



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**On-device caching δημοφιλούς περιεχομένου βίντεο σε
συσκευές με λειτουργικό σύστημα Android**

Νικόλαος Δ. Επίσκοπος

Επιβλέπων: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2018

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

On-device caching δημοφιλούς περιεχομένου βίντεο σε συσκευές με λειτουργικό σύστημα Android

Νικόλαος Δ. Επίσκοπος

A.M.: 1115200900227

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε στην τεχνική του on-device caching βίντεο κλιπ από διάφορες υπηρεσίες παροχής ροής βίντεο σε φορητές ασύρματες συσκευές. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια παράθεση των λόγων για τους οποίους οδηγηθήκαμε στην ανάγκη που πυροδότησε την έρευνα και ανάπτυξη των δικτύων 5G, καθώς και μια επισκόπηση των κύριων στόχων των δικτύων 5G, των βασικών υποδομών και τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των στόχων αυτών και μια ποσοτική και ποιοτική σύγκριση των δικτύων 4G-LTE με τα δίκτυα 5G. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις υποδομές του 5G στο φυσικό επίπεδο. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις cloud υποδομές του 5G μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα του caching στο άκρο του δικτύου. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στο caching καθώς και στις διάφορες τεχνικές caching σε mobile δίκτυα. Στη συνέχεια, γίνεται μια αναφορά στη σημαντικότητα του caching περιεχομένου βίντεο σε φορητές συσκευές και στις διάφορες υπηρεσίες video streaming. Έπειτα, παρουσιάζεται η τεχνική του on-device caching σε συσκευή Android μέσω ήδη υπάρχουσών λύσεων και εφαρμογών οι οποίες το επιτυγχάνουν, αξιολογώντας και συγκρίνοντας τις ως προς ποικίλα κριτήρια, όπως η διεπαφή χρήσης, η εμπειρία χρήσης, η δυνατότητα πολυνημάτωσης, κ.λ.π.. Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα συμπεράσματά μας και προτείνουμε ιδέες για περαιτέρω βελτιώσεις και νέες λειτουργίες των ήδη υπάρχουσών λύσεων. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούμε μια ανακεφαλαίωση και παραθέτουμε τα σημαντικότερα συμπεράσματά μας.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δημοφιλές περιεχόμενο σε ασύρματα συστήματα 5^{ης} γενιάς

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: φορητές συσκευές, δημοφιλές περιεχόμενο, προβολή βίντεο, διανομή, αποθήκευση

ABSTRACT

In this thesis, we focus on the on-device video caching from various video streaming services on wireless mobile devices. In the first chapter, we cite the main reasons that lead to the need for research and development of the 5G networks and we provide an overview of the main goals of the 5G networks, the basic infrastructures and technologies that will be used in achieving these goals, as well as a qualitative and quantitative comparison between 4G-LTE networks and 5G networks. In the second chapter, we make a short reference to the 5G physical layer infrastructure. In the third chapter, we make a reference to the 5G cloud infrastructure, which enables caching at the network edge. In the fourth chapter, we make a reference to caching and the various caching techniques in mobile networks. Then, we deal with the importance of video caching on mobile devices and various video streaming services. In the sequel, we present the on-device caching technique on Android-powered mobile devices using already existing solutions and applications through which video caching on mobile devices can be achieved, evaluating and comparing them to each other, based on characteristics such as the user interface, the user experience, the multithread implementation, etc.. Finally, we present our conclusions and we suggest some ideas for further improvements and extra features to those applications. In the fifth chapter, we summarize this work and present our main conclusions.

SUBJECT AREA: Popular content on 5G fifth generation wireless systems

KEYWORDS: mobile devices, popular content, video caching, content delivery

Στην Κατερίνα, που έχει σταθεί στο πλευρό μου καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, ερευνητή Διονύσιο Ξενάκη, για τη συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωση της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	12
1. ΔΙΚΤΥΑ 5G.....	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Από το 4G-LTE στο 5G.....	18
1.2.1 Περιορισμοί στο 4G-LTE.....	18
1.2.2 Διαφορές 4G-LTE και 5G.....	19
1.3 Ποσοτικοί στόχοι του 5G.....	21
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Small cells.....	25
2.3 Millimeter Waveband.....	27
2.4 Massive Multiple Input Multiple Output.....	29
3. CLOUD ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G.....	37
3.1 Εισαγωγή.....	37
3.2 Software-Defined Networking.....	37
3.3 Network Functions Virtualization.....	44
3.4 Radio Access Network as a Service.....	49
3.5 Anything as a Service.....	52
3.5.1 Mobile Content Delivery Network as a Service.....	53
3.5.2 Traffic Offload as a Service.....	53
3.5.3 Πλεονεκτήματα του Anything as A Service.....	53
3.6 Multi-access Edge Computing.....	59
3.6.1 Computational Offloading.....	60
3.6.2 Distributed Content Delivery and Caching.....	60
3.6.3 Application-Awareness and Content Optimization.....	61

4. ON-DEVICE VIDEO CACHING.....	63
4.1 Εισαγωγή.....	63
4.2 On-device caching.....	65
4.3 Caching περιεχομένου τύπου video σε mobile συσκευές.....	67
4.4 Υπάρχουσες λύσεις – εφαρμογές και λειτουργικότητα.....	69
4.4.1 Πάροχοι υπηρεσιών ροής βίντεο.....	69
4.4.2 Λειτουργικά συστήματα – πλατφόρμες για mobile συσκευές.....	70
4.4.3 Αποθετήρια – πηγές λογισμικού.....	70
4.4.4 Υπάρχουσες λύσεις – εφαρμογές λήψης βίντεο.....	71
4.5 Σύγκριση των εφαρμογών.....	75
4.6 Προτάσεις για βελτιώσεις και νέες δυνατότητες/λειτουργίες.....	80
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	84
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	88
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ασύρματες συσκευές και διαδίκτυο [1].....	13
Εικόνα 2: Πλήθος συσκευών με δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης σε δίκτυα [2].....	14
Εικόνα 3: Στόχοι και Υπηρεσίες 5G [7].....	17
Εικόνα 4: Από το LTE στο 5G [8].....	21
Εικόνα 5: Ποσοτικές διαφορές LTE και 5G [11].....	23
Εικόνα 6: Επενδύσεις σε εξοπλισμό των δικτύων 5G [12].....	24
Εικόνα 7: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης του 5G στο φυσικό επίπεδο [14].....	25
Εικόνα 8: Είδη κυψελών και χαρακτηριστικά [14].....	26
Εικόνα 9: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τηλεπικοινωνιών [18].....	28
Εικόνα 10: SU-MIMO και MU-MIMO [21].....	29
Εικόνα 11: Massive MIMO [23].....	30
Εικόνα 12: Pilot Contamination [25].....	31
Εικόνα 13: Διαμόρφωση δέσμης ανά χρήστη μέσω Active Antenna Array [27].....	34
Εικόνα 14: Αύξηση εύρους κάλυψης και χωρητικότητας μέσω Active Phased-Array Antenna [28].....	34
Εικόνα 15: Διαμόρφωση δέσμης σε FD-MIMO [29] [30].....	34
Εικόνα 16: Εφαρμογές και οφέλη της τεχνολογίας Massive MIMO [31].....	35
Εικόνα 17: Συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών 5G στο φυσικό επίπεδο [33].....	36
Εικόνα 18: Διαφορά ολοκλήρωσης μεταξύ παραδοσιακών δικτύων και SDN [40].....	38
Εικόνα 19: SDN Northbound & Southbound Interfaces και ο σκοπός τους [41].....	39
Εικόνα 20: Πλεονεκτήματα κατανεμημένου έναντι κεντροποιημένου ελέγχου σε SDN [45].....	41
Εικόνα 21: Συσχέτιση διεπαφών Westbound & Eastbound του SDN [44].....	42
Εικόνα 22: Ολοκληρωμένη εικόνα του SDN [49].....	43
Εικόνα 23: Διαφορές μεταξύ παραδοσιακών δικτύων και SDN [50].....	43
Εικόνα 24: Εικονικοποίηση ενός απλοποιημένου προωθητικού γραφήματος που υλοποιεί μια φορητή υπηρεσία Διαδικτύου [52].....	45

Εικόνα 25: ETSI NFV Reference Architecture [52].....	46
Εικόνα 26: Πλεονεκτήματα του NFV [55].....	47
Εικόνα 27: Συνήθεις λειτουργίες RAN στα επίπεδα ελέγχου και χρήστη του 3GPP [52]	49
Εικόνα 28: Ευέλικτος διαχωρισμός λειτουργιών [58].....	51
Εικόνα 29: Η έννοια ANYaaS: (a) η αρχιτεκτονική επιπέδου αφαίρεσης του διαχειριστή υπηρεσιών ANYaaS και (b) ο κύκλος ζωής της διαχείρισης των περιπτώσεων εξυπηρέτησης [66].....	54
Εικόνα 30: Το CDNaaS εν ώρα δράσης [66].....	56
Εικόνα 31: ANYaaS SO ψευδο-αλγόριθμος για να αποφασίσει εάν θα δημιουργηθούν από κοινού ή ξεχωριστά SIG [66].....	57
Εικόνα 32: Multi-access Edge Computing [75].....	61
Εικόνα 33: Σύγκριση των (a) no caching; (b) EPC caching; (c) EPC + RAN caching; (d) EPC + RAN + D2D Caching [81].....	63
Εικόνα 34: Αύξηση του Mobile Video : Το μέλλον είναι στο Mobile [83].....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εφαρμογές και υπηρεσίες ροής βίντεο που υποστηρίζονται από αυτές.....	75
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά της διεπαφής χρήσης των εφαρμογών.....	76
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά λήψης και αποθήκευσης των εφαρμογών.....	77
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά αποθήκευσης, αλληλεπίδρασης και ασφάλειας των εφαρμογών.....	79

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της έρευνας για την προσωρινή αποθήκευση και διανομή δημοφιλούς περιεχομένου και κυρίως περιεχομένου βίντεο λόγω του μεγάλου μεγέθους του και της μεγάλης σημασίας που έχει στην ψηφιακή εποχή που διανύουμε. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ), στο εργαστήριο GAIN (Green, Adaptive and Intelligent Networking Group). Ευχαριστώ πολύ τον ερευνητή Διονύσιο Ξενάκη που ανιδιοτελώς με δέχθηκε στο εργαστήριο, μου μετέδωσε τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των ασύρματων δικτύων και μου εμπιστεύτηκε ένα μέρος της έρευνάς του ως θέμα εργασίας, προσφέροντάς μου μια θέση στην ερευνητική ομάδα καθώς ένα γραφείο και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή προκειμένου να μπορέσω να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία και τις προπτυχιακές σπουδές μου. Η συμβολή του και η εποπτεία του αποτέλεσαν καταλυτικούς παράγοντες στην εκπόνηση της εργασίας.

1. ΔΙΚΤΥΑ 5G

1.1 Εισαγωγή

Λόγω των έντονων κοινωνικών ρυθμών και της μετακίνησης των ανθρώπων από το ένα μέρος στο άλλο, η ανάγκη για μικρού μεγέθους φορητές συσκευές που να έχουν τη δυνατότητα ασύρματης συνδεσιμότητας (Wireless Connectivity) στο διαδίκτυο (Internet) έγινε πιο επιτακτική από ποτέ, γεγονός που σε συνδυασμό με την ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας και της σμίκρυνσης των ημιαγωγών, οδήγησε στην εποχή των “έξυπνων” συσκευών (Smart Devices). Στην κατηγορία των “έξυπνων” συσκευών περιλαμβάνονται τα “έξυπνα” τηλέφωνα (Smartphone), τους υπολογιστές ταμπλέτες (Tablet), τις “έξυπνες” τηλεοράσεις (Smart TV), τα “έξυπνα” ηχεία (Smart Speaker), τα “έξυπνα” ρολόγια (Smartwatch), τις “έξυπνες” φορετές συσκευές ανάγνωσης της φυσικής μας κατάστασης (Smart Wearables) κλπ..

Την τελευταία δεκαετία, παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση του πλήθους των συσκευών που συνδέονται (είτε ενσύρματα, είτε ασύρματα) σε δίκτυα και κατά συνέπεια στο διαδίκτυο, μετατρέποντας το διαδίκτυο σε ένα Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT). Οι συσκευές αυτές, εκτός από τις παραπάνω διακεκριμένες κατηγορίες “έξυπνων” συσκευών, περιλαμβάνουν τους τυπικούς υπολογιστές καθώς και μια πληθώρα συσκευών άλλου τύπου όπως αυτοκίνητα, ψυγεία, συστήματα κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης (Closed-Circuit Television – CCTV), κλιματιστικά κ.ά.. Όλες αυτές οι συσκευές, είναι γνωστές με την ονομασία Συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things Devices – IoT Devices).

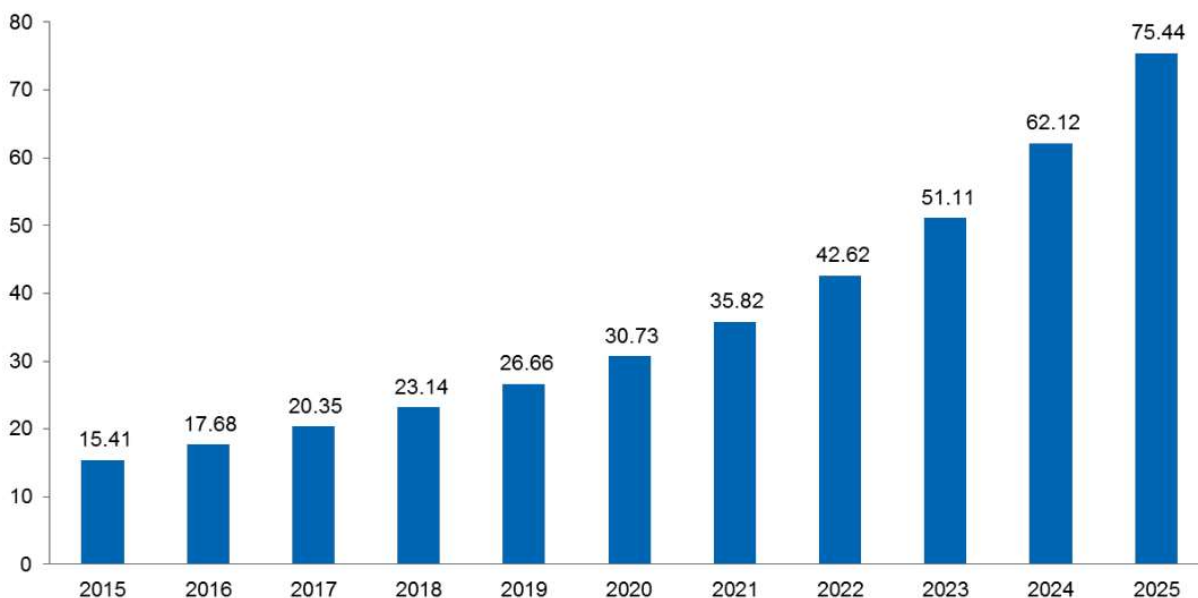


Εικόνα 1: Ασύρματες συσκευές και διαδίκτυο [1]

Είναι πολύ δύσκολο να προβλέψουμε το ποιες και πόσες εν ενεργεία και συνδεδεμένες στο διαδίκτυο συσκευές IoT θα υπάρχουν στο μέλλον. Στατιστικές κάνουν λόγο για

αύξηση του πλήθους των εν ενεργεία και σε σύνδεση συσκευών IoT κατά 12% κάθε χρόνο (κατά μέσο όρο). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, υπολογίζεται πως εντός του 2018 το πλήθος των εν ενεργεία και σε σύνδεση συσκευών IoT έχει ξεπεράσει τα 20 δισεκατομμύρια. Το πλήθος αυτό αναμένεται να ξεπεράσει τα 30 δισεκατομμύρια μέχρι το 2020 και τα 125 δισεκατομμύρια μέχρι το 2030.

IoT installed base, global market, billions



Εικόνα 2: Πλήθος συσκευών με δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης σε δίκτυα [2]

Επιπλέον, σύμφωνα με την πιο πρόσφατη (Μάρτιος 2017) ετήσια αναφορά Visual Network Index της CISCO για τα κυψελωτά δίκτυα (Cellular Network) [3] υπολογίζεται πως μέχρι το 2021:

- Η κίνηση δεδομένων σε φορητές συσκευές (Mobile Data Traffic) θα αποτελεί το 20% της παγκόσμιας κίνησης δεδομένων IP (IP Traffic).
- Το πλήθος των δεδομένων που θα εξυπηρετούν – μεταφέρουν τα κυψελωτά δίκτυα κάθε μήνα θα φτάσει τα 49 exabytes/μήνα, δηλαδή τα 587 exabytes/έτος.
- Τα smartphone θα είναι υπεύθυνα για το 86% των δεδομένων που θα μεταφέρονται μέσω των κυψελωτών δικτύων.
- Το 63% των δεδομένων που θα μεταφέρονται παγκοσμίως μέσω των κυψελωτών δικτύων θα παραδίδονται στις συσκευές είτε μέσω ασύρματων σημείων πρόσβασης WiFi (WiFi Hotspots) είτε μέσω κυψελών (Cell).
- Το 78% των δεδομένων που θα μεταφέρονται παγκοσμίως μέσω των κυψελωτών δικτύων θα αποτελούν αποκλειστικά περιεχόμενο τύπου βίντεο.

