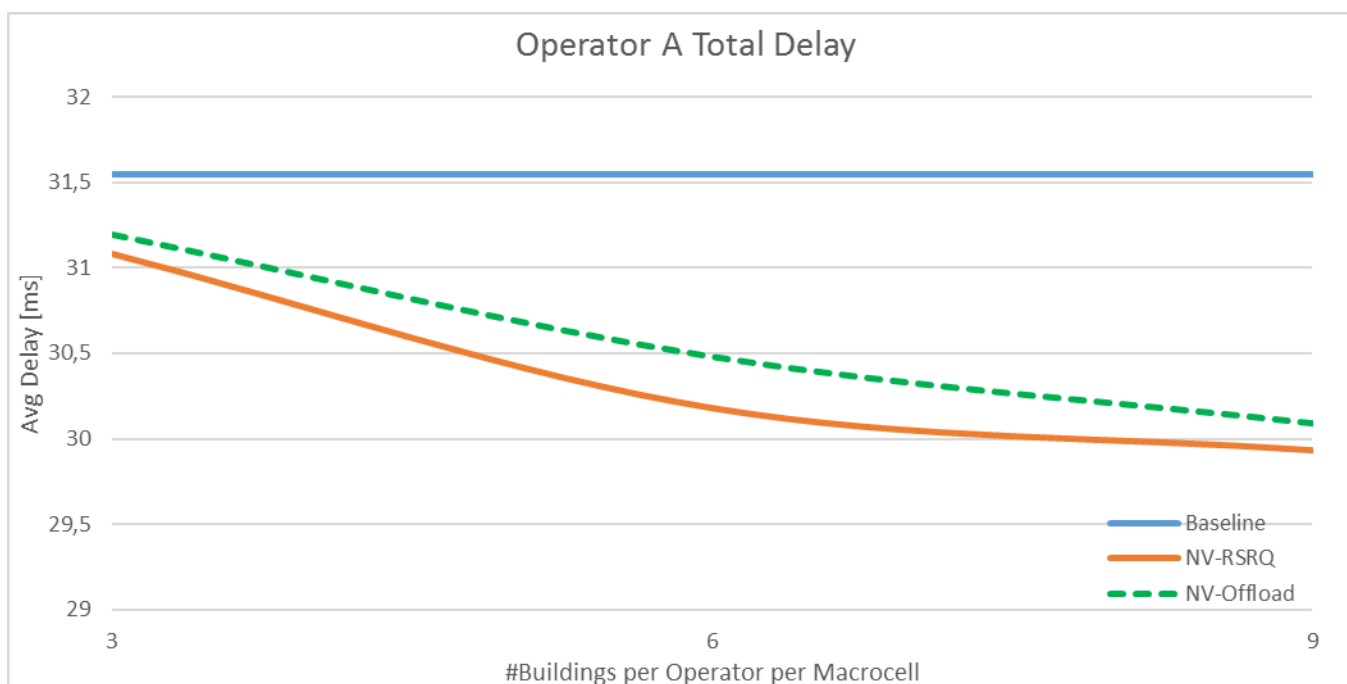


Σχήμα 4.16: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs που συνέχισαν να εξυπηρετούνται από το δίκτυο του Παρόχου Α, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου

Αναφορικά με την παράμετρο της μέσης από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης, με τη βοήθεια του Σχήματος 4.16, παρατηρούμε ότι επιτυγχάνονται κάποιες σχετικές μειώσεις για τους eNBUEs. Οι εν λόγω μειώσεις είναι ιδιαίτερα μικρές (της τάξης του πρώτου δεκαδικού ψηφίου), ωστόσο, παρουσιάζουν αυξητική τάση όσο πυκνώνουν τα δίκτυα των παρόχων Β και Γ. Αν και η εφαρμογή της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας δείχνει να μην επηρεάζει ιδιαίτερα τους eNBUs ως προς την παράμετρο της καθυστέρησης, δεν ισχύει το ίδιο και για τους OpenUEs που μετέβησαν στα δίκτυα των συνεργαζόμενων παρόχων. Το Σχήμα 4.17 φανερώνει σημαντικές μειώσεις για την μέση καθυστέρηση των OpenUEs, η οποία αγγίζει το 81% έχοντας, μάλιστα, τάση μείωσης. Παρατηρούμε ότι στο εν λόγω σενάριο ο Offload αλγόριθμος αποδεικνύεται ελαφρώς αποδοτικότερος σε σχέση με τον RSRQ, αν και οι αποκλίσεις τους είναι μικρές.