Οπότε, με το πλήθος των συσκευών που διαθέτουν πρόσβαση στο διαδίκτυο να αυξάνεται ταχύτατα, καθώς οι περισσότεροι άνθρωποι διαθέτουν τουλάχιστον μία τέτοια συσκευή, η ανάγκη για την καλύτερη εξυπηρέτηση του διαρκώς αυξανόμενου πλήθους των τελικών χρηστών του διαδικτύου γίνεται πιο επιτακτική από ποτέ. Αυτό είναι το κυριότερο κίνητρο για την ανάπτυξη των νέων δικτύων, γνωστών ως ασύρματα συστήματα πέμπτης γενιάς (5th Generation Wireless Systems – 5G). Με αφορμή αυτή την εξέλιξη, στο πλαίσιο της έρευνας για το 5G τέθηκαν επιπλέον στόχοι [4], [5], [6] οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω. Μια παρατήρηση για το 5G είναι ότι μέσα από τους

στόχους που τίθενται γι' αυτό, φαίνεται πως “ξεφεύγει” από τον κλασικό ορισμό των δικτύων επικοινωνιών, καθώς εκτός από τις προδιαγραφές σε ταχύτητα και χωρητικότητα συσκευών τίθενται νέες προδιαγραφές που σχετίζονται αποκλειστικά με την άμεση διασύνδεση των διαφορετικών δικτυακών συσκευών, ώστε να τη δημιουργία υπηρεσιών διαφόρων τύπων και σκοπών που περιγράφονται παρακάτω.

Εφόσον η πρόσβαση των σύγχρονων συσκευών στα δίκτυα γίνεται αποκλειστικά με τη χρήση ασύρματης τεχνολογίας, είτε μέσω σημείων ασύρματων πρόσβασης WiFi είτε μέσω των κυψελωτών δικτύων, είναι απαραίτητο να βρεθεί τρόπος ταυτόχρονης εξυπηρέτησης του διαρκώς αυξανόμενου πλήθους των συσκευών, έτσι ώστε να μειωθούν, ή αν είναι δυνατόν να εξαλειφθούν εντελώς, προβλήματα όπως αποσυνδέσεις, καθυστερήσεις και κολλήματα που οφείλονται στον ανταγωνισμό των συσκευών για διεκδίκηση πόρων των δικτύων και τα οποία οδηγούν σε μια άσχημη εμπειρία χρήσης (Quality of Experience - QoE) για τους τελικούς χρήστες και/ή σε προβλήματα ασυνέπειας και ανεπιθύμητης λειτουργίας για άλλου είδους συσκευές. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται μια πύκνωση των ασύρματων δικτύων πρόσβασης (Radio Access Network – RAN), εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης (Base Station – BS) σε κοντινότερες αποστάσεις μεταξύ τους, οι οποίοι θα αποτελούνται από ένα αρκετά μεγάλο πλήθος από κυψέλες μικρού μεγέθους (Small Cell) και μικρής εμβέλειας, έτσι ώστε κάθε κυψέλη να εξυπηρετεί έναν πολύ μικρό αριθμό συσκευών, καθώς και η χρήση σταθμών κεραιών με πολλές κεραίες, αυξάνοντας συνολικά το πλήθος των συσκευών που θα εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από κάθε σταθμό βάσης.

Επιπλέον, οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών για εφαρμογές και υπηρεσίες δημοφιλούς περιεχομένου πολυμέσων (Popular Multimedia Content) γίνονται εντονότερες, καθώς η παρακολούθηση ροής βίντεο (Video Streaming) αποτελεί πλέον βασικό κομμάτι της πλοήγησης στο διαδίκτυο. Αν λάβουμε υπόψιν τη αύξηση της ανάλυσης εικόνας (Display Resolution) στα βίντεο που σήμερα φτάνει μέχρι και το 8K, τις απαιτήσεις για βίντεο πολύ υψηλής ανάλυσης με πολλά καρέ ανά δευτερόλεπτο (Frames Per Second – FPS) σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality – VR) καθώς και τις επιπλέον καθυστερήσεις που οφείλονται στην ενδεχομένως μεγάλη απόσταση μεταξύ των εξυπηρετητών και των συσκευών των τελικών χρηστών που αιτούνται βίντεο, η εμπειρία προβολής βίντεο μπορεί να γίνει πολύ φτωχή για τους τελικούς χρήστες. Οπότε, είναι απαραίτητη η μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων από άκρο σε άκρο του δικτύου.

Παράλληλα, για να μπορούν να προσφέρονται υπηρεσίες καλής ποιότητας, αυξάνονται το πλήθος των δεδομένων που μεταδίδονται εντός των δικτύων σε κάθε δευτερόλεπτο, καθώς και το μέγεθος των αποθηκευμένων δεδομένων στις βάσεις δεδομένων (Database) των εξυπηρετητών (Server) των παρόχων ψηφιακού περιεχομένου (Digital Content Provider/Content Provider). Οπότε, ο όγκος των δεδομένων που μεταφέρονται σε κάθε δευτερόλεπτο εντός των δικτύων μεγαλώνει ασταμάτητα, φτάνοντας σε μεγέθη τόσο μεγάλα που απαιτούν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης (Bandwidth) προκειμένου να μεταφέρονται με έναν ικανοποιητικό ρυθμό και να παρέχουν μια καλή εμπειρία χρήσης στους τελικούς χρήστες των δικτύων.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων ταχύτητας, εύρους ζώνης και καθυστέρησης, οι υποδομές των ασύρματων δικτύων πρόσβασης γίνονται ολοένα πιο πολύπλοκες, συμπεριλαμβάνοντας ένα διαρκώς αυξανόμενο πλήθος ανομοιομορφων δικτυακών συσκευών, κάθε μία από τις οποίες θα έχει συγκεκριμένο ρόλο. Για παράδειγμα, όπως αναφέραμε παραπάνω, οι νέοι σταθμοί βάσης που θα αποτελούνται από κυψέλες μικρής εμβέλειας θα πρέπει να συνυπάρχουν, τουλάχιστον προσωρινά, με τους υπάρχοντες σταθμούς βάσης μεγάλης με κυψέλες μεγάλης εμβέλειας καθώς και με πολλές ακόμα συσκευές όπως αναμεταδότες και να υποστηρίζουν ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων, δημιουργώντας έτσι ένα ετερογενές δίκτυο (Heterogeneous Network).

Ωστόσο, για τη συνύπαρξη όλων αυτών των ετερογενών συσκευών είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μηχανισμού συντονισμού που θα επιτρέπει την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που χαρακτηρίζουν ένα τέτοιο ανομοιογενές δίκτυο, όπως η μεγάλη χωρητικότητα και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

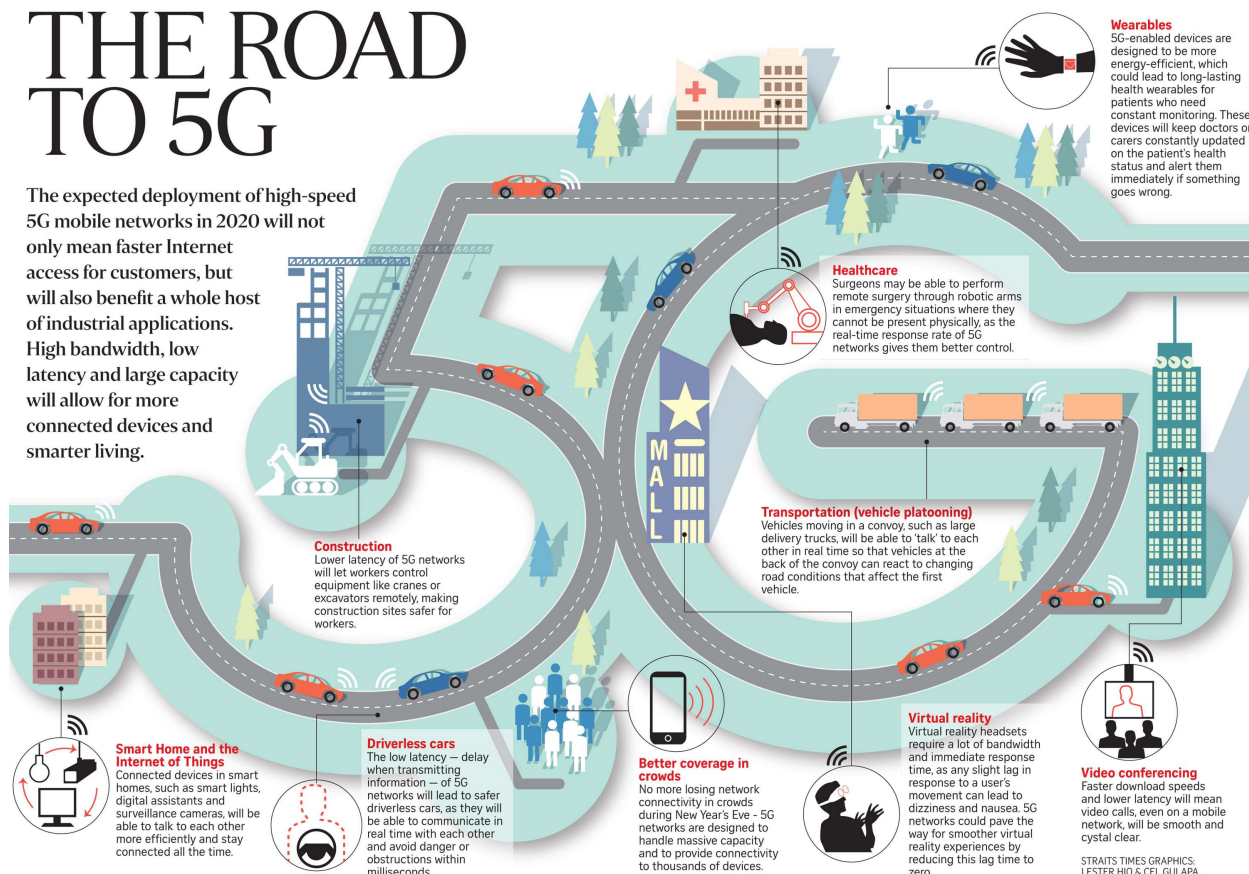
Επιπλέον, καθώς το επίπεδο δικτύου αποτελείται από ένα διαρκώς αυξανόμενο πλήθος δικτυακών συσκευών οι οποίες πρέπει να βρίσκονται συνεχώς σε συνεπή λειτουργία μεταξύ τους και να μπορούν να συνεργαστούν ώστε να προσφέρουν την επιθυμητή λειτουργία. Λόγω της ανάγκης για “αναβάθμιση” των δικτύων, είναι απαραίτητος ένας ενιαίος τρόπος διαχείρισης όλων αυτών των διαφορετικών δικτυακών συσκευών, ώστε να μπορούν να εισάγονται νέες λειτουργίες χωρίς να είναι αναγκαία η εγκατάσταση νέου εξοπλισμού και η αντικατάσταση του παλιού. Αυτή η ανάγκη ικανοποιείται μέσω της ανάπτυξης προγραμματιζόμενων δικτύων και της εικονικοποίησης (Virtualization) δικτυακών λειτουργιών, ώστε να απλοποιηθεί ο δικτυακός εξοπλισμός, να υπάρχει καλύτερη διαχείριση του δικτύου και ταυτόχρονα να προσφέρεται σε προγραμματιστές η δυνατότητα προγραμματισμού της συμπεριφοράς των δικτύων ώστε να δημιουργούν στοχευμένες λειτουργίες και υπηρεσίες.

Μέσω της ύπαρξης μεγάλου εύρους ζώνης και μηδαμινής καθυστέρησης, μπορούν να προσφέρονται εφαρμογές πραγματικού χρόνου (Real-Time Applications) που θα είναι απαραίτητες στο μέλλον. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να παρέχονται στους τελικούς χρήστες των δικτύων και να περιλαμβάνουν την επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality), την εικονική πραγματικότητα, τη μετάδοση και προβολή ζωντανής ροής βίντεο (Live Video Streaming), καθώς και σε επιχειρήσεις και παρόχους υπηρεσιών (Service Providers) και να περιλαμβάνουν την άμεση ενημέρωση των αυτόνομων οχημάτων και την άμεση μεταξύ τους επικοινωνία για την αποφυγή ατυχημάτων, την απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση ασθενών, την απομακρυσμένη παρακολούθηση της υγείας ασθενών, τη δυνατότητα βιντεοσυνδιάσκεψη (Video Conferencing) υψηλής ποιότητας με περισσότερους συμμετέχοντες κλπ..

Εκτός από τη βελτίωση των δικτύων μέσω της εγκατάστασης νέου υλικού, μια ακόμα ιδέα για επιπλέον βελτιώσεις στα νέα δίκτυα είναι εκμετάλλευση του περιβάλλοντος στα άκρα του δικτύου, το οποίο χαρακτηρίζεται από σχεδόν μηδαμινή καθυστέρηση, μεγάλο εύρος ζώνης και ασύρματη πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο. Για να παρέχονται κάποιες από τις παραπάνω υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως στην περίπτωση των αυτόνομων οχημάτων, προβλέπεται η διασύνδεση ενός τεράστιου πλήθους συσκευών, ώστε να διευκολύνεται η άμεση επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών τερματικών συσκευών με σκοπό το συνδυασμό όλων των πληροφοριών που παρέχουν οι συσκευές αυτές, έτσι ώστε να προσφέρονται πιο ολοκληρωμένες υπηρεσίες και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου τοπικά. Μέσω της διαθεσιμότητας δυνατοτήτων υπολογισμών μέσω νέφους (Cloud Computing) και καθώς και ενός περιβάλλοντος υπηρεσιών τεχνολογίας πληροφοριών (Information Technology – IT) για τους προγραμματιστές στα άκρα των δικτύων, μπορούν να αναπτυχθούν καινοτόμες δικτυακές εφαρμογές και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες θα είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν στους σταθμούς βάσης των κυψελωτών δικτύων και/ή σε άλλες συσκευές στα άκρα των δικτύων, μειώνοντας τη συμφόρηση του πυρήνα των δικτύων, μεταφέροντας το υπολογιστικό κόστος πιο κοντά στις τελικές συσκευές. Στις υπηρεσίες αυτές συμπεριλαμβάνονται η άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών (Device-to-Device Communication – D2D), επικοινωνία μεταξύ μηχανημάτων (Machine-Type Communication), η επαυξημένη πραγματικότητα, η εικονική πραγματικότητα, τα “έξυπνα” σπίτια (Smart Living) και οι “έξυπνες” πόλεις (Smart Cities), τα “έξυπνα” δίκτυα ηλεκτροδότησης (Smart Electrical Grid), τα “έξυπνα” οδικά δίκτυα (Smart Highway/Road), κλπ. (βλ. Εικόνα 3).

THE ROAD TO 5G

The expected deployment of high-speed 5G mobile networks in 2020 will not only mean faster Internet access for customers, but will also benefit a whole host of industrial applications. High bandwidth, low latency and large capacity will allow for more connected devices and smarter living.



Εικόνα 3: Στόχοι και Υπηρεσίες 5G [7]

Μέσα στο πλαίσιο της ανάπτυξης των παραπάνω υπηρεσιών νέφους (Cloud) στα άκρα των δικτύων είναι και η εφαρμογή “έξυπνων” τεχνικών, οι οποίες προσφέρουν διευκολύνσεις στους παρόχους περιεχομένου και στους παρόχους υπηρεσιών δικτύου (Network Service Providers). Μια τέτοια “έξυπνη” τεχνική – υπηρεσία είναι η προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου (Caching). Μέσω της προσωρινής αποθήκευσης του δημοφιλούς περιεχομένου μεγάλου μεγέθους, όπως τα δημοφιλή βίντεο, στο άκρο ενός δικτύου όπως π.χ. σε ένα σταθμό βάσης ή σε κάποια συσκευή που αναλαμβάνει το ρόλο του εξυπηρετητή προσωρινής αποθήκευσης (Cache Server), επιτυγχάνεται ο ταχύτερος διαμοιρασμός του περιεχομένου μεταξύ των συσκευών τοπικά, διότι δεν είναι απαραίτητη η εκ νέου λήψη των δεδομένων από τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή αν αυτό ζητηθεί από κάποια άλλη συσκευή στο ίδιο τοπικό δίκτυο εφόσον το περιεχόμενο είναι πλέον άμεσα διαθέσιμο εντός του τοπικού δικτύου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η εμπειρία χρήσης των τελικών χρηστών των δικτύων αφού αντιμετωπίζουν λιγότερα κολλήματα λόγω της μείωσης της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο, καθώς και η γενικότερη απόκριση των δικτύων λόγω της μείωσης του φόρτου που προέρχεται από τη ροή δεδομένων.

Εκτός από την εφαρμογή του caching στους σταθμούς βάσης ή σε άλλες δικτυακές συσκευές, είναι δυνατή η χρήση των συσκευών των τελικών χρηστών για την προσωρινή αποθήκευση του δημοφιλούς περιεχομένου. Με αυτό τον τρόπο, σε συνδυασμό με την άμεση επικοινωνία μεταξύ των συσκευών εντός των ασύρματων δικτύων, μπορεί να υπάρξει διαμοιρασμός του περιεχομένου από συσκευή σε συσκευή εντός ενός τοπικού δικτύου, βελτιώνοντας έτσι τη διαδικασία της εκ των προτέρων λήψης μέρους ή και ολόκληρου του δημοφιλούς περιεχομένου, υπό την προϋπόθεση ότι κάποιες από τις συσκευές στο δίκτυο έχουν αποθηκευμένο μέρος του περιεχομένου αυτού. Με τον τρόπο αυτό, ένας χρήστης μπορεί να προχωρήσει σε άμεση προβολή του

περιεχομένου που έχουν αποθηκεύσει άλλες συσκευές, όταν η συσκευή του είναι εντός του τοπικού δικτύου και/ή μπορεί να αντιγράψει στη δική του συσκευή μέρος από το περιεχόμενο αυτό ώστε να είναι διαθέσιμο όταν η συσκευή βρίσκεται εκτός του τοπικού δικτύου με αποτέλεσμα να απαιτείται η λήψη μόνο ενός μέρους του περιεχομένου από τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή, μειώνοντας το χρόνο αναμονής του χρήστη για την προβολή του περιεχομένου και το φόρτο του δικτύου δικτύου.

1.2 Από το 4G-LTE στο 5G

Η έρευνα και ανάπτυξη για τα δίκτυα 5G έρχεται ως φυσικό επακόλουθο της εξέλιξης της τεχνολογίας. Ωστόσο, εκτός από την εξέλιξη αυτή, σημαντικό ρόλο στην κινητοποίηση για την έρευνα έπαιξαν οι περιορισμοί των δικτύων 4G-LTE. Τα δίκτυα 4G-LTE αναπτύχθηκαν σε μια εποχή που οι απαιτήσεις των ανθρώπων από τα δίκτυα ήταν τελείως διαφορετικές από τις σημερινές και ως εκ τούτου οι σημερινές και οι μελλοντικές απαιτήσεις από τα δίκτυα δεν μπορούν να καλυφθούν από το 4G-LTE.

Με την αύξηση του πλήθους των συσκευών IoT και το ρόλο που παίζει πλέον το διαδίκτυο στην καθημερινότητά μας οδηγηθήκαμε στη διόγκωση του πλήθους των δεδομένων που μεταφέρονται σε κάθε δευτερόλεπτο εντός των δικτύων και στον κορεσμό των ασύρματων δικτύων πρόσβασης. Οπότε έγινε εμφανής η περιορισμένη χωρητικότητα των δικτύων καθώς και το μη επαρκές εύρος ζώνης. Με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που εισάγονται σιγά-σιγά στη ζωή μας και την ανάγκη μας για τη διασύνδεση όλων αυτών των τεχνολογιών αλλά και για την παροχή νέων υπηρεσιών νέφους και πραγματικού χρόνου, απαιτούνται νέες υποδομές δικτύων. Οπότε, η εισαγωγή νέου υλικού και λογισμικού, μέσω του οποίου θα μπορέσουν να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί του 4G-LTE και να παρέχονται οι νέες παραπάνω υπηρεσίες, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για το μέλλον των δικτύων.

Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφονται πιο αναλυτικά οι κύριοι περιορισμοί των δικτύων 4G-LTE και πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των δικτύων 4G-LTE και των τεχνικών σχεδίασης των δικτύων 5G ώστε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί αυτοί.

1.2.1 Περιορισμοί στο 4G-LTE

Ο τεράστιος και διαρκώς αυξανόμενος όγκος των δεδομένων που μεταφέρονται μέσα από τα δίκτυα σε κάθε δευτερόλεπτο, έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο πρόβλημα συμφόρησης στα υπάρχοντα δίκτυα, με μεγάλες καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο. Λόγω του περιορισμένου φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στα δίκτυα 4G-LTE για τη μετάδοση δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει σχετικά χαμηλές συχνότητες, υπάρχει ένα πρόβλημα ταχύτητας και απόκρισης των δικτύων.

Το διαρκώς αυξανόμενο πλήθος συσκευών που διαθέτουν τη δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης σε δίκτυα, δημιουργεί μια μεγάλη δυσκολία στην ταυτόχρονη εξυπηρέτησή τους. Οι σταθμοί βάσης των δικτύων 4G-LTE χρησιμοποιούν μακροκυψέλες (Macrocell), δηλαδή κυψέλες μεγάλου μεγέθους και μεγάλης εμβέλειας, οι οποίες στέλνουν σήματα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω τους προκειμένου να καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, γεγονός που σημαίνει ότι σε σημεία επικάλυψης σημάτων από διαφορετικούς σταθμούς βάσης υπάρχει παρεμβολή. Επίσης, το περιορισμένο φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης οδηγεί στο φαινόμενο πολλές συσκευές να ανταγωνίζονται μεταξύ τους για πόρους των δικτύων λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας, φαινόμενο που γίνεται ιδιαίτερα αισθητό κατά

τις ώρες αιχμής και/ή σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Τα παραπάνω δύο προβλήματα, είτε ξεχωριστά είτε συνδυαστικά, οδηγούν σε επιπλέον καθυστερήσεις μετάδοσης και λήψης δεδομένων καθώς και σε προσωρινές αποσυνδέσεις των συσκευών.

Στα δίκτυα 4G-LTE, οι μακροκυψέλες που χρησιμοποιούνται προκειμένου να παράγονται σήματα που να καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές στέλνουν ηλεκτρομαγνητικά σήματα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από τους σταθμούς βάσης. Ωστόσο, ενδέχεται σε κάποιες από τις περιοχές που καλύπτονται από τα σήματα αυτά να μην υπάρχουν συσκευές που να αιτούνται σύνδεση με το δίκτυο, είτε προσωρινά είτε συνεχώς. Η διαρκής κάλυψη τέτοιων περιοχών πρακτικά σημαίνει πως υπάρχει μια σπατάλη ενέργειας η οποία καταναλώνεται για την παροχή υπηρεσιών δικτύων χωρίς να υπάρχει ζήτηση γι' αυτές.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για την ανάπτυξη νέων, καινοτόμων υπηρεσιών νέφους, οι οποίες θα προσφέρονται μέσω των δικτύων στους τελικούς χρήστες, στους προγραμματιστές, στους παρόχους, στους διαχειριστές των δικτύων κλπ., έχει γίνει πιο επιτακτική από ποτέ. Μεταξύ των στόχων για τις υπηρεσίες, είναι η ύπαρξη μιας μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών, οι οποίες θα προσφέρονται από διάφορα σημεία των δικτύων, όχι απαραίτητα από τον πυρήνα τους αλλά ακόμα και από τους σταθμούς βάσης στα άκρα των δικτύων. Με τη βελτίωση των συσκευών των χρηστών αλλά και του υλικού των συσκευών των δικτύων, η δημιουργία τέτοιων υπηρεσιών είναι πλέον δυνατή. Ωστόσο, οι υποδομές των δικτύων 4G-LTE δεν προσφέρουν τη δυνατότητα ανάπτυξης τέτοιων υπηρεσιών.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, απαιτούνται νέες υποδομές στα δίκτυα. Οι υποδομές αυτές περιλαμβάνουν νέες συσκευές οι οποίες είτε θα αντικαταστήσουν τις ήδη υπάρχουσες συσκευές των δικτύων, είτε θα συνυπάρχουν, τουλάχιστον προσωρινά, με αυτές. Οπότε, με την εγκατάσταση όλων αυτών των νέων συσκευών ουσιαστικά οδηγούμαστε σε μια νέα γενιά δικτύων, αφού υπάρχει σημαντική διαφορά και εξέλιξη σε σχέση με τις υποδομές των δικτύων 4G-LTE. Ας δούμε πιο αναλυτικά κάποιες βασικές διαφοροποιήσεις των δικτύων 4G-LTE από τα επερχόμενα δίκτυα 5G.

1.2.2 Διαφορές 4G-LTE και 5G

Στο υποκεφάλαιο 1.2.1 παραθέσαμε τους κύριους περιορισμούς των δικτύων 4G-LTE. Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναφέρουμε συνοπτικά τους τρόπους και τις τεχνολογίες μέσω των οποίων θα ξεπεραστούν οι περιορισμοί αυτοί στα δίκτυα 5G. Στο κεφάλαιο 2 θα αναλύσουμε τις τεχνολογίες αυτές σε μεγαλύτερο βάθος.

Στα δίκτυα 4G-LTE, το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του ασύρματου δικτύου που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει συχνότητες μέχρι 6 GHz. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το φάσμα είναι πολύ περιορισμένο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μια πολύ μικρή χωρητικότητα στα ασύρματα δίκτυα, λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, στο 5G θα χρησιμοποιούνται συχνότητες από 30 GHz μέχρι 300 GHz εξασφαλίζοντας έτσι ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, το οποίο θα προσφέρει επαρκή χωρητικότητα τόσο για τον τρέχοντα όγκο δεδομένων όσο και για τη μελλοντική αύξησή του.

Ένα άλλο πρόβλημα των δικτύων 4G-LTE είναι ο ανταγωνισμός των χρηστών για πόρους στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Η αιτία του προβλήματος είναι ότι οι μακροκυψέλες παράγουν σήματα τα οποία καλύπτουν πολύ μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, οπότε σε κάθε σταθμό βάσης με μακροκυψέλες αντιστοιχούν πολλές συσκευές, οι οποίες ταυτοχρόνως αιτούνται πόρους του δικτύου. Λόγω αυτού η

ταυτόχρονη εξυπηρέτηση του διαρκώς αυξανόμενου πλήθους των ασύρματων συσκευών σε κοντινές περιοχές γίνεται δυσκολότερη. Επίσης λόγω του αρκετά μεγάλου μήκους κύματος που παράγεται από τους σταθμούς βάσης μπορεί να υπάρχει παρεμβολή μεταξύ σημάτων από διαφορετικούς σταθμούς βάσης σε περιοχές που υπάρχει αλληλοεπικάλυψη. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, στο 5G θα χρησιμοποιούνται σταθμοί βάσης με κυψέλες μικρού μεγέθους, οι οποίες θα παράγουν σήματα μικρού μήκους κύματος τα οποία έχουν κατευθυνόμενη/προσανατολισμένη φύση. Λόγω της φύσης των σημάτων αυτών, θα μπορεί να υπάρχει στοχευμένη εξυπηρέτηση συσκευών. Η κατευθυνόμενη φύση σε συνδυασμό με το πολύ υψηλό φάσμα συχνοτήτων δίνουν τη δυνατότητα στα σήματα αυτά να συνυπάρχουν ταυτόχρονα, ίδια γεωγραφική περιοχή, με άλλα σήματα είτε του ίδιου φάσματος, είτε του φάσματος του 4G-LTE, είτε του φάσματος του WiFi κλπ., χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές. Οπότε, στα δίκτυα 5G θα μπορούν να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα σημαντικά περισσότερες συσκευές ανά μέτρο, σε σχέση με το 4G-LTE.

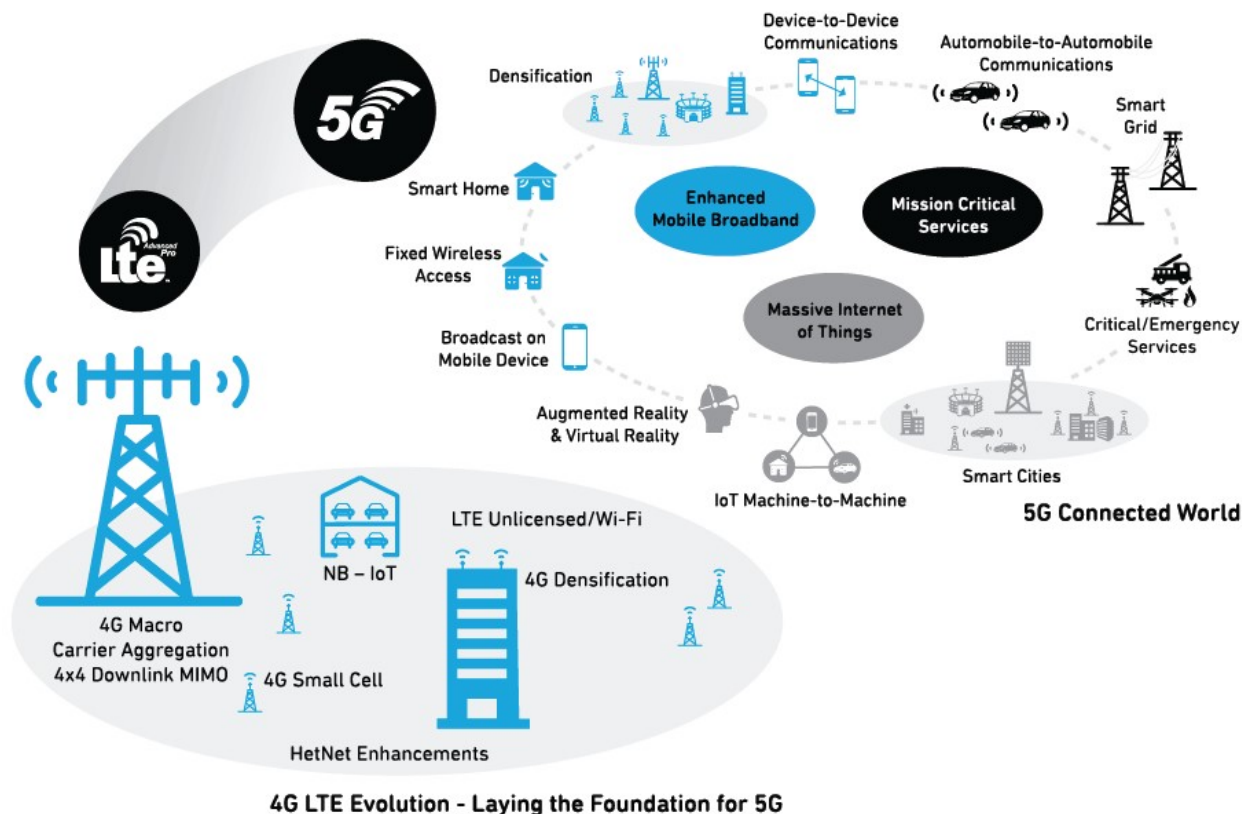
Στα δίκτυα 4G-LTE παρατηρείται μια τεράστια σπατάλη ενέργειας και υψηλό κόστος λειτουργία, καθώς από τους σταθμούς βάσης στέλνονται συνεχώς σήματα προς όλες τις κατευθύνσεις σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμα και αν δεν υπάρχει ζήτηση για μετάδοση δεδομένων σε κάποια από τα σημεία κάλυψης. Στα δίκτυα 5G, λόγω της προσανατολισμένης φύσης των σημάτων και των κυψελών μικρού μεγέθους που τα παράγουν θα υπάρξει σημαντική μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των σταθμών βάσης. Ακόμα, σε αντίθεση με τα δίκτυα 4G-LTE, στα δίκτυα 5G θα υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης του τύπου των δεδομένων που αιτείται ένα τελικός χρήστης καθώς και η λειτουργία προσαρμογής της κατανάλωσης ισχύος των σταθμών βάσης ανάλογα με το ρυθμό που μεταφέρονται τα δεδομένα. Με τη λειτουργία αυτή, όταν μεταφέρονται δεδομένα με υψηλό ρυθμό ο σταθμός βάσης θα λειτουργεί σε υψηλή ισχύ, ενώ όταν μεταφέρονται δεδομένα με χαμηλό ρυθμό ο σταθμός βάσης να λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι κυψέλες μικρού μεγέθους θα μπορούν να απενεργοποιούνται σε περίπτωση που δεν υπάρχει ζήτηση για δεδομένα, οδηγώντας σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας για τα 5G δίκτυα και μείωση του κόστους λειτουργίας.

Επιπλέον, στα δίκτυα 4G-LTE οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για τους τελικούς χρήστες σύντομα δε θα επαρκούν. Εκτός από την πολύ μεγάλη αύξηση του μεγέθους των δεδομένων, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια ραγδαία άνθιση των υπηρεσιών ροής περιεχομένου, κυρίως ροής βίντεο. Τέτοιου είδους υπηρεσίες, προκειμένου να προσφέρουν περιεχόμενο υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιούν ολοένα υψηλότερη ανάλυση εικόνας και περισσότερα πλαίσια ανά δευτερόλεπτο, το οποίο οδηγεί σε ένα πολύ μεγάλο μέγεθος των δεδομένων. Ταυτοχρόνως, με την αύξηση της ανάλυσης των οθονών των συσκευών, αυξάνεται και η ζήτηση για περιεχόμενο βίντεο πολύ υψηλής ανάλυσης. Ωστόσο, ο τρέχον ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για κάθε χρήστη των δικτύων δεν επαρκεί για μια καλή εμπειρία προβολής βίντεο υψηλής ανάλυσης. Στα δίκτυα 5G οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων θα αυξηθούν τόσο ώστε ακόμα και στη χειρότερη περίπτωση ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που θα προσφέρεται στους χρήστες θα επαρκεί για την συνεχή και χωρίς κολλήματα προβολή των βίντεο υψηλής ανάλυσης.

Οι υποδομές των δικτύων 4G-LTE αποτελούνται από δικτυακές συσκευές οι οποίες είναι κλειστές, ιδιόκτητες, συγκεκριμένης λειτουργικότητας και από ποικίλους κατασκευαστές. Λόγω της ανομοιομορφίας τους και της κλειστής τους φύσης, οι συσκευές αυτές δεν προσφέρουν τη δυνατότητα για τον εκ νέου προγραμματισμό τους ώστε να δημιουργηθούν στοχευμένες λειτουργίες και υπηρεσίες μέσω των δικτύων. Οι υποδομές των δικτύων 5G θα περιλαμβάνουν νέες συσκευές οι οποίες θα παρέχουν τη δυνατότητα προγραμματισμού της λειτουργίας τους. Μέσω του προγραμματισμού,

μπορούν να δημιουργηθούν στοχευμένες λειτουργίες, δυνατότητες και υπηρεσίες προς τους παρόχους, τους διαχειριστές των δικτύων, τους προγραμματιστές και τους τελικούς χρήστες.