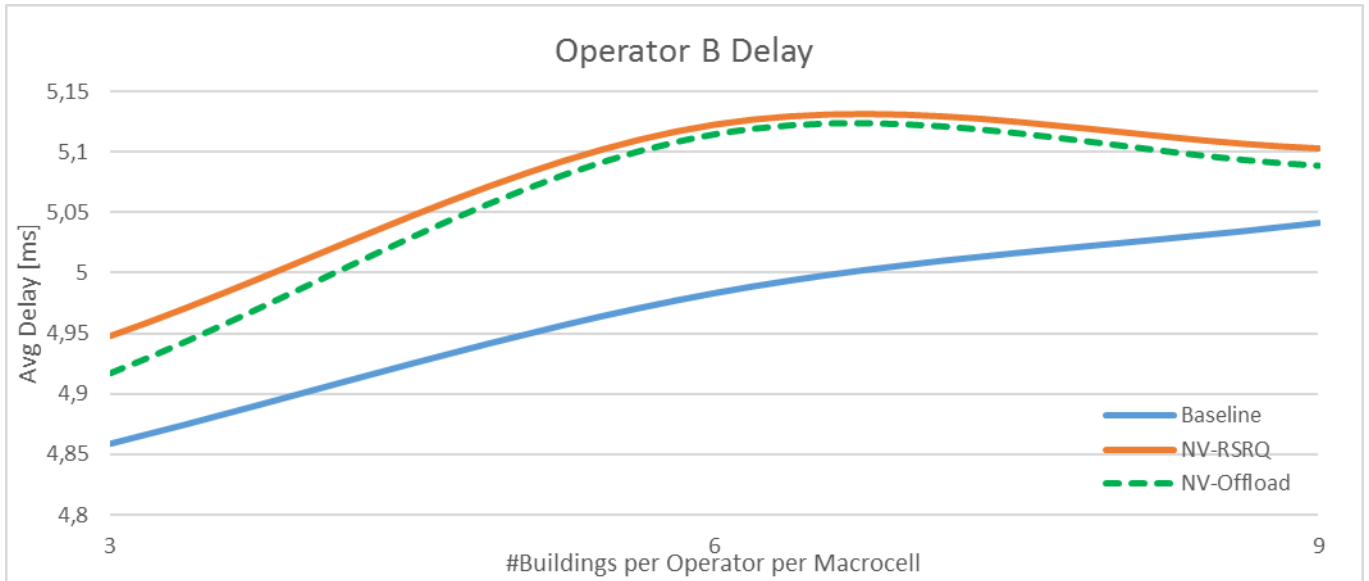


Σχήμα 4.17: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για τους UEs του Παρόχου Α που εξυπηρετήθηκαν από τα δίκτυα των Παρόχων Β και Γ, αυξανόμενης της πυκνότητας δικτύου

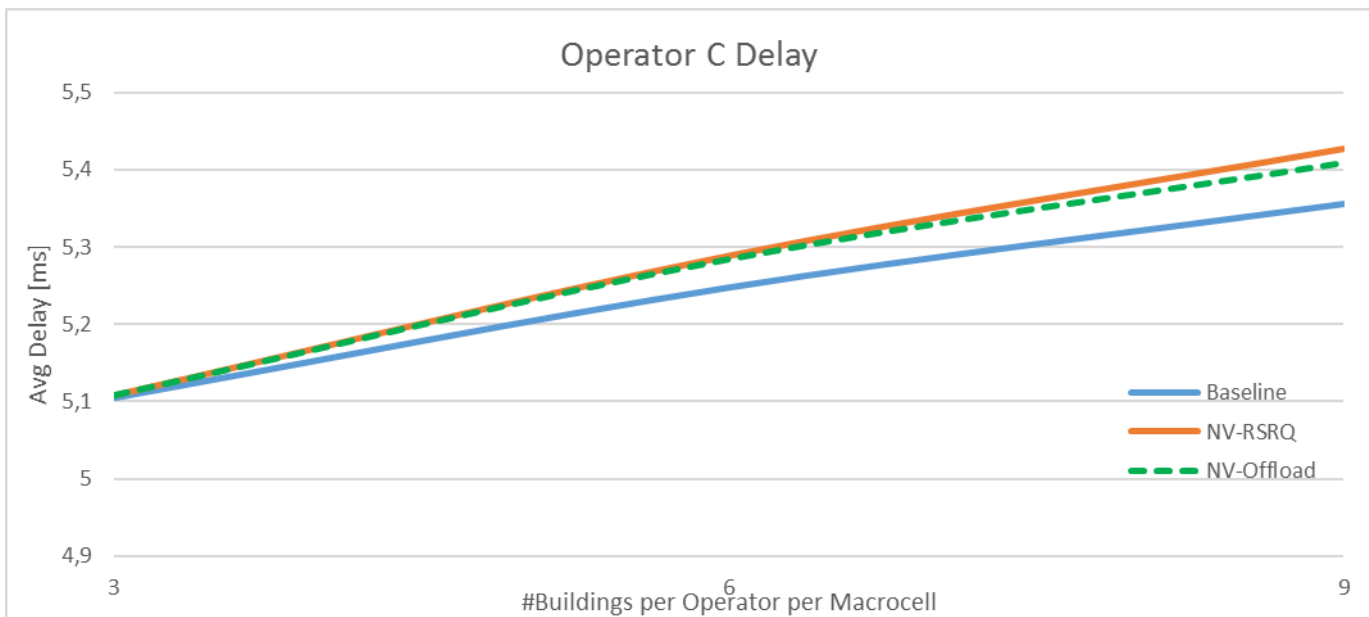


Σχήμα 4.18: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Α, αυξανόμενης της πυκνότητας δικτύου

Εξετάζοντας την επίδοση του συνόλου των UEs του παρόχου Α ως προς τη μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση, όπως γίνεται εμφανές στο Σχήμα 4.18, η εφαρμογή της προτεινόμενης RRS υπηρεσίας επιφέρει μειώσεις στην καθυστέρηση οι οποίες μάλιστα αυξάνονται όσο τα δίκτυα των παρόχων Β και Γ καθίστανται πιο πυκνά, καθώς πραγματοποιούνται περισσότερα NV-HOs. Για τον ίδιο λόγο ο RSRQ αλγόριθμος επικρατεί και πάλι έναντι του Offload, καθώς δεν θέτει περιορισμούς ως προς το πλήθος των UEs που μπορεί να μεταβεί σε κάποιο από τα host networks.



Σχήμα 4.19: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Β, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου



Σχήμα 4.20: Μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για το σύνολο των UEs του Παρόχου Γ, αυξανομένης της πυκνότητας δικτύου

Τέλος, παρατηρώντας τα Σχήματα 4.19 και 4.20 διαπιστώνουμε ότι η επιβάρυνση ως προς την μέση καθυστέρηση για τους UEs των δικτύων Β και Γ είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με τα οφέλη που παρουσιάζονται τόσο για τους OpenUEs, όσο και για το σύνολο των UEs του παρόχου Α. Η χρήση του Offload αλγορίθμου φαίνεται να επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τα δίκτυα, αν και οι αποκλίσεις των τιμών του σε σχέση με αυτές του NV-RSRQ σεναρίου είναι μηδαμινές. Επιπρόσθετα, παρατηρώντας το baseline σενάριο στα προαναφερθέντα γραφήματα, γίνεται εμφανές το γεγονός ότι αυξανόμενου του δικτυακού εξοπλισμού σημειώνεται παράλληλη αύξηση στην παράμετρο της καθυστέρησης. Το εν λόγω φαινόμενο μπορεί να αιτιολογηθεί αν αναλογιστούμε ότι η

αύξηση των σταθμών βάσης οδηγεί σε αύξηση των παρεμβολών και τελικά σε αύξηση της καθυστέρησης.

Συμπερασματικά, αν και τα σενάρια αύξησης της πυκνότητας του εξοπλισμού των host networks δεν επιδεικνύουν το ίδιο εντυπωσιακά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα σενάρια αύξησης του φόρτου κυψέλης, σε κάθε περίπτωση παρατηρούνται κέρδη ως προς το μέσο throughput και τη μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση, τόσο για τους OpenUEs όσο και για τους eNBUEs. Για μία ακόμη φορά περισσότερο ωφελημένοι αποδεικνύονται οι OpenUEs, ιδιαίτερα ως προς την παράμετρο της καθυστέρησης, ενώ παράλληλα η επιβάρυνση των UEs στα host networks είναι ανεπαισθητή.

4.5 Γενικά Συμπεράσματα Προσομοίωσης

Έχοντας ολοκληρώσει την μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας προσομοίωσης, αναγνωρίζουμε τα πολλαπλά οφέλη που μπορεί να προσφέρει η εφαρμογή της RRS υπηρεσίας με Device-centric προσέγγιση σε ένα δίκτυο 5^{ης} Γενιάς. Διαπιστώθηκε ότι η δυνατότητα που δίνεται στους χρήστες ενός δικτύου να εξυπηρετηθούν από σταθμούς βάσης γειτονικών δικτύων που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους, κατάφερε να επιτύχει βελτίωση στην απόδοση τόσο των ίδιων, όσο και των UEs που συνέχισαν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το οικιακό τους δίκτυο. Εξέχουσας σημασίας είναι το γεγονός ότι επιτυγχάνονται σημαντικά κέρδη τόσο ως προς την παράμετρο του throughput όσο και ως προς την από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση, τα οποία μπορούν να αγγίξουν το 80% για τους UEs που κάνουν χρήση των SDN δυνατοτήτων τους. Ωστόσο, αν και οι UEs που συνεχίζουν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το οικιακό τους δίκτυο, ωφελούνται σε πολύ μικρότερο βαθμό, ο συνδυασμός αύξησης του throughput και μείωσης της καθυστέρησης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση ως προς την εμπειρία χρήσης σε καταστάσεις φόρτου κυψέλης, όπου οι επιδόσεις πέφτουν κατακόρυφα.

Μελετώντας την εφαρμογή της RRS υπηρεσίας υπό δύο διαφορετικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα ως προς το φόρτο κυψέλης και ως προς την πυκνότητα σταθμών βάσης στα host networks, διαπιστώθηκε ότι αποδίδει πολύ καλύτερα σε καταστάσεις φόρτου κυψέλης, επιδεικνύοντας εντυπωσιακές βελτιώσεις ως προς τις εξεταζόμενες παραμέτρους.

Όπως είναι αναμενόμενο η εφαρμογή μιας τέτοιας υπηρεσίας προκαλεί επιβαρύνσεις τόσο ως προς το throughput όσο και ως προς καθυστέρηση, στα δίκτυα των παρόχων που «φιλοξενούνται» οι OpenUEs. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι το «τίμημα» ως προς την απόδοση που καλούνται να «πληρώσουν» οι UEs των εν λόγω δικτύων, είναι ήσσονος σημασίας συγκρινόμενο με τα αποκομίζοντα κέρδη και δεδομένου ότι δεν μπορεί να προκαλέσει εύκολα αντιληπτές επιπτώσεις στην εμπειρία χρήσης.

Τέλος, κάθε πάροχος που επιθυμεί να εφαρμόσει την RRS υπηρεσία καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε δύο αλγόριθμους για την «NV-Trigging» φάση, τον RSRQ και τον Offload. Από τη συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων, αποδείχθηκε ότι για τα σενάρια μας οι δύο αλγόριθμοι συμβαδίζουν με πολύ μικρές αποκλίσεις στις επιδόσεις τους. Παρόλα ταύτα, ο RSRQ αλγόριθμος αποδεικνύεται πιο αποδοτικός για το σύνολο των χρηστών, τόσο ως προς το throughput όσο και ως προς την καθυστέρηση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ωστόσο, παρουσιάζει το γεγονός ότι ο Offload αλγόριθμος αποδεικνύεται αποδοτικότερος από τον RSRQ για τους UEs που εγκαταλείπουν το οικιακό τους δίκτυο σε καταστάσεις φόρτου κυψέλης όταν το πλήθος κτηρίων των host networks διατηρείται σταθερό. Αντίθετα, στα σενάρια πύκνωσης των host networks, όπου το πλήθος των UEs ανά κυψέλη διατηρείται σταθερό, παρατηρούμε ότι ο RSRQ αλγόριθμος αποδίδει