Τέλος, με την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των δικτυακών συσκευών στα άκρα του δικτύου και των τερματικών συσκευών για να παρέχονται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που θα είναι απαραίτητες καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία και αλλάζουν οι ανάγκες μας.



Εικόνα 4: Από το LTE στο 5G [8]

1.3 Ποσοτικοί στόχοι του 5G

Στα υποκεφάλαια 1.2.1 και 1.2.2 έγινε μια πολύ σύντομη αναφορά σε κάποιους από τους ποσοτικούς στόχους των δικτύων 5G σε σχέση συγκριτικά με τα δίκτυα 4G-LTE. Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά στους βασικότερους ποσοτικούς στόχους των δικτύων 5G, παραθέτοντας συγχρόνως τους αναμενόμενους δείκτες βελτίωσης σε σχέση με τα δίκτυα 4G-LTE [4], [5], [6], [9], [10]. Κάποιοι από τους στόχους μπορούν να είναι άμεσα επιτεύξιμοι στα δίκτυα 5G από την εφαρμογή τους, ενώ για κάποιους άλλους ενδεχομένως να χρειαστεί να περάσουν χρόνια και να εξελιχτεί σημαντικά ο δικτυακός εξοπλισμός και οι τερματικές συσκευές μέχρι να επιτευχθούν.

1. Βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των κυψελωτών δικτύων.

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι αδιαμφισβήτητο το κυριότερο κίνητρο για τη μετάβαση από το 4G-LTE στο 5G. Υπάρχουν 3 διαφορετικοί τρόποι για τη μέτρηση

του ρυθμού αυτού, για κάθε έναν από τους οποίους έχουν τεθεί ξεχωριστοί ποσοτικοί στόχοι.

- Συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Aggregate Data Rate)

Ο όρος αυτός περιγράφει το συνολικό πλήθος των δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο και η μονάδα μέτρησης είναι το κλάσμα bits/sec/area. Ο στόχος για το συγκεκριμένο ρυθμό είναι μια βελτίωση κατά ένα παράγοντα περίπου ίσο με 1000.

- Ακραίος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Edge Rate)

Ο όρος αυτός περιγράφει το χειρότερο/ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να αναμένει ένας χρήστης όταν βρίσκεται εντός της κάλυψης του δικτύου. Ο στόχος για το συγκεκριμένο ρυθμό είναι η αύξησή του από το 1 Mbps των δικτύων 4G-LTE σε τουλάχιστον 100 Mbps ως και 1 Gbps στα δίκτυα 5G, δηλαδή μια βελτίωση κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον ίσο με 100.

- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αιχμής (Peak Rate)

Ο όρος αυτός περιγράφει τον καλύτερο/μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να αναμένει ένας χρήστης όταν βρίσκεται εντός της κάλυψης του δικτύου. Ο στόχος για το συγκεκριμένο ρυθμό είναι η αύξησή του από το 1 Gbps των δικτύων 4G-LTE σε τουλάχιστον 20 Gbps, δηλαδή μια βελτίωση κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον ίσο με 20.

2. Μείωση της καθυστέρησης μεθ' επιστροφής (Turnaround Latency) εντός των δικτύων από 15ms σε περίπου 1ms, δηλαδή βελτίωση κατά ένα παράγοντα περίπου ίσο με 5, διατηρώντας την αξιοπιστία του δικτύου σε επίπεδο της τάξης του 99.99%.

3. Ικανοποιητική εξυπηρέτηση των συσκευών των χρηστών οι οποίοι βρίσκονται σε κίνηση με ταχύτητες ως και 500 km/h.

4. Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά bit σε επίπεδο μικρότερο του 1/100 της τρέχουσας, δηλαδή βελτίωση κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον ίσο με 100.

5. Μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά 90% σε σχέση με το 4G-LTE.

6. Μείωση του κόστους ανά bit σε επίπεδο μικρότερο του 1/100 του τρέχοντος, δηλαδή βελτίωση κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον ίσο με 100.

7. Μείωση του κόστους ανά Hz σε επίπεδο μεταξύ του 1/10 και του 1/100 του τρέχοντος, δηλαδή βελτίωση τουλάχιστον κατά ένα παράγοντα από 10 μέχρι και 100.

8. Αύξηση των ταχυτήτων στις ασύρματες συνδέσεις εσωτερικού χώρου και σε WiFi hotspots, καθώς στο μέλλον αναμένεται το πλήθος των δεδομένων που μεταφέρονται ασύρματα από και προς εσωτερικούς χώρους και WiFi hotspots να αποτελεί 90% του συνόλου των δεδομένων που μεταφέρονται στο διαδίκτυο.

9. Μεγαλύτερη ασυμμετρία της μετάδοσης δεδομένων, καθώς ο σημερινός λόγος της ταχύτητας κατεβάσματος προς την ταχύτητα ανεβάσματος που είναι 6:1, λόγω της αύξησης της ζήτησης για video streaming, αναμένεται μέχρι το 2020 να χρειαστεί να αλλάξει σε 10:1, προσφέροντας μεγαλύτερη ασυμμετρία.

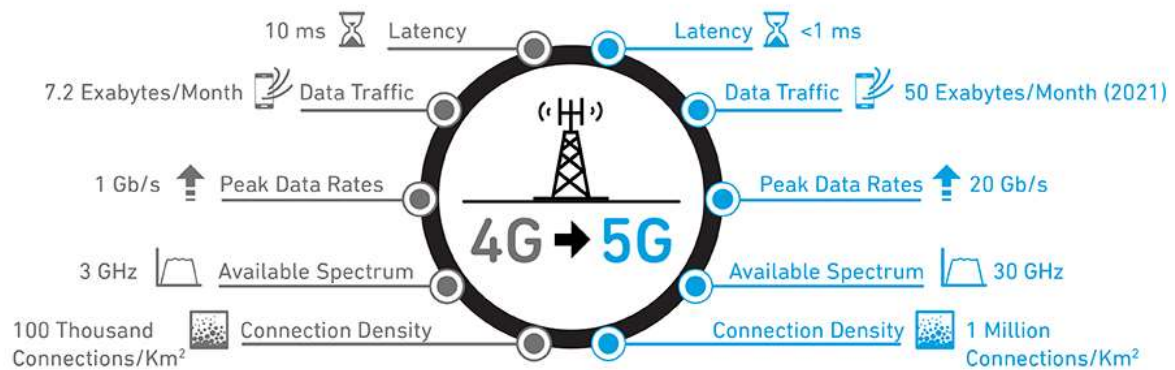
10. Βελτίωση του μέγιστου πλήθους των συσκευών που μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης μέσω της πύκνωσης του ασύρματου δικτύου πρόσβασης κατά ένα παράγοντα από 10 μέχρι και 100, αφού λόγω της ανάγκης για άμεση επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών αναμένεται κάθε μακροκυψέλη να πρέπει να υποστηρίζει περισσότερες από 10,000 συσκευές μικρών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης και ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων παράλληλα με τις

συσκευές των χρηστών που έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων.

11. 100% κάλυψη και 99.999% διαθεσιμότητα ασύρματου δικτύου σε όλες τις περιοχές.

12. Μέχρι και 10 χρόνια διάρκεια μπαταρίας για συσκευές τύπου μηχανής (Machine-type Device) που έχουν χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Comparing 4G and 5G



QORVO

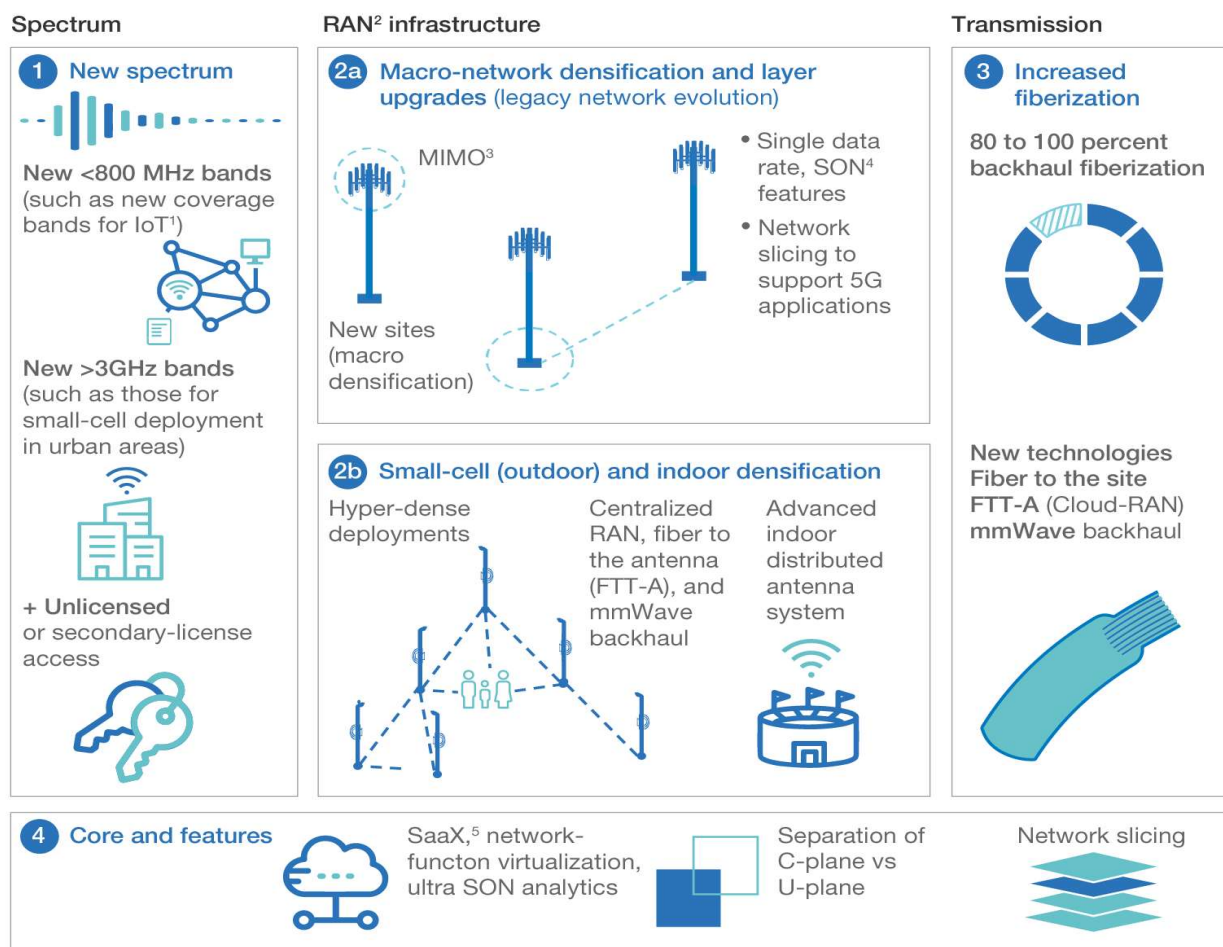
©2017 Qorvo, Inc.

Εικόνα 5: Ποσοτικές διαφορές LTE και 5G [11]

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

2.1 Εισαγωγή

Στο υποκεφάλαιο 1.3 περιγράφηκαν με ακρίβεια κάποιοι από τους ποσοτικούς στόχους των δικτύων 5G. Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, μεταξύ άλλων, είναι απαραίτητη μια αλλαγή στις υποδομές των δικτύων, τόσο στο φυσικό επίπεδο όσο και στα επίπεδα πρόσβασης και δικτύου. Οπότε, στο 5G θα υπάρξουν επενδύσεις για την ανάπτυξη εξοπλισμού που θα αξιοποιεί τις προτεινόμενες τεχνολογίες μέσω των οποίων θα ικανοποιηθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές (βλ. Εικόνα 6). Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφονται οι κυριότερες από τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα 5G.



¹Internet of Things.

²Radio access network.

³Multiple input and multiple output.

⁴Self-organizing network.

⁵Software as a X.

Εικόνα 6: Επενδύσεις σε εξοπλισμό των δικτύων 5G [12]

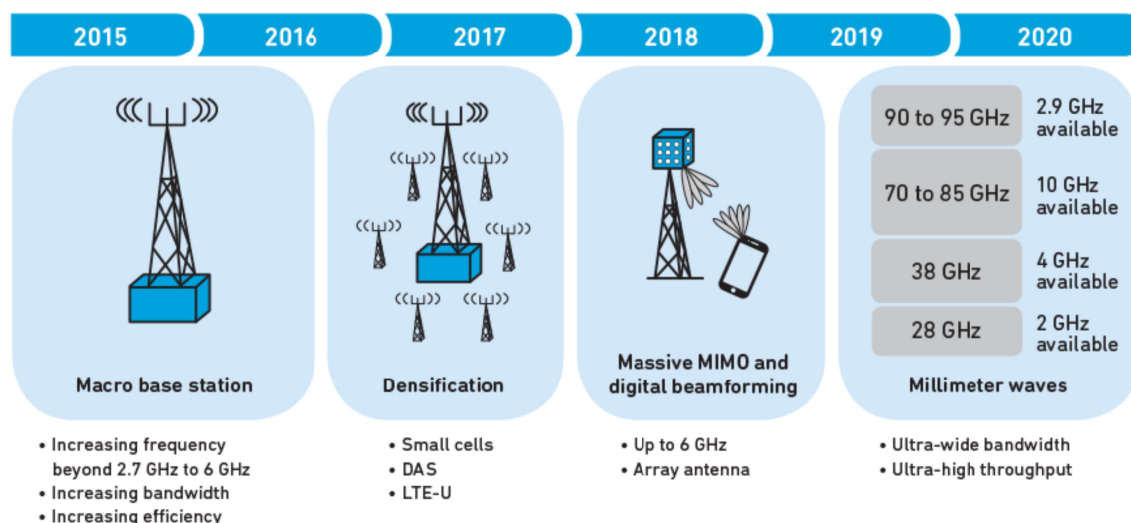
Μια γενική παρατήρηση ερευνητών [13] είναι ότι οι περισσότεροι από τους χρήστες ασύρματων δικτύων παραμένουν σε εσωτερικούς χώρους για το 80% του χρόνου σύνδεσής τους, ενώ μόνο το 20% του χρόνου σύνδεσής του βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους. Για να αποφευχθούν – ξεπεραστούν οι συνέπειες σε απώλεια αποδοτικότητας, εύρους ζώνης, ρυθμό μετάδοσης καθώς και η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας κατά τη

διάδοση των σημάτων μέσα από τους τοίχους, προτάθηκε ο διαχωρισμός του ασύρματου δικτύου σε δύο μέρη, το “εσωτερικό” και το “εξωτερικό” ασύρματο δίκτυο.

Το εσωτερικό ασύρματο δίκτυο θα αποτελείται από τις κυψέλες μικρού μεγέθους, που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.2 σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπως η τεχνολογία mmWave που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.3. Το “εξωτερικό” ασύρματο δίκτυο θα αποτελείται εν μέρει από τις κυψέλες μικρού μεγέθους καθώς και από τις μακροκυψέλες. Για για τη σύνδεσή του με το “εσωτερικό” δίκτυο θα χρησιμοποιεί την τεχνολογία Massive MIMO η οποία περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.4. Αυτές είναι οι βασικές τεχνολογίες που θα εφαρμοστούν στο φυσικό επίπεδο και θα βοηθήσουν στην επίτευξη των προδιαγραφών του 5G. Σημαντικό ρόλο θα παίξουν επίσης οι αναμεταδότες και η καλωδίωση οπτικών ινών.

Η μετάβαση από το 4G-LTE στο 5G, σε υποδομές φυσικού επιπέδου θα γίνουν σταδιακά (βλ. Εικόνα 7). Οπότε, αρχικά θα ξεκινήσει η διαδικασία της εγκατάστασης των νέων υποδομών, με ένα συγκεκριμένο πλάνο και χρονοδιάγραμμα και στη συνέχεια θα γίνει η εφαρμογή των νέων πρωτοκόλλων στις τερματικές συσκευές. Επίσης, η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του 5G θα αργήσει να έρθει, αφού θα χρειαστεί να αναβαθμιστούν/αντικατασταθούν όλες οι τερματικές συσκευές προκειμένου να υποστηρίξουν τα νέα πρωτόκολλα του 5G. Οπότε, στο πρώτο διάστημα λειτουργίας του, το 5G θα συνυπάρχει με το 4G-LTE.

The Evolution of 5G



QORVO

©2017 Qorvo, Inc.