καλύτερα ως προς το throughput καθώς ενεργοποιείται συχνότερα σε σχέση με τον Offload. Κατά συνέπεια, ο πάροχος κινητών επικοινωνιών θα πρέπει να μελετήσει επαρκώς τόσο την τοπολογία όσο και τον μέσο φόρτο του δικτύου του, προκειμένου να επιλέξει τον πλέον κατάλληλο για τις ανάγκες του αλγόριθμο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ολοένα αυξανόμενη χρήση κινητών συσκευών, αλλά και η ζήτηση για υπηρεσίες πολυμεσικών εφαρμογών, όπως το video αναμένεται να προκαλέσουν έκρηξη στην κίνηση δεδομένων και συνεπώς να οδηγήσουν σε δυσβάσταχτο φόρτο τα σημερινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Ως εκ τούτου, η μετάβαση προς τα δίκτυα πέμπτης γενιάς κρίνεται απαραίτητη.

Στα πλαίσια επίτευξης των απαιτήσεων που τίθενται για τα 5G δίκτυα, εγείρεται η ανάγκη για όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των δικτυακών πόρων. Εστιάζοντας σε αυτή την προσέγγιση, μελετάται ο σχεδιασμός μίας υπηρεσίας διαμοιρασμού ράδιο-πόρων μεταξύ διαφορετικών δικτυακών παρόχων. Μέσω μίας τέτοιας υπηρεσίας δίνεται η δυνατότητα σε έναν πάροχο να αντιμετωπίσει πιθανή αύξηση της κίνησης στο δίκτυο του ενοικιάζοντας αναξιοποίητους πόρους ενός άλλου παρόχου, αποφεύγοντας κατά αυτόν τον τρόπο να εγκαταστήσει νέο εξοπλισμό, ο οποίος θα αύξανε κατά πολύ τα ήδη επιβαρυσμένα κεφαλαιουχικά έξοδα του δικτύου (CAPEX). Παράλληλα το εν λόγω μοντέλο αποτελεί μια win-win (κέρδος και στις δύο μεριές) συμφωνία μεταξύ παρόχων καθώς εξίσου ωφελημένος αποδεικνύεται και ο «εκμισθωτής», ο οποίος τιμολογεί τους άλλους παρόχους για τη χρήση των δικών του αναξιοποίητων πόρων. Στο σημείο αυτό εγείρονται διάφορες προκλήσεις σχεδιασμού μίας τέτοιας υπηρεσίας διαμοιρασμού.

Μία ήδη υπάρχουσα προσέγγιση προς αυτή την κατεύθυνση βασίζεται σε τεχνικές εικονικοποίησης και είναι εστιασμένη στο δίκτυο κορμού, από το οποίο διεξάγονται όλες οι απαραίτητες ενέργειες σηματοδότησης προκειμένου μία κινητή συσκευή να μεταπεμφθεί σε έναν άλλο σταθμό βάσης διαφορετικού παρόχου. Αν και η κινητή συσκευή του χρήστη δεν αντιλαμβάνεται την όλη διαδικασία μεταπομπής, ο φόρτος του δικτύου είναι αυξημένος. Για το λόγο αυτό προτείνεται μία διαφορετική προσέγγιση, η οποία θέτει στο επίκεντρό της την κινητή συσκευή, βασιζόμενη στο γεγονός ότι οι σημερινές κινητές συσκευές διαθέτουν εντυπωσιακές υπολογιστικές δυνατότητες. Με την εν λόγω προσέγγιση μειώνεται δραστικά η επιβάρυνση του δικτύου, καθώς όλες οι απαιτούμενες ενέργειες αποφασίζονται και εκκινούν από τη συσκευή. Μία ακόμη πιο σημαντική παράμετρος είναι η δυνατότητα που δίνεται για εγκαθίδρυση ταυτόχρονων παράλληλων συνδέσεων μεταξύ της κινητής συσκευής και περισσότερων του ενός σταθμών βάσης, αφού με τη χρήση τεχνικών εικονικοποίησης το κινητό μπορεί να δημιουργεί εικονικά στιγμιότυπα του εαυτού του. Έτσι, η συνολική κίνηση μίας συσκευής μπορεί να διοχετευθεί και να εξυπηρετηθεί από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, εξισορροπώντας το δικτυακό φόρτο.

Προκειμένου να αποδειχθούν έμπρακτα τα οφέλη εφαρμογής της υπηρεσίας διαμοιρασμού ράδιο-πόρων, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση δικτύου σε επίπεδο συστήματος. Μέσω της εν λόγω προσομοίωσης διαπιστώθηκε ότι η δυνατότητα που δίνεται στους χρήστες ενός δικτύου να εξυπηρετηθούν από σταθμούς που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους, κατάφερε να επιτύχει βελτίωση στην απόδοση τόσο των ίδιων, όσο και των χρηστών που συνέχισαν να λαμβάνουν υπηρεσίες από το οικιακό τους δίκτυο. Τα επιτευχθέντα οφέλη φάνηκαν να αγγίζουν έως και το 80% τόσο ως προς την παράμετρο του μέσου throughput όσο και ως προς αυτή της μέσης από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης.

Όπως είναι αναμενόμενο η εφαρμογή μίας τέτοιας υπηρεσίας προκαλεί επιβαρύνσεις τόσο ως προς το throughput όσο και ως προς την καθυστέρηση, στα δίκτυα των παρόχων που «φιλοξενούνται» οι ξένοι χρήστες. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι το «τίμημα» ως προς την απόδοση που καλούνται να «πληρώσουν» τα εν λόγω δίκτυα, είναι ήσσονος σημασίας συγκρινόμενο με τα αποκομίζοντα κέρδη.

Τέλος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό κάθε πάροχος που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία διαμοιρασμού ράδιο-πόρων να μελετήσει λεπτομερώς τις συνθήκες φόρτου του δικτύου του, αλλά και την πυκνότητα των γειτονικών δικτύων, προκειμένου να εφαρμόσει την υπηρεσία με τις βέλτιστες δυνατές ρυθμίσεις.

Συμπερασματικά, η υλοποίηση μίας υπηρεσίας διαμοιρασμού ραδιο-πόρων, με όποια από τις δύο προσεγγίσεις κι αν υλοποιηθεί, προσδοκείται να επιφέρει μεγιστοποίηση του βαθμού χρήσης των υπαρχόντων δικτυακών υποδομών και να συνεισφέρει στη μείωση των κεφαλαιακών και λειτουργικών εξόδων για τους παρόχους, αλλά και στην βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών. Μία τέτοια προσέγγιση θα ήταν δυνατό να εφαρμοσθεί άμεσα στα σημερινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών παρέχοντας τα επιθυμητά αποτελέσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
2G	Δεύτερη γενιά
3G	Τρίτη γενιά
4G	Τέταρτη γενιά
Abstraction	Αφαίρεση
Agent	Πράκτορας
Beachfront spectrum	Φασματική ζώνη μικροκυματικών συχνοτήτων
Blocking	Παρεμπόδιση
Caching	Εναποθήκευση
Capacity	Χωρητικότητα
Carrier Aggregation	Συνάθροιση φερουσών συχνοτήτων
Centralized	Κεντριοποιημένος
Client	Πελάτης
Cloud	Τεχνολογία νέφους
CO ₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
Control plane	Μεριά ελέγχου και Σηματοδοσίας
Controller	Ελεγκτής
Delay	Καθυστέρηση
Driver	Πρόγραμμα οδηγός
Femtocells	Φεμπτοκυψέλες
Firewall	Τείχος προστασίας
Data Center	Κέντρο Δεδομένων
Data Plane	Μεριά Δεδομένων Χρήστη
Device-centric approach	Προσέγγιση με επίκεντρο την κινητή συσκευή
Enb	Σταθμός βάσης συστήματος LTE/LTE-A
Femtocell	Φεμτοκυψέλη
Flat architecture	Επίπεδη αρχιτεκτονική
Focus group	Ομάδα μελέτης της ITU-R
Functional blocks	Λειτουργικές Μονάδες
Hardware	Υλικός εξοπλισμός
HeNB	Σταθμός βάσης συστήματος LTE/LTE-A του οικιακού δικτύου
High definition	Υψηλή Ευκρίνεια
HOpenB	Σταθμός βάσης συστήματος LTE/LTE-A του οικιακού δικτύου που συμμετέχει στο διαμοιρασμό ραδιοπόρων
Hotspot	Θερμό σημείο
Id	Ταυτότητα-αναγνωριστικό
Instance	Στιγμιότυπο
Intrusion Detection Systems	Συστήματα Ανίχνευσης Παρέισφρησης
Jitter	Διακύμανση της καθυστέρησης
L3 Tunnel	Tunnel επιπέδου δικτύου
Laptop	Φορητός Υπολογιστής
Latency	Καθυστέρηση
Live Streaming	Ζωντανή Μετάδοση-Λήψη περιεχομένου

	Πολυμέσων
Load Balancer	Εξισορροπητής Φόρτου
Malware	Κακόβουλο λογισμικό
Mesh networking	Διασύνδεση κάθε δικτυακού κόμβου άμεσα με όλους τους υπόλοιπους
Microwave	Μικροκυματικό
Middleware	Ενδιάμεσο λογισμικό
Multi – point transmission	Μετάδοση από πολλά σημεία
Multi-tenant	Πολλών ενοικιαστών-παρόχων
Navigation	Πλοήγηση
Network-centric approach	Προσέγγιση με επίκεντρο το δίκτυο
NV Admission Control Phase	Φάση ελέγχου αποδοχής νέων συσκευών με βάση την εικονικοποίηση
NV Decision Phase	Φάση λήψη απόφασης με βάση την εικονικοποίηση
NV Triggering Phase	Φάση ενεργοποίησης μίας μεταπομπής με βάση την εικονικοποίηση
Offloading	Εκφόρτωση
On demand	Κατόπιν ζήτησης
OpenAP	Σημείο πρόσβασης Wi-Fi που συμμετέχει στο διαμοιρασμό ραδιοπόρων
OpenNB	Σταθμός βάσης συστήματος LTE/LTE-A που συμμετέχει στο διαμοιρασμό ραδιοπόρων
Overhead	Πλεόνασμα
PHY (Physical Layer)	Φυσικό επίπεδο
Pilot contamination	Πιλοτική μόλυνση
Point of Reference	Σημείο Αναφοράς
Point-to-Point	Σημείου προς σημείο
Relaying	Μεταβίβαση
Release	Έκδοση
Residential Gateway	Οικιακή Πύλη
Roaming	Περιοδική
Roundtrip	Διαδρομή μετ' επιστροφής
SDN Agent (Home, Host)	Πράκτορας SDN κάθε δικτύου (οικιακός, ξένος)
SDN Aware Admission Control	Έλεγχος αποδοχής συνδέσεων βασισμένος στο SDN
SDN Enforcement Techniques	Τεχνικές ενίσχυσης της χρήσης του SDN
SDN Server	Εξυπηρετής SDN για όλα τα δίκτυα
Server	Εξυπηρετητής
Set-top-box	Συσκευή οικιακού εξοπλισμού για IPTV
SLA Monitor Phase	Φάση ελέγχου των συμφωνιών SLA
Small Cell	Κυψέλη μικρής εμβέλειας 10 έως 1000 μέτρων
Smartphones	Έξυπνα τηλέφωνα
Software	Λογισμικό
Software layer	Επίπεδο Λογισμικού
Spectral Efficiency	Φασματική Πυκνότητα
Spectrum Auction	Δημοπρασία Φάσματος