Εικόνα 7: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης του 5G στο φυσικό επίπεδο [14]

2.2 Small cells

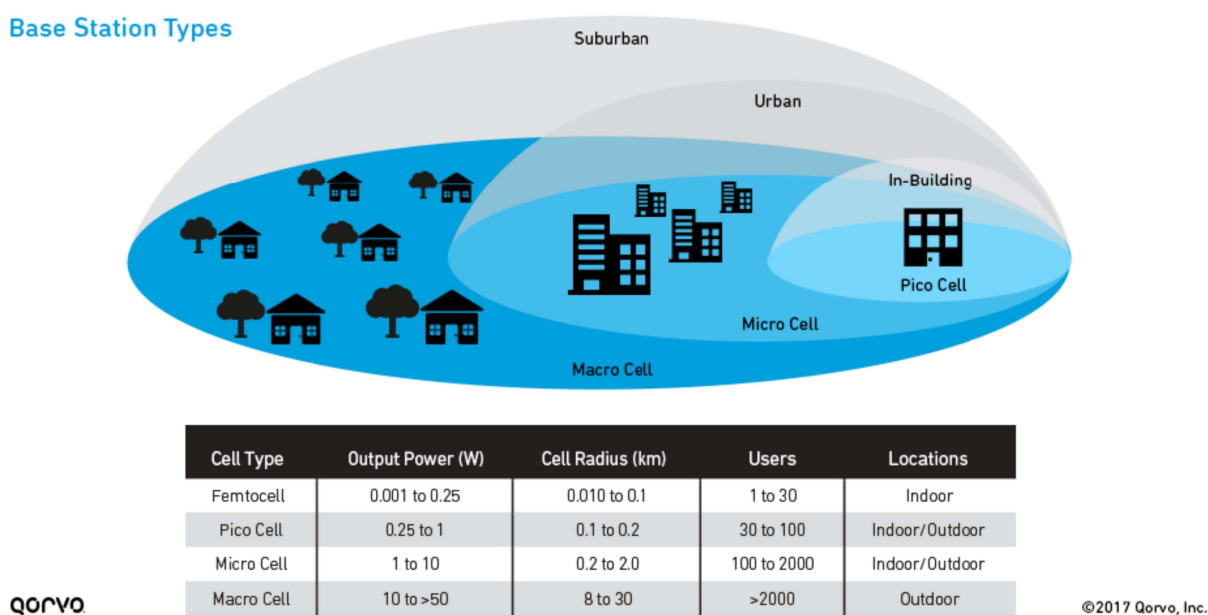
Στα υποκεφάλαια 1.1 και 1.2.1 αναφέραμε τις μακροκυψέλες και τις κυψέλες μικρού μεγέθους, οι οποίες βρίσκονται στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης και σκοπός τους είναι να εξυπηρετούν τη σύνδεση των ασύρματων συσκευών με τα δίκτυα. Όπως αναφέραμε, το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης του 4G-LTE αποτελείται κυρίως από μακροκυψέλες, οι οποίες με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τους καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές σε αποστάσεις μέχρι και 35 km γύρω από το σταθμό βάσης τους. Για τα δίκτυα

5G προβλέπεται, παράλληλα με τη χρήση των ήδη υπαρχουσών μακροκυψελών, η χρήση κυψελών μικρού μεγέθους [4], [5], [6], [15].

Ο όρος κυψέλη μικρού μεγέθους είναι πολύ γενικός και περιλαμβάνει τρεις βασικές κατηγορίες κυψελών οι οποίες έχουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους:

- Microcell
- Picocell
- Femtocell

Base Station Types



Εικόνα 8: Είδη κυψελών και χαρακτηριστικά [14]

Στην Εικόνα 8 φαίνονται σχηματικά και αναλυτικά οι διαφορές ανάμεσα στα είδη των κυψελών μικρού μεγέθους και στις μακροκυψέλες.

Σε σχέση με τις κυψέλες μεγέθους, οι κυψέλες μικρού μεγέθους κοστίζουν σημαντικά λιγότερο τόσο στην κατασκευή τους όσο και στην εγκατάστασή τους και επιπλέον καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια κατά τη λειτουργία τους ή και καθόλου όταν δεν υπάρχουν συσκευές που να απαιτούν πόρους του δικτύου από κάποια κυψέλη. Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων, με τη χρήση μικρών κυψελών μπορεί να μειωθεί σημαντικά το κόστος λειτουργίας των δικτύων και να οδηγηθούμε σε μια πολύ σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας τόσο για το δίκτυο όσο και για τις συσκευές των τελικών χρηστών των δικτύων και των συσκευών τύπου μηχανής.

Επιπλέον, εφόσον η περιοχή κάλυψης των μικρών κυψελών είναι περιορισμένη γύρω από το σταθμό βάσης, μειώνονται οι παρεμβολές σημάτων από διαφορετικές κυψέλες/σταθμούς βάσης, εξασφαλίζοντας την επαναχρησιμοποίηση του ίδιου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε πολύ κοντινές γεωγραφικές περιοχές. Εκμεταλλευόμενοι το παραπάνω πλεονέκτημα, με την εγκατάσταση picocell και/ή femtocell σε αποστάσεις μικρότερες από 100 m μεταξύ τους, μπορούμε να πετύχουμε μια πολύ μεγάλη πύκνωση του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητά του.

Επίσης, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio) παραμένει σταθερός καθώς το δίκτυο πυκνώνει, γεγονός που επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους των κυψελών μέχρις ότου κάθε κυψέλη να εξυπηρετεί ένα μόνο χρήστη ή να είναι ανενεργή. Οπότε, ακόμα και με την αύξηση των συσκευών που συνδέονται στο διαδίκτυο δε θα υπάρχει έντονος ανταγωνισμός μεταξύ τους για τη διεκδίκηση των πόρων του ασύρματου δικτύου πρόσβασης και της σύνδεσης backhaul, αφού κάθε σταθμός βάσης θα αντιστοιχεί σε ολοένα μικρότερο πλήθος χρηστών.

Μέσα στους αρχικούς στόχους των δικτύων 5G είναι να εγκατασταθούν πολλοί σταθμοί βάσης με femtocell σε εσωτερικούς χώρους, ακριβώς δίπλα στους τελικούς χρήστες των δικτύων, διότι τέτοιου είδους κυψέλες είναι ιδανικές για μικρές αποστάσεις. Συνδυάζοντας το μικρό εύρος γεωγραφικής κάλυψης με τις πολύ υψηλές συχνότητες των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο 5G και την πολύ μικρή απόσταση από τις συσκευές, κάθε τέτοιος σταθμός βάσης θα μπορεί να ξαναχρησιμοποιεί το ίδιο φάσμα συχνοτήτων, άρα θα έχει πολύ μεγάλο εύρος ζώνης και χωρητικότητα, καθώς και πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και όλα αυτά για ολοένα μικρότερο πλήθος συσκευών, ιδανικά αντιστοιχίζοντας μόνο μία συσκευή με κάθε σταθμό βάσης.

Οι κυψέλες μικρού μεγέθους δεν έχουν ως σκοπό να αντικαταστήσουν τις μακροκυψέλες, αλλά να λειτουργούν παράλληλα με αυτές, ως συμπληρωματικός μηχανισμός, αφού δεν είναι απαραίτητο να συνδέονται άμεσα με κάποιο σταθμό βάσης με μακροκυψέλες. Η τεχνολογία microcell είναι κατάλληλη για εξωτερικούς χώρους αλλά σε πολύ περιορισμένη περιοχή, οπότε σχεδιάζεται η χρήση της σε δημόσιους χώρους. Ωστόσο, οι τεχνολογίες picocell και femtocell είναι ακατάλληλες για χρήση σε εξωτερικούς χώρους λόγω του πολύ περιορισμένου εύρους γεωγραφικής κάλυψης.

Λόγω του παραπάνω φαινομένου, σχεδιάζεται να συνδυαστούν οι τεχνολογίες small cell τόσο μεταξύ τους όσο και με την τεχνολογία macrocell, όπου οι κυψέλες μικρού μεγέθους των τοπικών δικτύων θα επικοινωνούν με τις μακροκυψέλες για να πραγματοποιούν σύνδεση των συσκευών με το εξωτερικό δίκτυο. Η ενδιάμεση τεχνολογία που θα χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των κυψελών μικρού μεγέθους με τις μακροκυψέλες είναι η Massive MIMO.

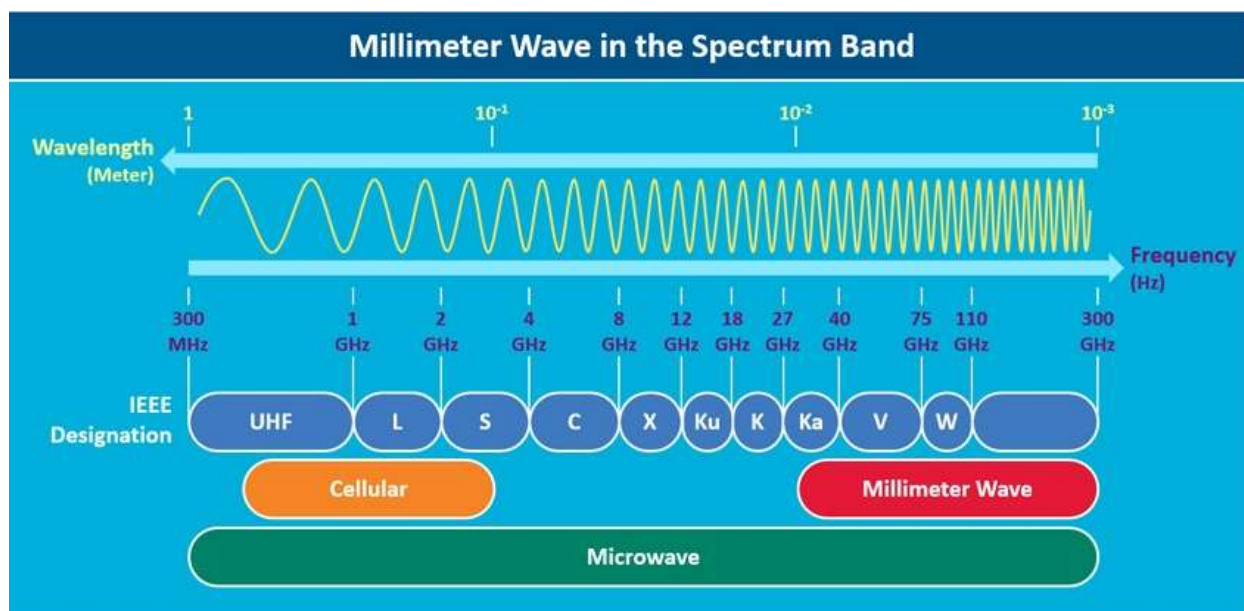
Αυτό σημαίνει ότι η διαχείριση ενός τοπικού δικτύου που αποτελείται αποκλειστικά από κυψέλες μικρού μεγέθους είναι πολύ πιο εύκολη και γρήγορη. Ωστόσο, με το συνδυασμό και τη συνεργασία όλων αυτών των διαφορετικών κυψελών, μειώνεται η ομοιογένεια των ασύρματων δικτύων πρόσβασης, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα διαχείρισής τους.

2.3 Millimeter Waveband

Στο κεφάλαιο 1.2.1 αναφέραμε ότι το τρέχον φάσμα συχνοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στα δίκτυα 4G-LTE είναι πολύ περιορισμένο, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα χωρητικότητας, εύρους ζώνης και ταχύτητας. Όπως αναφέραμε στο υποκεφάλαιο 1.2.2, για να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω περιορισμοί του 4G-LTE, ένας από τους στόχους των ασύρματων δικτύων 5G είναι η χρήση ηλεκτρομαγνητικών σημάτων πολύ μεγάλων συχνοτήτων, στο φάσμα από 30 GHz μέχρι 300 GHz. Ωστόσο, λόγω της σχέσης $\lambda = \frac{v}{f}$ όπου λ είναι το μήκος κύματος του

σήματος, f η συχνότητα του σήματος και v η ταχύτητα διάδοσης του σήματος, είναι εμφανές πως το μήκος κύματος ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητάς του. Οπότε, θεωρώντας ότι η ταχύτητα διάδοσης των

ηλεκτρομαγνητικών σημάτων είναι περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός c , αυτές οι συχνότητες έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών σημάτων πολύ μικρού μήκους, το οποίο κυμαίνεται από 1 mm μέχρι και 10 mm (βλ. Εικόνα 9). Λόγω αυτού, η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων ονομάζεται ζώνη συχνοτήτων του χιλιοστομετρικού μήκους κύματος (Millimeter Waveband – mmWave). Το συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων αποτελεί σημαντικό δομικό στοιχείο των νέων δικτύων 5G [5], [6], [10], [16], [17].



Εικόνα 9: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τηλεπικοινωνιών [18]

Μέχρι στιγμής, για τη μετάδοση δεδομένων και φωνής σε μεγάλη απόσταση, οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούσαν το φάσμα από 700MHz ως 3GHz, που αντιστοιχεί σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος που κυμαίνεται από λίγα cm μέχρι περίπου 1 m. Το φάσμα των 4G-LTE που περιλαμβάνει συχνότητες ως 6 GHz αντιστοιχεί σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος που ξεκινά από τα 5 cm. Πλέον, λόγω της έντονης χρήσης του διαδικτύου και της αύξησης του πλήθους των χρηστών, το φάσμα αυτό έχει καταληφθεί σχεδόν ολόκληρο, κάνοντας την ανάγκη για χρήση υψηλότερων συχνοτήτων επιτακτική. Το φάσμα από 30GHz ως 300GHz μέχρι πρόσφατα ήταν ανεκμετάλλευτο, καθώς είχε κριθεί ακατάλληλο για μεγάλες αποστάσεις λόγω των κακών χαρακτηριστικών διάδοσης των κυμάτων, της απορρόφησής τους από την ατμόσφαιρα και τη βροχή, της χαμηλής τους περιθλασης γύρω από εμπόδια, της αδυναμίας τους να διαδοθούν μέσα από αντικείμενα, του υψηλού θορύβου φάσης και του πολύ υψηλού κόστους του εξοπλισμού που τα δημιουργεί.

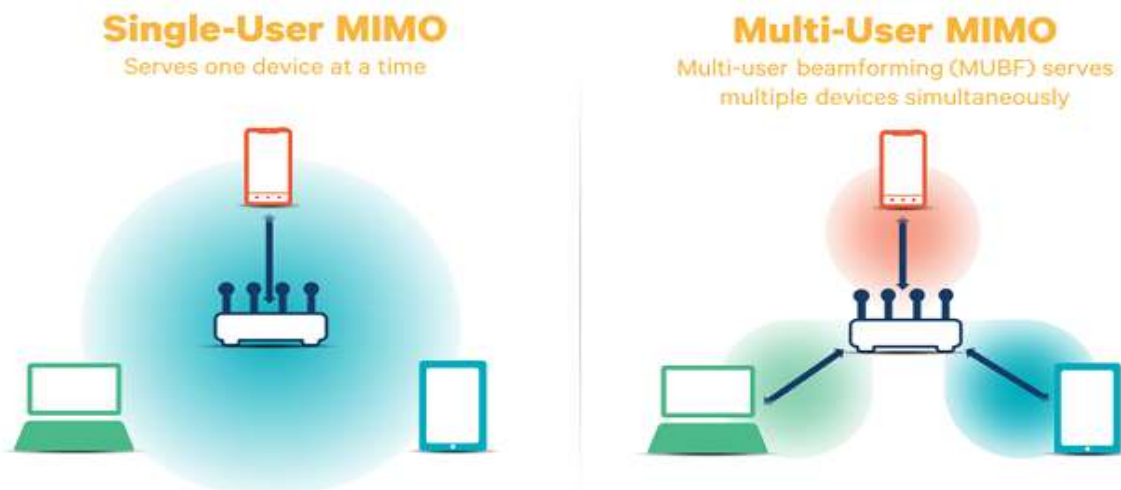
Ωστόσο, λόγω της ωρίμανσης των ημιαγωγών, της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία τους και του κόστους τους, αφού η παραγωγή αυξήθηκε λόγω της χρήσης τους σε δίκτυα WiFi – WiGiG και σε άλλες εφαρμογές, η υπέρβαση των εμποδίων της διάδοσης των συγκεκριμένων κυμάτων θεωρείται εφικτή, με προϋπόθεση τον απαραίτητο χρόνο και την κατάλληλη εστίαση – στόχευση. Για την υπέρβαση των παραπάνω προβλημάτων είναι απαραίτητη η χρήση μεγάλου πλήθους από κεραίες στους σταθμούς βάσης, το οποίο είναι εφικτό διότι το μέγεθος της κεραίας μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας, προκειμένου να κατευθύνεται και να συλλέγεται με συνέπεια η ενέργεια της δέσμης του σήματος, αφού τα σήματα που ανήκουν στα

mmWave χαρακτηρίζονται από μια πολύ έντονα κατευθυνόμενη/προσανατολιζόμενη φύση.

Η κατευθυνόμενη φύση των mmWave, το μικρό μήκος κύματός τους και η υψηλή συχνότητά τους, σε συνδυασμό με το μικρό εύρος γεωγραφικής κάλυψης από τα femtocell και την πύκνωση των δικτύων που μπορεί να επιτευχθεί με αυτά, δίνουν το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλού θορύβου καθώς και της πολύ μικρής παρεμβολής των σημάτων από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να επαναχρησιμοποιείται το φάσμα συχνοτήτων σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης μειώνοντας τον ανταγωνισμό των συσκευών για πόρους δικτύου, αυξάνοντας τη χωρητικότητά του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, παρέχοντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ελάχιστη καθυστέρηση καθώς και σημαντικά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας τόσο για τα δίκτυα όσο και για τις συσκευές.

2.4 Massive Multiple Input Multiple Output

Η τεχνολογία Multiple-Input Multiple-Output ενσαρκώνει τη χωρική διάσταση της επικοινωνίας που δημιουργείται όταν οι σταθμοί βάσης και οι τερματικές συσκευές αποτελούνται από ένα σχετικά μεγάλο πλήθος κεραιών. Εάν οι καταχωρίσεις της μήτρας καναλιών που προκύπτουν παρουσιάζουν – χάρη στην απόσταση, τη διασταυρούμενη πόλωση ή/και τη γωνιακή τοποθέτηση – επαρκή στατιστική ανεξαρτησία, τότε γίνονται διαθέσιμες πολλαπλές χωρικές διαστάσεις για σηματοδότηση και η φασματική απόδοση πολλαπλασιάζεται αναλόγως [19], [20].