Subcarrier	Υπο-φέρουσα συχνότητα
Tablets	Ηλεκτρονική ταμπλέτα
Threshold	Τιμή κατωφλίου
Throughput	Διεκπεραιωτική Ικανότητα
Tracking area	Μία από τις περιοχές στις οποίες εικονικά διαιρείται το δίκτυο
Tunneling	Συράγωση
Vendor	Κατασκευαστής-προμηθευτής
Virtual Machines	Εικονικές Μηχανές
Virus scanners	Ανιχνευτές ιών
Wearable	Φορετός
Wi-Fi	Ασύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
AAA	Authentication Authorization and Accounting
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
ARPU	Average revenue per user
BER	Bit Error Rate
BSS	Business Support System
BTS	Base Transceiver Station
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAPEX	Capital Expenditure
CDN	Content Delivery Networks
CDPI	Control to Data-Plane Interface
CoA	Care-Of Address
CoMP	Coordinated MultiPoint transmission/reception
COTS	Commercial-Off-The-Shelf
C-RAN	Cloud – Radio Access Network
D2D	Device-to-device
DIDO	Distributed Input – Distributed Output
DoS	Denial of Service

DPI	Deep Packet Inspection
EAN	European Ambient Networks
EHF	Extremely High Frequency
EMO	European Mobile Industry Observatory
eNB	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FA	Foreign Agent
FCM	Fixed / Mobile Converged
GC	Global Controller
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GRE	Generic Routing Encapsulation
HCN	Heterogeneous Cellular Network
HetNet	Heterogeneous Network
HLR	Home Location Register
HO	Handover
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HT	Horizontal Topic

ICT	Information and Communication Technologies
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS	Internet Protocol Multimedia System
IMT	International Mobile Telecommunications
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
IPSec	Internet Protocol security
IPv6	Internet Protocol version 6
ISG	Industry Specification Groups
ITU	International Telecommunications Union
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LC	Local Controller
LoS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-machine
MEC	Mobile-Edge Computing
MIMO	Multiple Input – Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MU – MIMO	Multiple User MIMO
mWT	millimeter Wave Transmission

NB	Node B
NBI	Northbound Interfaces
NFV	Network Functions Virtualization
NFV M&O	Network Functions Virtualization Management and Orchestration
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NV HO	Network Virtualization Handover
ONF	Open Networking Foundation
OPEX	Operating Expenditure
OSI	Open Systems Interconnection / Operator Satisfaction Index
OSS	Operations Support System
OTP	Open Transport Protocol
PDN-GW / P - GW	Packet data network - Gateway
PRB	Physical Resource Block
QoS	Quality of Service
RAS	Radio Access and Spectrum
RAT	Radio Access Technology
RNC	Radio Network Controller
RRS	Radio Resource Sharing
RSRQ	Reference Signal Received Quality

SDN	Software Defined-Networks
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SLA	Service License Agreement
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self Organising Network
SSL	Secure Sockets Layer
SU – MIMO	Single User MIMO
TA	Tracking Area
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
UHF	Ultra High Frequency
URM	Universal Remote Control
USI	User Satisfaction Index
VAP	Virtual Access Point
VeNB	Virtual eNB
VIM	Virtual Infrastructure Managers
VNF	Virtualized Network Functions
VNFM	Virtualized Network Function Manager
VoIP	Voice over IP
VoWi-Fi	Voice over Wi-Fi

VPN	Virtual Private Network
WAG	Wi-Fi Access Gateway
WAN	Wide Area Network
WP	Work Package
WRC	World Radiocommunication Conference
WWRF	Wireless World Research Forum
EPA	Εθνικές Ρυθμιστικές Αρχές

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] EUROPEAN COMMISSION, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN SOCIAL AND ECONOMIC COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, “Exploiting the employment potential of ICTs”, April 2012, p. 3.
- [2] C. Wang et al., “Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks”, IEEE Communications Magazine, February 2014.
- [3] J. Porras et al., “User 2020 – A WWRF Vision”, September 2014, p. 4.
- [4] CISCO, “Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019”, February 2015.
- [5] L. Sørensen, K. Skouby, “Visions and research directions for the Wireless World”, July 2009, pp. 5-9.
- [6] Wikipedia, the free encyclopedia, Machine-to-Machine, https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_to_machine, July 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [7] J. Andrews et al., “What Will 5G Be?”, IEEE JSAC SPECIAL ISSUE ON 5G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS, May 2014.
- [8] H. Dhillon et al., “Modeling and Analysis of K-Tier Heterogeneous Cellular Networks”, [Selected Areas in Communications, IEEE Journal on](#) (Volume 30, [Issue 3](#)), April 2012, p. 1.
- [9] P. Mogensen et al., “Looking ahead to 5G”, Nokia Solutions and Networks, May 2014.
- [10] FP7 - Future Networks Cluster, “5G radio network architecture”, http://fp7-semafour.eu/media/cms_page_media/9/SEMAFOUR_2014_RAScluster%20White%20paper.pdf, March 2014. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [11] M. Javaid, “5G Technologies: Fundamental Shift in Mobile Networking Philosophy”, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2387193, November 2013. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [12] P. Sule, A. Joshi, “Architectural Shift from 4G to 5G Wireless Mobile Networks”, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, September 2014.
- [13] Ericsson Review, “5G Radio Access”, The communications technology journal since 1924, June 2014.
- [14] A. Tudzarov, T. Janevski, “Functional Architecture for 5G Mobile Networks”, International Journal of Advanced Science and Technology, July 2011.
- [15] Wikipedia, the free encyclopedia, “Cloud Computing”, https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing, July 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [16] Wikipedia, the free encyclopedia, “Fog Computing”, https://en.wikipedia.org/wiki/Fog_computing, July 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [17] Wikipedia, the free encyclopedia, «Διαφορική Λήψη», https://en.wikipedia.org/wiki/Διαφορική_λήψη, March 2013. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [18] I. Poole, “LTE CA : Carrier Aggregation Tutorial”, <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-carrier-channel-aggregation.php>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [19] Wikipedia, the free encyclopedia, “Extremely High Frequency”, https://en.wikipedia.org/wiki/Extremely_high_frequency, June 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [20] Wikipedia, the free encyclopedia, “C-RAN”, https://en.wikipedia.org/wiki/C_-RAN, June 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [21] N. Sharma, “Eight Big Benefits of Software-Defined Networking Nirmal Sharma”, <http://www.serverwatch.com/server-tutorials/eight-big-benefits-of-software-defined-networking.html>, [Προσπελάστηκε 15/9/15].
- [22] Wikipedia, the free encyclopedia, “Device-to-Device”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Device-to-device>, June 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [23] Z. Ghadialy, “Coordinated Multi-Point (CoMP) transmission and reception”, <http://blog.3g4g.co.uk/2010/02/coordinated-multi-point-comp.html>, February 2010. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [24] Wikipedia, the free encyclopedia, “Network Virtualization”, https://en.wikipedia.org/wiki/Network_virtualization, July 2015. [Προσπελάστηκε 10/7/15]
- [25] A. Alexiou et al., “5G : On the count of three paradigm shifts”, Wireless World Research Forum, March 2015.
- [26] “SDN/NFV Primer”, <http://www.6wind.com/software-defined-networking/sdn-nfv-primer/>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [27] “What is Network Virtualization?”, <https://www.sdxcentral.com/resources/network-virtualization/whats-network-virtualization/>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [28] Cisco, “Network Functions Virtualization (NFV)”, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/network-functions-virtualization-nfv/index.html>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]

- [29] N. Ilyadis, "5 NFV Benefits & The Trends Driving Them", <http://www.networkcomputing.com/networking/5-nfv-benefits-and-the-trends-driving-them/a/d-id/1269263>, May 2014. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [30] BT Global Services, "What is NFV?", <http://www.globalservices.bt.com/uk/en/point-of-view/nfv> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [31] S. Jeong, T. Egawa, "Network Virtualization Problem Statement", <https://www.ieff.org/proceedings/77/slides/VNRG-2.pdf>, March 2010. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [32] E. Tejedor, "NFV and SDN. Dumb routers for smart networks?", <http://blog.teldat.com/?p=131>, July 2014. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [33] S. Rangan et al., "Millimeter Wave Cellular Wireless Networks : Potentials and Challenges", [Proceedings of the IEEE](#) (Volume 102, [Issue 3](#)), February 2014.
- [34] Y. Niu et al., "A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges", Cornell University Library, February 2015.
- [35] "What is mmWave?", <http://mmwave.com/> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [36] R. Heath, "Millimeter Wave Cellular Systems – the Future of 5G", <http://www.profheath.org/research/millimeter-wave-cellular-systems/> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [37] K. Guo, "Transmit – Receive Processing in Massive MIMO systems", <http://www.ice.rwth-aachen.de/research/algorithms-projects/entry/detail/transmit-receive-processing-in-massive-mimo-systems>, ICT-317669 METIS . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [38] E. Luther, "5G Massive MIMO Testbed : From Theory to Reality", <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [39] E. Larsson et al., "MASSIVE MIMO FOR NEXT GENERATION WIRELESS SYSTEMS", [Communications Magazine, IEEE](#) (Volume 52, [Issue 2](#)), February 2014.
- [40] F. Boccardi et al., "Five Disruptive Technology Directions for 5G", [Communications Magazine, IEEE](#) (Volume 52, [Issue 2](#)), February 2014.
- [41] Massive MIMO Infopoint, "Massive (Very Large) MIMO Systems", <http://www.massivemimo.eu/> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [42] R. Choudhury, "A Network Overview of Massive MIMO for 5G Wireless Cellular: System : Model and Potentials", International Journal of Engineering Research and General Science (Volume 2, Issue 4), June-July 2014.
- [43] European Commission, "Mobile and Wireless Communications Enablers for the 2020 Information Society", February 2013.
- [44] European Commission, "Interworking and JOINT Design of an Open Access and Backhaul Network Architecture for Small Cells based on Cloud Networks", October 2012.
- [45] European Commission, "What is Horizon 2020?", <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [46] European Commission, "TROPIC main achievements and exploitation prospects", September 2014.
- [47] "Connectivity management for eneRgy Optimised Wireless Dense networks", <http://www.ict-crowd.eu/>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [48] Edge Cloud-Empowered 5G Networks Symposium, Project Summary, <http://www.ict-tropic.eu/> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [49] MCN, "Motivation", <http://www.mobile-cloud-networking.eu/site/>. [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [50] COMBO, "Project Presentation", <http://www.ict-combo.eu/> . [Προσπελάστηκε 10/4/15]
- [51] S. Perrin, S. Hubbard, "White Paper : Practical Implementation of SDN and NFV in the WAN", Heavy Reading, October 2013.
- [52] "White Paper : Network Functions Virtualisation", ETSI SDN and OpenFlow World Congress, October 2012, http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf . [Προσπελάστηκε 30/6/15]
- [53] "Network Functions Virtualisation" ETSI SDN and OpenFlow World Congress, October 2013, http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper2.pdf [Προσπελάστηκε 30/6/15]
- [54] "White Paper : Huawei Observation to NFV", Huawei Technologies, 2014.
- [55] Wikipedia, the free encyclopedia, "NFV", https://en.wikipedia.org/wiki/Network_functions_virtualization . [Προσπελάστηκε 10/8/15]
- [56] International Telecommunications Union, "ITU towards "IMT for 2020 and beyond" ", <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx> . [Προσπελάστηκε 12/7/15]
- [57] International Telecommunications Union, "World Radiocommunication Conferences (WRC)", <http://www.itu.int/net/ITU-R/index.asp?category=conferences&rlink=wrc&lang=en> . [Προσπελάστηκε 12/7/15]
- [58] H. Vadada, "5G Vision and Standards", <http://www.telecom-cloud.net/5g-vision-and-standards/> , April 2015. [Προσπελάστηκε 12/7/15]
- [59] "5G Standardization", Mobile World Congress 2015, <http://www.interdigital.com/presentations/5g-standardization> , March 2015. [Προσπελάστηκε 12/7/15]