Εικόνα 10: SU-MIMO και MU-MIMO [21]

Σε ένα σενάριο με μοναδικό χρήστη (Single User MIMO – SU-MIMO) οι χωρικές διαστάσεις περιορίζονται από το χαμηλό πλήθος των κεραιών που είναι εγκατεστημένες στη μοναδική τερματική συσκευή και όλοι οι πόροι του σταθμού βάσης (κεραίες και εύρος ζώνης) αφιερώνονται σε ένα μόνο χρήστη ανά χρονοθυρίδα. Ωστόσο, σε ένα δεύτερο σενάριο όπου ένας σταθμός βάσης επικοινωνεί ταυτόχρονα με πολλούς χρήστες (Multi User MIMO – MU-MIMO), ο σταθμός βάσης μπορεί να αξιοποιήσει όλες του τις κεραιές αντιστοιχίζοντας κάθε κεραία με ένα ξεχωριστό χρήστη, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα τόσους χρήστες όσες και οι κεραιές του, ξεπερνώντας τον περιορισμό του

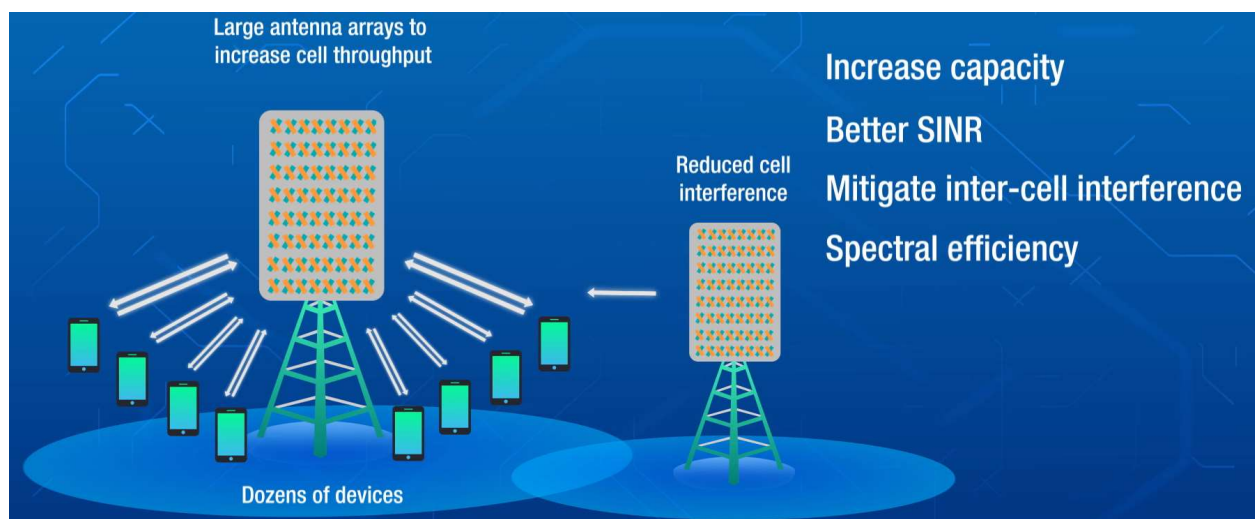
σεναρίου με μοναδικό χρήστη, με κόστος τη μεγαλύτερη ψηφιακή επεξεργασία σήματος (βλ. Εικόνα 10).

Στο δεύτερο σενάριο, το πλήθος των διαστάσεων σηματοδότησης δίνεται από το μικρότερο μεταξύ του πλήθους των κεραιών του σταθμού βάσης και του αθροίσματος όλων των κεραιών των τερματικών συσκευών των χρηστών. Για παράδειγμα αν έχουμε N τερματικές συσκευές κάθε μία από τις οποίες έχει κάποιο πλήθος από κεραιές, τότε το πλήθος των χωρικών διαστάσεων επικοινωνίας δίνεται από τη σχέση

$$\# \text{ Spatial Dimensions} = \min \left(\# \text{ BS Antennas}, \sum_{i=1}^N \# \text{ Antennas}_{\text{Device } i} \right) .$$

Άλλες τεχνολογίες που σχετίζονται με την MU-MIMO είναι οι Space-division Multiple Access (SDMA), Ad Hoc MIMO, Full Dimension MIMO (FD-MIMO), Coordinated MultiPoint (CoMP), Massive MIMO και πολλές ακόμα, κάθε μία από τις οποίες προσφέρει κάποιους βαθμούς χωρικής ελευθερίας στις τερματικές συσκευές.

Στα δίκτυα 4G-LTE, τα συστήματα MIMO αποτελούνται από 2 μέχρι και 4 κεραιές ανά φορητή συσκευή και ως 8 κεραιές ανά σταθμό βάσης. Ωστόσο, ερευνητές πρότειναν [22] την αύξηση των κεραιών των σταθμών βάσης, ώστε το πλήθος των κεραιών να είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερο από το πλήθος των ενεργών χρηστών σε κάθε πόρο σημάτων χρόνου-συχνότητας (κεραία), διότι υπό λογικές συνθήκες χρόνου-συχνότητας, μπορεί να πραγματοποιείται ακριβής εκτίμηση καναλιού επικοινωνίας για το πολύ κάποιες δεκάδες χρήστες σε κάθε πόρο (κεραία). Με αυτή την παρατήρηση ήδη περιγράφουμε την ανάγκη για ύπαρξη κάποιων εκατοντάδων κεραιών ανά σταθμό βάσης. Η πρόταση αυτή ονομάστηκε Massive MIMO και ο σκοπός της είναι κάθε σταθμός βάσης να αποτελείται από στοιχειοκεραίες (Antenna Array) κάθε μία από τις οποίες θα περιλαμβάνει δεκάδες και/ή εκατοντάδες κεραιές. Τα πλεονεκτήματα που υπόσχεται αυτή η τεχνολογία (βλ. Εικόνα 11), με βασικότερο τη σημαντική αύξηση της χωρητικότητας των σταθμών βάσης που θα χρησιμοποιούν την τεχνολογία Massive MIMO, την έβαλαν στο επίκεντρο των υποδομών δικτύων που μελετούνται για το 5G.



Εικόνα 11: Massive MIMO [23]

Η τεχνολογία Massive MIMO βασίζεται στην πολυπλεξία χώρου (Spatial Multiplexing), η οποία έχει ως προϋπόθεση ο σταθμός βάσης να έχει πληροφορίες για την κατάσταση των καναλιών (Channel State Information), τόσο για το κανάλι άνω ζεύξης (Uplink) όσο και για το κανάλι κάτω ζεύξης (Downlink). Για το κανάλι κάτω ζεύξης όπου οι σταθμοί

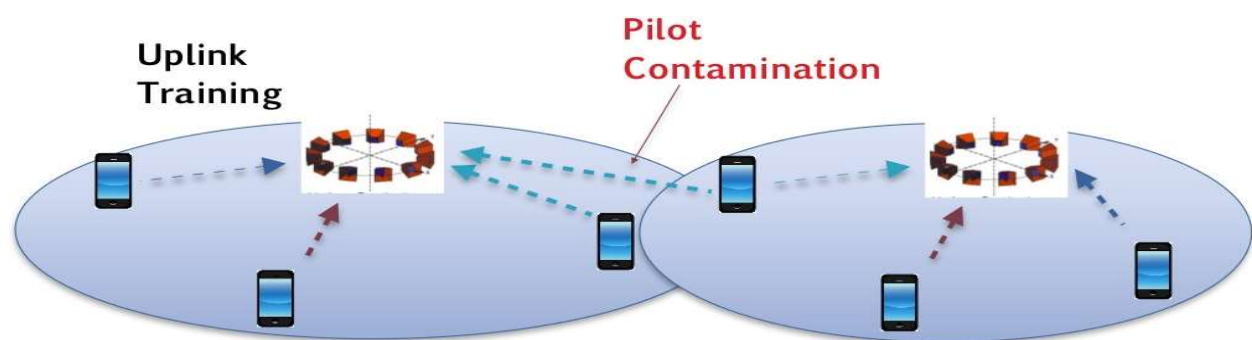
βάσης στέλνουν σήματα προς τις συσκευές δεν είναι εύκολη η πολυπλεξία χώρου, σε αντίθεση με το κανάλι άνω ζεύξης όπου οι συσκευές στέλνουν σήματα προς τους σταθμούς βάσης, σύμφωνα με τα οποία γίνεται η εκτίμηση της απόκρισης των συσκευών.

Στα συμβατικά συστήματα MIMO, ο σταθμός βάσης αναλαμβάνει την αποστολή σημάτων πιλότων (Pilot Signal) στις τερματικές συσκευές. Βάση του πιλότου που λαμβάνει, η τερματική συσκευή πραγματοποιεί την εκτίμηση του καναλιού, τη κβάντωσή του και ανατροφοδοτεί το σταθμό βάσης. Η διαδικασία αυτή δεν είναι αποτελεσματική για τα συστήματα Massive MIMO για τους δύο παρακάτω λόγους [6]:

1. Ένας πιλότος, τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στην τερματική συσκευή, αντιστοιχίζεται αποκλειστικά με μία κεραία. Για να μπορέσει μια κεραία να στείλει πιλότους προς περισσότερες από μία συσκευές, φροντίζει οι διαφορετικοί πιλότοι να είναι σήματα ορθογώνια μεταξύ τους, για να μην υπάρχουν παρεμβολές και να γίνεται μια καθαρότερη εκτίμηση καναλιού. Ωστόσο, σε στοιχειοκεραίες με δεκάδες και/ή εκατοντάδες κεραίες, διπλανές κεραίες αναγκαστικά επαναχρησιμοποιούν τους ίδιους πιλότους για την επικοινωνία τους με διαφορετικές συσκευές, γιατί αν δεν γινόταν αυτό θα αφιερώναμε όλες τις κεραίες μιας στοιχειοκεραίας στους πιλότους, εξαντλώντας έτσι ταχύτητα όλους τους πόρους ενός σταθμού βάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μόλυνση πιλότου (Pilot Contamination) και έχει ως την ύπαρξη παρεμβολών μεταξύ πιλότων διαφορετικών κεραιών, γεγονός που αυξάνει το χρόνο εκτίμησης καναλιού, εισάγει ένα άνω φράγμα στην αποδοτικότητα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και δεν εξαλείφεται με την αύξηση του πλήθους των κεραιών στους σταθμούς βάσης.

2. Καθώς αυξάνεται το πλήθος των κεραιών στους σταθμούς βάσης, αυξάνεται επίσης το πλήθος εκτιμήσεων καναλιών για κάθε τερματική συσκευή, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη για εκατοντάδες περισσότερες κεραίες στη συσκευή για την ανατροφοδότηση του σταθμού βάσης.

Μια γενική λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η λειτουργία των συσκευών σε Αμφίδρομη Επικοινωνία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Duplexing) χρησιμοποιώντας ως βάση την αμοιβαιότητα μεταξύ των καναλιών άνω και κάτω ζεύξης [24] προσφέροντας γρήγορη και ακριβή ανατροφοδότηση πληροφοριών των καναλιών.



Εικόνα 12: Pilot Contamination [25]

Ωστόσο, η τεχνολογία Massive MIMO προσφέρει περιορισμένη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει έντονη κινητικότητα και/ή μεγάλη διασπορά των τερματικών συσκευών, καθώς η εκτίμηση καναλιού μιας κινούμενης συσκευής με σχετικά μεγάλη ταχύτητα από μια μακροκυψέλη είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Οπότε, η τεχνολογία Massive MIMO είναι κατάλληλη για περιβάλλοντα

μικρής κινητικότητας, όπως το εσωτερικό κτιρίων ή εξωτερικούς χώρους που έχουν έντονο συνωστισμό.

Η τεχνολογία Massive MIMO βοηθάει σημαντικά στο διαχωρισμό του ασύρματου δικτύου πρόσβασης στο “εξωτερικό” και στο “εσωτερικό” ασύρματο δίκτυο πρόσβασης και διευκολύνει την απαραίτητη επικοινωνία των δύο αυτών δικτύων. Για τις τερματικές συσκευές που βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους, οι κυψέλες μικρού μεγέθους που είναι εγκατεστημένες στους χώρους αυτούς αντιμετωπίζονται όπως οποιοσδήποτε σταθμός βάσης. Για τους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης με τις μακροκυψέλες, το “εσωτερικό” δίκτυο αντιμετωπίζεται ως μια ενιαία οντότητα, δηλαδή ως ένα και μοναδικός χρήστης, ανεξάρτητα από το πλήθος των συσκευών.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, αρχικά, στους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης με τις μακροκυψέλες, πρέπει να εγκατασταθούν πολλές στοιχειοκεραίες, κάποιες από τις οποίες θα είναι διασκορπισμένες γύρω από την εξάγωνη κυψέλη και θα συνδέεται με το σταθμό βάσης με τη χρήση καλωδίωσης οπτικών ινών. Οι συσκευές που βρίσκονται στο χώρο του “εξωτερικού” δικτύου συνήθως είναι εφοδιασμένες με ένα ικανοποιητικό πλήθος από κεραίες. Συνδυάζοντας τις κεραίες των συσκευών αυτών μπορεί να κατασκευαστεί μια εικονική στοιχειοκεραία που σε συνδυασμό με τις στοιχειοκεραίες του σταθμού βάσης του “εξωτερικού” δικτύου μπορεί να σχηματίσει εικονικές συνδέσεις Massive MIMO, οι οποίες παρέχουν ανατροφοδότηση που χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική ταχύτητα και μεγάλη ακρίβεια για τις πληροφορίες των καναλιών.

Στη συνέχεια, πρέπει στην εξωτερική όψη των κτιρίων και/ή των κινούμενων μέσων όπου περιέχεται το “εσωτερικό” δίκτυο να τοποθετηθούν πολλές στοιχειοκεραίες, συνδέοντας κάθε σημείο πρόσβασης (Access Point) του “εσωτερικού” δικτύου με τις στοιχειοκεραίες μέσω καλωδίωσης για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της απόσβεσης κατά τη διάδοση των σημάτων μέσα από στερεά αντικείμενα. Με αυτό τον τρόπο οι τερματικές συσκευές εντός των κτιρίων δε χρειάζεται να επικοινωνούν άμεσα με τις εξωτερικές μακροκυψέλες των απομακρυσμένων σταθμών βάσης αλλά μόνο με τα εσωτερικά σημεία πρόσβασης που θα αποτελούνται από κυψέλες μικρού μεγέθους και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούν οποιαδήποτε τεχνολογία κατάλληλη για εσωτερικούς χώρους όπως WiFi, Small Cells, VLC, mmWave κλπ. Στη συνέχεια, το σύστημα Massive MIMO που βρίσκεται στην εξωτερική όψη θα χρησιμοποιεί μακροκυψέλες σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα ηλεκτρομαγνητικά σήματα μεγαλύτερου μήκους κύματος ώστε να επικοινωνεί με τους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης οι οποίοι θα βρίσκονται ενδεχομένως σε μεγάλη απόσταση αλλά εντός του “οπτικού” τους πεδίου.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση της MIMO είναι η απόσταση μεταξύ των κεραιών η οποία σχετίζεται με το μήκος κύματος λ των σημάτων. Σε εξωτερικούς χώρους οι κεραίες συνήθως απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις της τάξης του 10λ . Αντιθέτως, σε εσωτερικούς χώρους οι κεραίες μπορούν να απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις ίσες με μισό μήκος κύματος, δηλαδή 0.5λ εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα μικρή συσχέτιση μεταξύ διαφορετικών κεραιών. Οπότε, σε εσωτερικούς χώρους θα μπορούν να εγκατασταθούν 8 ή και 16 κεραίες σε κάθε σημείο πρόσβασης με κυψέλες μικρού μεγέθους, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου πρόσβασης.

Όπως αναφέρθηκε στα υποκεφάλαια 2.2 και 2.3, οι κυψέλες μικρού μεγέθους καθώς και τα σήματα που ανήκουν στην κατηγορία των mmWave αποτελούν σημαντικές τεχνολογίες για το 5G. Η εφαρμογή τους σε εσωτερικούς χώρους προϋποθέτει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης ενός σημαντικού πλήθους χρηστών, καθώς όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο οι περισσότεροι χρήστες συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω δικτύων που βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους. Οπότε, τα δίκτυα αυτά πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν ταυτόχρονα ένα πλήθος χρηστών που

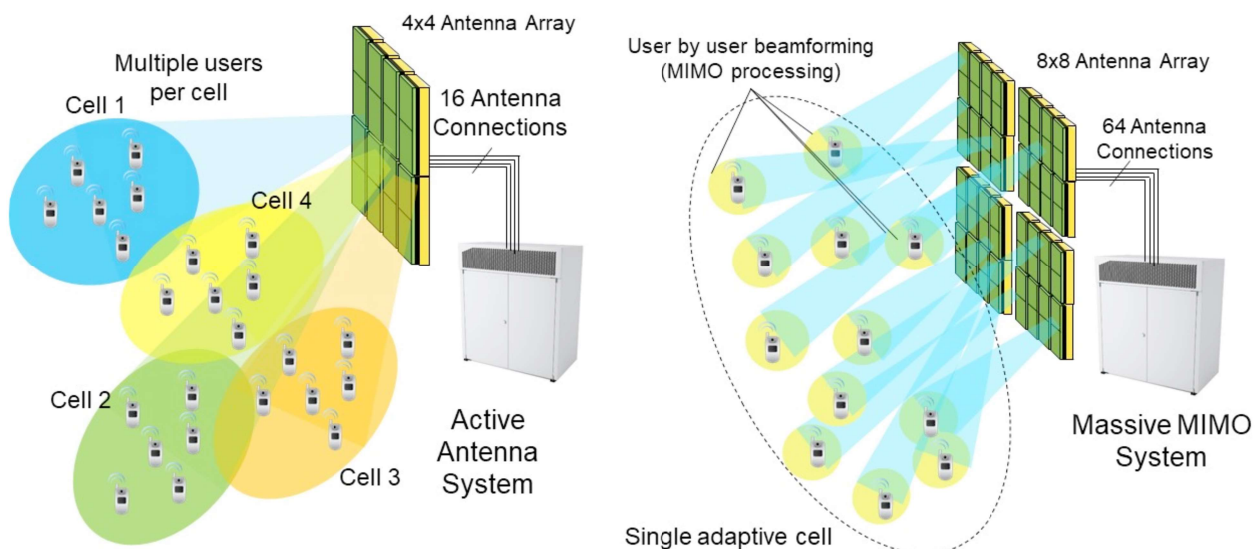
ενδεχομένως να αποτελείται από μέχρι και μια δεκάδα άτομα σε μικρούς χώρους όπως γραφεία ή δωμάτια.

Οι κυψέλες μικρού μεγέθους ίσως να μην μπορούν να εξοπλιστούν εύκολα με δυνατότητες MIMO λόγω της περιορισμένης επιφάνειας/κατασκευής τους. Αν και η ευκολότερη εναλλακτική είναι ο διαχωρισμός των αντίστοιχων μεταδόσεων στη συχνότητα, το υπερβολικά μεγάλο πλήθος κεραιών των σταθμών βάσης με Massive MIMO δίνουν τη δυνατότητα της χωρικής ανάκλησης και της αποφυγής παρεμβολών με σχετική απλότητα και αμελητέες επιπτώσεις. Ωστόσο απαιτούνται και πάλι ολοκληρωμένα μοντέλα καναλιών. Καθώς τα δίκτυα γίνονται πυκνότερα και η κίνηση δεδομένων γίνεται μέσω μικρών κελιών, ο αριθμός των ενεργών χρηστών ανά κελί κεραιών θα μειωθεί και η ανάγκη για μαζικό MIMO μπορεί να εξασθενίσει. Πτυχές όπως το κόστος και το backhaul θα καθορίσουν τελικά την ισορροπία μεταξύ αυτών των αλληλοσυμπληρούμενων ιδεών.

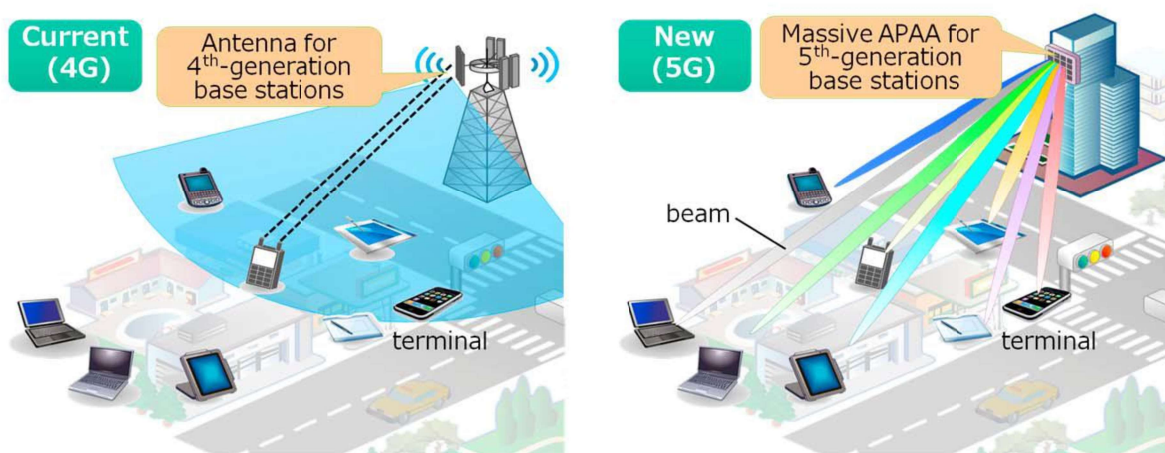
Η τεχνολογία mmWave απαιτεί την ύπαρξη πολλών κεραιών για να επιτευχθεί η σωστή διεύθυνση δέσμης του σήματος. Σε τέτοιες συχνότητες όπου το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό, είναι επίσης μικρό το μέγεθος των κεραιών, που πρακτικά σημαίνει ότι σε μια τερματική συσκευή μπορούμε να εγκαταστήσουμε ένα μεγάλο πλήθος τέτοιων κεραιών. Με αυτό τον τρόπο, οι τερματικές συσκευές μπορούν να παρέχουν όφελος διαμόρφωσης δέσμης και χαρακτηριστικά MIMO. Ωστόσο, σε συχνότητες mmWave, πρέπει να βρεθεί η σωστή ισορροπία μεταξύ κέρδους ισχύος/μείωσης παρεμβολών και παραλληλισμού.

Ωστόσο, οι κυψέλες μικρού μεγέθους καθώς και τα σήματα που ανήκουν στην κατηγορία των mmWave είναι ακατάλληλες για χρήση σε εξωτερικούς χώρους, μεγάλες αποστάσεις και/ή μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Παρά ταύτα, η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου πλήθους χρηστών που βρίσκονται συγκεντρωμένοι σε εξωτερικούς χώρους και καλύπτουν γεωγραφικές περιοχές μεγάλης έκτασης, για παράδειγμα σε ένα στάδιο ή μια αλάνα κατά τη διάρκεια μιας μουσικής συναυλίας ή κάποιου παρόμοιου θεάματος, είναι απαραίτητη. Συνδυάζοντας τις τεχνολογίες microcell και σημάτων κατάλληλου μήκους κύματος για τέτοιες περιοχές, με την τεχνολογία Massive MIMO, μπορούμε να έχουμε επαρκή γεωγραφική κάλυψη και χωρητικότητα δικτύου σε τέτοιες περιπτώσεις.

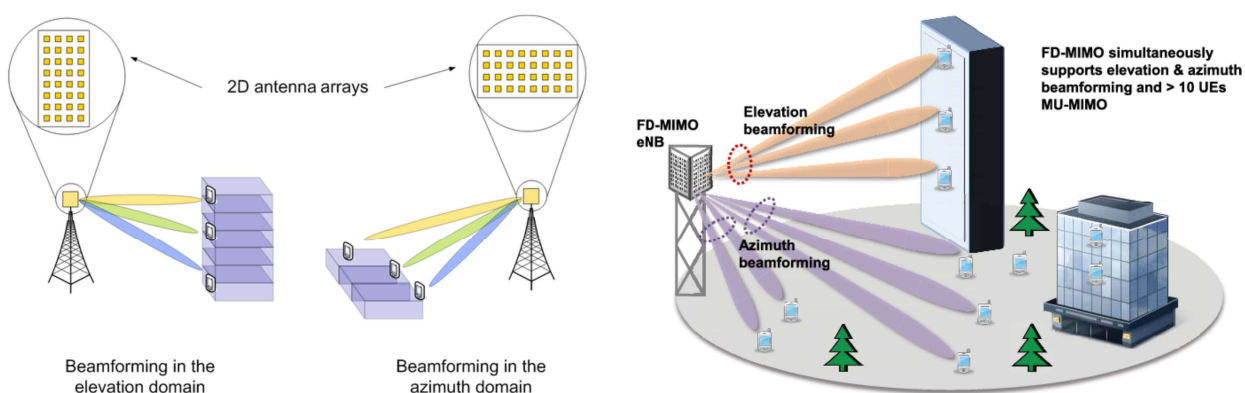
Ερευνητές παρατήρησαν [26] ότι τα οφέλη διαμόρφωσης δέσμης σε πολύ μεγάλο πλήθος κεραιών είναι τόσο υψηλά ώστε οι παρεμβολές σημάτων να είναι ελάχιστες, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλή αποδοτικότητα φάσματος με τιμές όπως 100 bits/sec/Hz που είναι σημαντική βελτίωση από την τρέχουσα αποδοτικότητα φάσματος 3 bits/sec/Hz. Σήμερα, οι σταθμοί βάσης με μακροκυψέλες αποτελούνται από ένα σύνολο συμφασικών κεραιών οι οποίες, μαζί, δημιουργούν μια σταθερή κατακόρυφη ακτίνα με μια ορισμένη κλίση προς το έδαφος. Με τη χρήση ενεργών κεραιών (Active Antenna), όπου πολλαπλά στοιχεία ραδιοσυχνοτήτων (ενισχυτές ισχύος και τα παθητικά στοιχεία τους) θα είναι άμεσα ενσωματωμένα στα ακτινοβολούντα στοιχεία, προσφέροντας έναν πιο ευέλικτο τοπικό έλεγχο. Έτσι, κάθε ενεργή κεραία θα μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες, επιτρέποντας μια πιο ευέλικτη κάθετη διαμόρφωση δέσμης καθώς και διαμόρφωση δέσμης ανά χρήστη (βλ. Εικόνα 13). Επίσης, συνδυάζοντας κάθετες και οριζόντιες διαμορφωμένες δέσμες ακτινοβολίας μπορούμε να καλύπτουμε ολόκληρο τον τρισδιάστατο χώρο γύρω από τους σταθμούς βάσης και σε μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με πριν (βλ. Εικόνα 14 & Εικόνα 15). Έτσι, αυξάνουμε τη χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου και επιτρέπουμε την ευκολότερη διασύνδεση τερματικών συσκευών και δικτύων που βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα.



Εικόνα 13: Διαμόρφωση δέσμης ανά χρήστη μέσω Active Antenna Array [27]



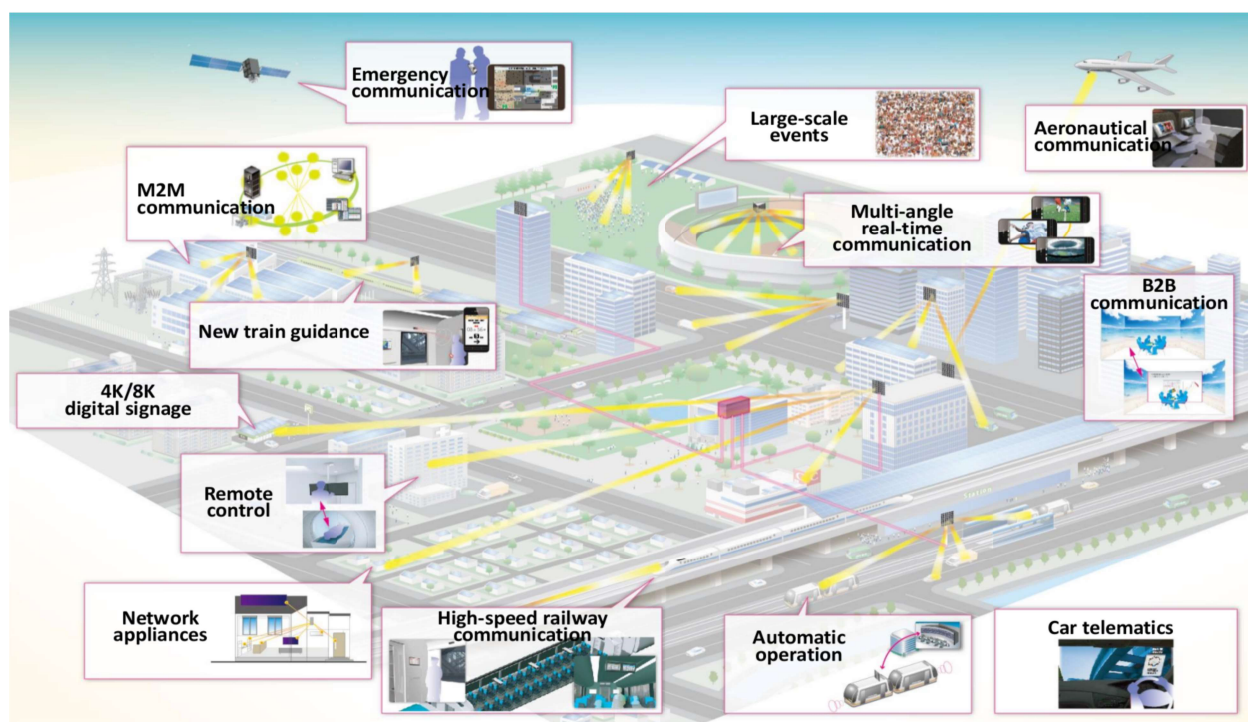
Εικόνα 14: Αύξηση εύρους κάλυψης και χωρητικότητας μέσω Active Phased-Array Antenna [28]



Εικόνα 15: Διαμόρφωση δέσμης σε FD-MIMO [29] [30]

Ένα μειονέκτημα της τεχνολογίας Massive MIMO είναι ότι η αύξηση του πλήθους των κεραιών οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους και της πολυπλοκότητας της

εγκατάστασης. Παρόλο που το κόστος των κεραιών είναι αρκετά χαμηλό, αυξάνεται το πλήθος των συσκευών που χρειάζονται, το οποίο περιλαμβάνει τις αλυσίδες ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Chains), των μετατροπών σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (Analog-to-Digital Converter), των μετατροπών σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό (Digital-to-Analog Converter), των ενισχυτών των κεραιών αφού λόγω του μικρού μεγέθους των κεραιών κάθε μία θα έχει ενσωματωμένο το δικό της ενισχυτή μικρής ισχύος, καθώς και η απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύς για την επεξεργασία των σημάτων, όπου όλα τα παραπάνω έχουν σχετικά υψηλό κόστος.

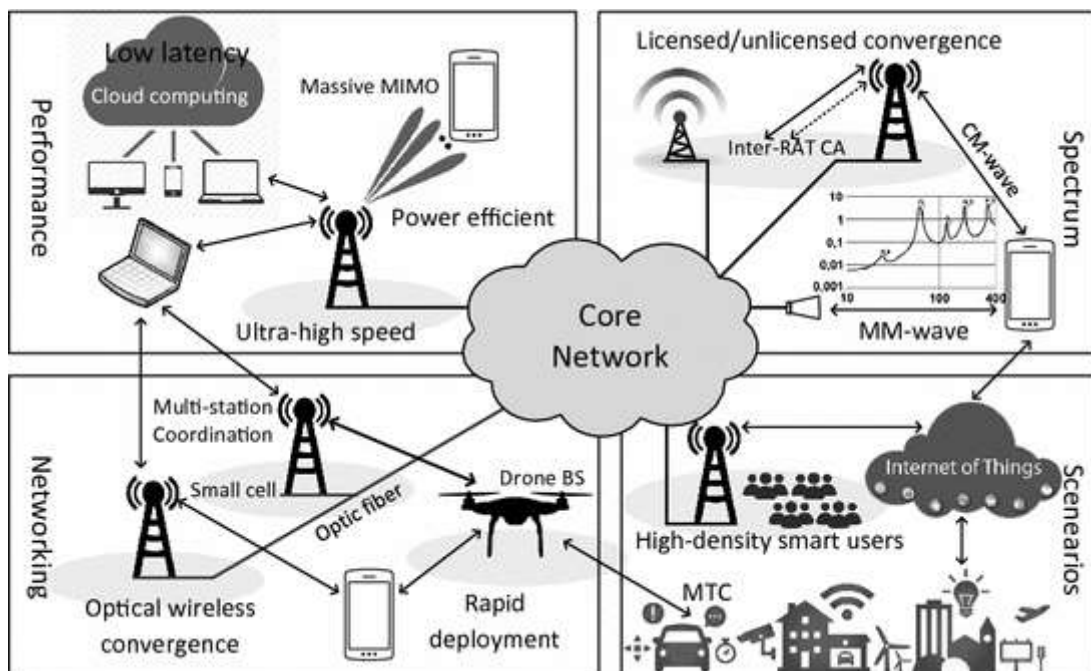


Εικόνα 16: Εφαρμογές και οφέλη της τεχνολογίας Massive MIMO [31]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας Massive MIMO στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης είναι τα εξής [4], [5], [6], [15], [32]:

1. Σημαντική βελτίωση στη χωρητικότητα κατά ένα παράγοντα ίσο με 10.
2. Σημαντική βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση κατά ένα παράγοντα ίσο με 100 λόγω της δυνατότητας λειτουργίας με ενισχυτές μικρής κατανάλωσης ισχύος (κατανάλωση στο εύρος κάποιων milliwatt).
3. Σημαντική βελτίωση στην διεκπεραιωτική ικανότητα των κυψελών.
4. Σημαντική βελτίωση στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
5. Σημαντική βελτίωση στην απόδοση του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
6. Σημαντική βελτίωση στο ολικό κόστος, λόγω του χαμηλότερου κόστους του εξοπλισμού με τον οποίο μπορούν να συνδυαστούν και της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας τόσο του Massive MIMO όσο και του συνδυαζόμενου εξοπλισμού.
7. Συνδυασμός της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας του Massive MIMO με τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των κυψελών μικρού μεγέθους και με μεθόδους αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προκειμένου να εγκατασταθούν σταθμοί βάσης σε μέρη που δεν υπάρχει παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

8. Σημαντική μείωση της καθυστέρησης που οφείλεται σε εξασθένηση του σήματος που λαμβάνουν οι τελικές συσκευές, μέσω της χρήσης του μεγάλου πλήθους κεραιών και της διαμόρφωσης ακτίνας.
9. Βελτίωση της σταθερότητας που προσφέρουν οι πολλές κεραιές ακόμα και σε περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων, οδηγώντας στην εξασφάλιση υψηλού πλήθους βαθμών ελευθερίας ώστε να ακυρώνονται σήματα που αποσκοπούν στην επιτηδευμένη παρεμπόδιση και καταστροφή της επικοινωνίας, αυξάνοντας την ασφάλεια.
10. Σημαντική βελτίωση στη γεωγραφική κάλυψη και την εξυπηρέτηση των τελικών χρηστών σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία.
11. Σημαντική βελτίωση στην αποδοτικότητα φάσματος κατά ένα παράγοντα 35.
12. Προσφορά σχεδόν ολόκληρου του εύρους ζώνης σε κάθε συσκευή του δικτύου, χάρη στην Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).