- [60] Nokia Solutions and Networks, "White Paper : 5G use cases and requirements", July 2014.
- [61] W. Tong, Z. Peiyong "White Paper : 5G: A Technology Vision", Huawei, 2013.
- [62] Chih-Lin I et al., "Toward Green and Soft: A 5G Perspective", IEEE Communications Magazine (Volume 52 , [Issue 2](#)), February 2014, http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs_TC_5GMWI/Toward_Green_and_Soft_A_5G_Perspective.pdf . [Προσπελάστηκε 10/5/15]
- [63] A. Shapochka , "4 Challenges Lying in the Wait of SDN", <http://www.nojitter.com/post/240169834/4-challenges-lying-in-the-wait-of-sdn>, [Προσπελάστηκε 15/9/15].
- [64] Gerhard Wunder et al., "5GNOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications", IEEE Communications Magazine (Volume 52 , [Issue 2](#)), February 2014, http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs_TC_5GMWI/5GNOW.pdf [Προσπελάστηκε 10/5/15]
- [65] M. Yang, et al., "OpenRAN: A Software-defined RAN Architecture via Virtualization", SIGCOMM, Hong Kong, August 2013.
- [66] K. Pentikousis et al., "MobileFlow: Toward Software-Defined Mobile Networks," IEEE Communications Magazine (Volume 51, Issue 7), Jul 2013.
- [67] L. Li et al., "Toward Software-Defined Cellular Networks", European Workshop on [Software Defined Networking \(EWSDN\)](#), October 2012.
- [68] J.S. Panchal et al., "Mobile Network Resource Sharing Options: Performance Comparisons," IEEE Transactions on Wireless Communications, (Volume 12, Issue 9), September 2013.
- [69] W. Kiess et al., "Base Station Virtualization for OFDM Air Interfaces with Strict Isolation", IEEE ICC Workshops, Budapest, June 2013.
- [70] Y. Zaki et al., "LTE mobile network virtualization", Mobile Networks and Applications (Volume 16, Issue 4), August 2011.
- [71] Ambient Network Partners, <http://www.ambient-networks.org> , "Ambient networks" . [Προσπελάστηκε 08/9/15].
- [72] P. Pöyhönen et al., "Analysis of benefits of operator cooperation using end-user and operator performance metrics", International Telecommunications Society, 17th Biennial Conference, June 2008.
- [73] K. Johansson et al., "A Methodology for Estimating cost and Performance of Heterogeneous Wireless Access Networks," in IEEE [Personal, Indoor and Mobile Radio Communications \(PIMRC\)](#), September 2007.
- [74] Open Networking Foundation, "Software-Defined Networking: The New Norm for Networks", http://www.bigswitch.com/sites/default/files/sdn_resources/onf-whitepaper.pdf, [Προσπελάστηκε 10/9/15].
- [75] Open Networking Foundation, "SDN Architecture Overview", <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/SDN-architecture-overview-1.0.pdf>, [Προσπελάστηκε 10/9/15].
- [76] Big Switch Networks, "The Open SDN Architecture", http://bigswitch.com/sites/default/files/sdn_overview.pdf, [Προσπελάστηκε 10/9/15].
- [77] TechTarget, "SDN use cases emerge across the LAN, WAN and data center", <http://searchsdn.techtarget.com/essentialguide/SDN-use-cases-emerge-across-the-LAN-WAN-and-data-center>, [Προσπελάστηκε 12/9/15].
- [78] G. Brown, "7 Advantages of Software Defined Networking", <http://www.ingrammicroadvisor.com/data-center/7-advantages-of-software-defined-networking> [Προσπελάστηκε 15/9/15].
- [79] D. Xenakis et. al., "Radio Resource Sharing as a Service in 5G : A Software Defined Networking Approach".
- [80] K. Byrne, "Best battery life 2014 - 60 smartphones tested", November 2014, <http://www.expertreviews.co.uk/mobile-phones/1402071/best-battery-life-2014-60-smartphones-tested> [Προσπελάστηκε 20/10/15].
- [81] LTE-SIM Tool: <http://telematics.poliba.it/index.php/en/lte-sim>