Εικόνα 17: Συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών 5G στο φυσικό επίπεδο [33]

3. CLOUD ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G

3.1 Εισαγωγή

Εκτός από τις παραπάνω τεχνολογίες υλικού στο φυσικό επίπεδο, για το 5G προβλέπεται η εφαρμογή νέων τεχνολογιών λογισμικού νέφους, οι οποίες προσφέρουν στα δίκτυα μεγαλύτερη ευελιξία, γρηγορότερη απόκριση, προσαρμοσμένη λειτουργικότητα και μεγαλύτερη κλιμάκωση. Οι βασικότερες αυτών είναι δικτύωση βασισμένη στο λογισμικό που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.2 η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.3, η παροχή πρόσβασης στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης ως υπηρεσία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.4, η παροχή όλων των λειτουργιών ως υπηρεσίες που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.5 και το Multi-access Edge Computing που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.6.

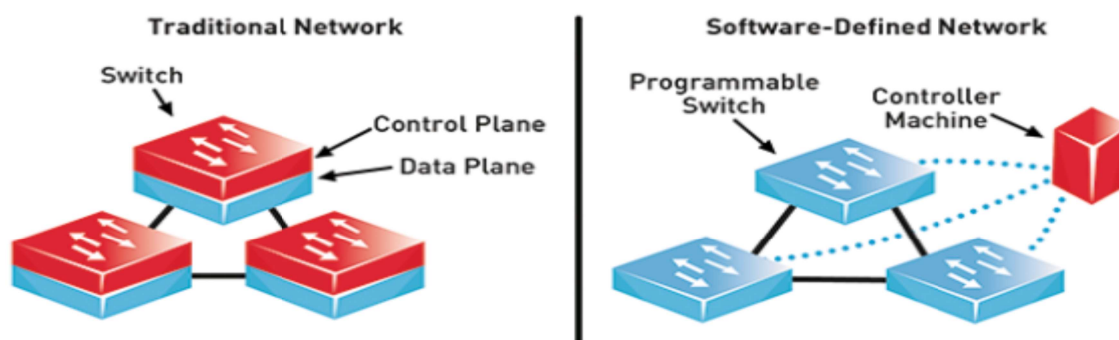
3.2 Software-Defined Networking

Ο κατανεμημένος έλεγχος και η μετάδοση πρωτοκόλλων δικτύων που εκτελούνται εντός των δικτυακών συσκευών όπως δρομολογητές (Routers) και μεταγωγείς (Switches) είναι οι βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν το ταξίδι πληροφοριών σε ολόκληρο τον πλανήτη υπό τη μορφή ψηφιακών πακέτων. Παρόλο που οι τεχνολογίες αυτές έχουν υιοθετηθεί ευρέως και εφαρμόζονται εδώ και πολλά χρόνια στα ήδη υπάρχοντα και “παραδοσιακά” δίκτυα IP, η αλήθεια είναι πως η εφαρμογή των συσκευών αυτών οδηγεί σε πολύπλοκα και δυσμεταχειρίσιμα δίκτυα [34]. Οι παραπάνω συσκευές είναι ανομοιομορφες και κλειδωμένες, οπότε για να γίνει οποιαδήποτε αλλαγή στη λειτουργικότητά τους και/ή προσθήκη λειτουργιών χρειάζεται ξεχωριστή ρύθμιση για κάθε συσκευή αποκλειστικά από τον κατασκευαστή της. Στα παραδοσιακά δίκτυα IP δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός αυτόματης αναπροσαρμογής της λειτουργίας τους και απόκρισης σε περίπτωση σφαλμάτων και αλλαγών στο φόρτο, που σημαίνει ότι η εφαρμογή των απαιτούμενων πολιτικών που αναπτύσσονται για την αντιμετώπιση τέτοιων “απρόβλεπτων” φαινομένων είναι πολύ δύσκολη ως αδύνατη [35], [36]. Αν και σπάνιο, ένας κακώς διαμορφωμένος δρομολογητής είναι ικανός να εμποδίσει τη σωστή λειτουργία ολόκληρου του διαδικτύου για ώρες [37], [38].

Ακόμα, τα παραδοσιακά δίκτυα IP είναι κάθετα ολοκληρωμένα, δηλαδή τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων βρίσκονται ενσωματωμένα σε κάθε δικτυακή συσκευή, γεγονός που μειώνει την ευελιξία και εμποδίζει την καινοτομία και την εξέλιξη των υποδομών των δικτύων. Ένα εμφανές παράδειγμα που αποδεικνύει τη σοβαρότητα του παραπάνω προβλήματος είναι η μετάβαση από το πρωτόκολλο IPv4 στο IPv6 που ξεκίνησε στα μέσα του 2000 και μέχρι σήμερα, το 2018, δεν έχει ολοκληρωθεί σε όλα τα δίκτυα, παρόλο που αποτελεί μια απλή αναβάθμιση πρωτοκόλλου. Τέτοια προβλήματα έλλειψης ευελιξίας των δικτύων IP οδηγούν στην καθυστέρηση της εφαρμογής νέων πολιτικών και πρωτοκόλλων, γεγονός που αυξάνει το κόστος λειτουργίας των δικτύων. Επίσης, η αλλαγή ολόκληρης της υποδομής των δικτύων, όπως π.χ. η αντικατάσταση του πρωτοκόλλου IP με νέα πρωτόκολλα είναι αδύνατη στην πράξη [35], [36].

Η τεχνολογία δικτύωσης βασισμένη στο λογισμικό (Software Defined Networking – SDN) αποτελεί από μόνη της ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο (Architectural Framework) μέσω του οποίου μπορούν να δημιουργηθούν “έξυπνα” προγραμματιζόμενα δίκτυα που θα ξεπερνούν τους περιορισμούς των τρεχουσών υποδομών των δικτύων. Πρώτον, η SDN καταργεί την κάθετη ολοκλήρωση των δικτύων, διαχωρίζοντας τη “λογική” των δικτύων, δηλαδή το επίπεδο ελέγχου, από τους δρομολογητές και τους μεταγωγείς που μεταδίδουν πακέτα, δηλαδή το επίπεδο δεδομένων. Δεύτερον, ο παραπάνω διαχωρισμός των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στο να

περιοριστεί η λειτουργία των δρομολογητών και των μεταγωγέων κάνοντάς τις συσκευές αυτές αποκλειστικά συσκευές μετάδοσης και προώθησης ψηφιακών πακέτων, ενώ η λογική ελέγχου υλοποιείται σε ένα λογικά κεντροποιημένο ελεγκτή (Logically Centralized Controller) που εκτελεί το λειτουργικό σύστημα του δικτύου (Network Operating System), απλοποιώντας έτσι την επιβολή νέων πολιτικών, την αναπροσαρμογή της λειτουργικότητας των δικτύων, επιτρέποντας την εξέλιξη των δικτύων [39]. Ο διαχωρισμός αυτός περιγράφεται στην εικόνα 18.



Εικόνα 18: Διαφορά ολοκλήρωσης μεταξύ παραδοσιακών δικτύων και SDN [40]

Ένα λειτουργικό σύστημα δικτύου είναι ένα λογισμικό που ελέγχει τη συμπεριφορά και την κατάσταση του δικτύου μέσω:

1. Του προγραμματισμού των κανόνων προώθησης στο επίπεδο δεδομένων.
2. Της διαχείρισης της κατάστασης του δικτύου.
3. Του ελέγχου της συμπεριφοράς του δικτύου.

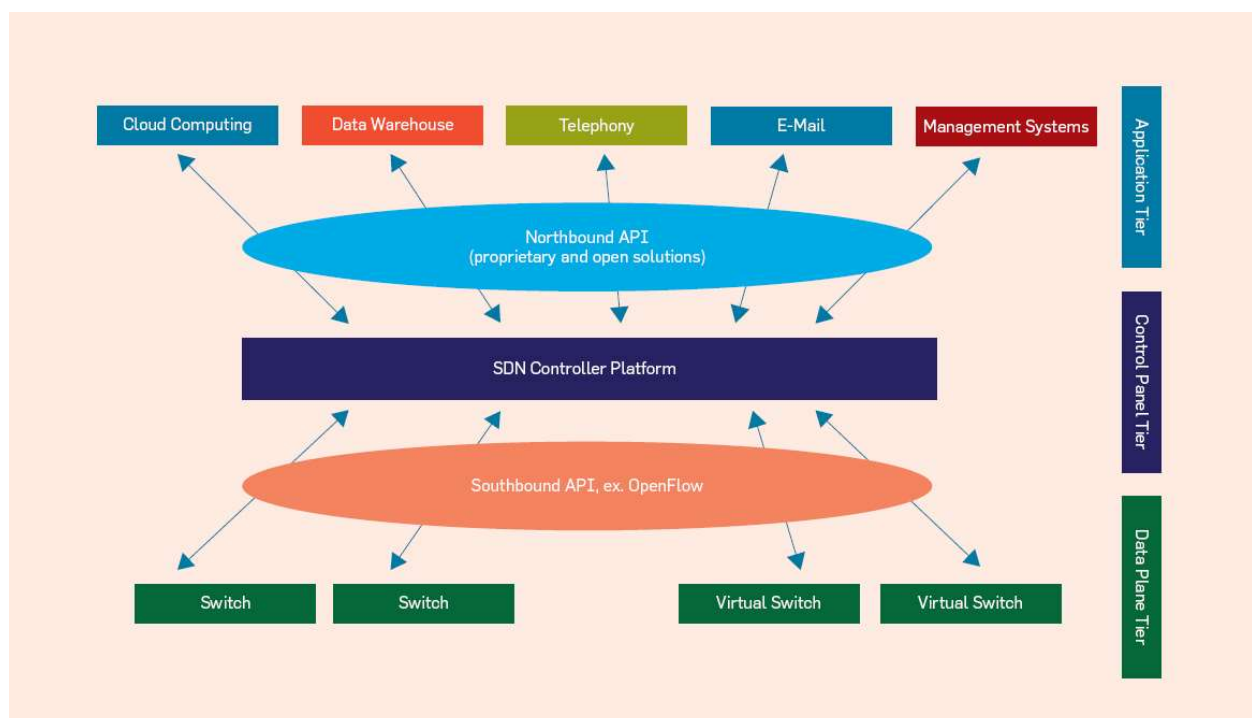
Ο διαχωρισμός των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας καλά ορισμένης διεπαφής προγραμματισμού μεταξύ του ελεγκτή και των συσκευών προώθησης. Ο ελεγκτής, μέσω της παραπάνω διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface – API) έχει άμεσο έλεγχο της κατάστασης των συσκευών του επιπέδου δεδομένων, μπορώντας έτσι να διαχειριστεί και να τροποποιήσει τη λειτουργικότητα των συσκευών προώθησης. Για παράδειγμα, ο ελεγκτής μπορεί να προγραμματίσει μια συσκευή του επιπέδου δεδομένων έτσι ώστε αυτή να συμπεριφέρεται είτε σαν δρομολογητής, είτε σαν τοίχος προστασίας (Firewall), κλπ..

Μια σημαντική συνέπεια των αρχών της δικτύωσης βασισμένης στο λογισμικό, είναι ο διαχωρισμός των ευθυνών που εισάγονται μεταξύ του ορισμού των πολιτικών του δικτύου, της υλοποίησης των πολιτικών αυτών στο υλικό και η προώθηση της ροής δεδομένων. Αυτός ο διαχωρισμός είναι το κλειδί για την επίτευξη της επιθυμητής ευελιξίας, για το διαχωρισμό του προβλήματος ελέγχου του δικτύου σε διαχειρίσιμα υποπροβλήματα και για τη διευκόλυνση δημιουργίας και εισαγωγής νέας αφαιρετικότητας στα δίκτυα ώστε να διευκολυνθεί η διαχείρισή τους, η εξέλιξή τους και η καινοτομία.

Η επικοινωνία μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων πραγματοποιείται με τη χρήση της νότιας διεπαφής (Southbound Interface) που ουσιαστικά αποτελεί το σύνολο εντολών (Instruction Set) των συσκευών προώθησης, ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων και παρέχει τη νότια διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών

(Southbound API) προκειμένου το επίπεδο ελέγχου να μπορεί να προγραμματίσει τις συσκευές προώθησης. Η νότια διεπαφή μπορεί να αποτελείται ταυτόχρονα από πολλά API, δημιουργώντας έτσι ένα ενδιάμεσο επίπεδο αφαίρεσης το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί από τους ελεγκτές ως ένα επίπεδο οδηγών συσκευών (Device Driver Layer). Μέσω του επιπέδου αυτού παρέχεται μια ενιαία διεπαφή για τα υψηλότερα επίπεδα επιτρέποντας ταυτόχρονα σε μια πλατφόρμα ελέγχου να χρησιμοποιεί διαφορετικά southbound API και αρθρώματα πρωτοκόλλων (Protocol Plug-ins) προκειμένου να διαχειριστεί ήδη υπάρχουσες και/ή νέες φυσικές ή εικονικές συσκευές. Με αυτό τον τρόπο παρέχεται προς τα πίσω συμβατότητα (Backwards Compatibility) και ανομοιογένεια ώστε να επιτρέπονται πολλαπλά πρωτόκολλα και τρόποι διαχείρισης συσκευών. Έτσι, στο επίπεδο δεδομένων μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα διαφορετικές φυσικές και εικονικές συσκευές καθώς και μια ποικιλία διεπαφών προγραμματισμού για τις συσκευές αυτές.

Προκειμένου να παρέχονται υπηρεσίες νέφους είναι απαραίτητη η δημιουργία εφαρμογών νέφους από προγραμματιστές. Το λειτουργικό σύστημα του δικτύου SDN μπορεί να παρέχει στους προγραμματιστές τέτοιων εφαρμογών ένα API το οποίο αντιπροσωπεύει τη βόρεια διεπαφή (Northbound Interface). Η διεπαφή αυτή ουσιαστικά είναι ένα επίπεδο αφαίρεσης λογισμικού που εξυπηρετεί τους προγραμματιστές, καθώς δε χρειάζεται να γνωρίζουν τα σύνολα εντολών χαμηλού επιπέδου που χρησιμοποιούν οι ελεγκτές στη νότια διεπαφή για τον προγραμματισμό των συσκευών προώθησης. Η νότια διεπαφή είναι σημαντικό να είναι ανοιχτή, καλά ορισμένη, αυστηρά κοινή μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων δικτύων SDN και ανεξάρτητη από τους διαφορετικούς ελεγκτές, ώστε να παρέχει μια αφαίρεση που θα επιτρέπει στις δικτυακές εφαρμογές να είναι ανεξάρτητες από τις λεπτομέρειες υλοποίησης του δικτύου και να μπορούν να εκτελεστούν σε όλους τους διαφορετικούς ελεγκτές, αξιοποιώντας έτσι όλες τις προοπτικές της τεχνολογίας SDN.



Εικόνα 19: SDN Northbound & Southbound Interfaces και ο σκοπός τους [41]

Το επίπεδο ελέγχου ενός δικτύου SDN δεν είναι απαραίτητο να αποτελείται από ένα κεντρικό σύστημα στο φυσικό επίπεδο. Αντιθέτως, για καλύτερη απόδοση, κλιμάκωση και αξιοπιστία είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός κατακεντρωμένου συστήματος ελέγχου στο φυσικό επίπεδο έχοντας ωστόσο μια κεντριοποιημένη λογική [42], [43].

Ένας κεντριοποιημένος ελεγκτής SDN είναι μια μοναδική οντότητα, δηλαδή μια μία συσκευή όπως π.χ. ένας υπολογιστής. Στην περίπτωση αυτή είναι σίγουρο ότι η κλιμάκωση στη λειτουργία του SDN θα είναι πολύ περιορισμένη, που σημαίνει ότι θα αυξάνεται η δυσκολία ελέγχου των συσκευών προώθησης ψηφιακών πακέτων καθώς αυξάνεται το πλήθος των συσκευών αυτών. Επίσης, σε περίπτωση σφάλματος του εξοπλισμού του ελέγχου, ενδέχεται η υπολειτουργία ή ακόμα και η διακοπή της λειτουργίας του SDN, κάτι που είναι πραγματικά ανεπιθύμητο. Βέβαια, έχουν αναπτυχθεί λειτουργικά συστήματα για επίπεδα ελέγχου δικτύων SDN με αποκλειστικά μία συσκευή που χρησιμοποιούν τεχνικές πολυνημάτωσης (Multithreading) αξιοποιώντας πλήρως τις δυνατότητες και τους πόρους των σύγχρονων υπολογιστικών συσκευών που διαθέτουν πολλαπλούς πυρήνες και/ή επεξεργαστές γραφικών με δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας με υψηλή κλιμάκωση, αλλά τα λογισμικά αυτά σε συνδυασμό με το υλικό πάνω στο οποίο εκτελούνται έχουν στοχευμένη λειτουργία για συγκεκριμένους τύπους δικτύων και υπηρεσιών σε συγκεκριμένο περιβάλλον και δεν αποτελούν συστήματα γενικής χρήσης [44].

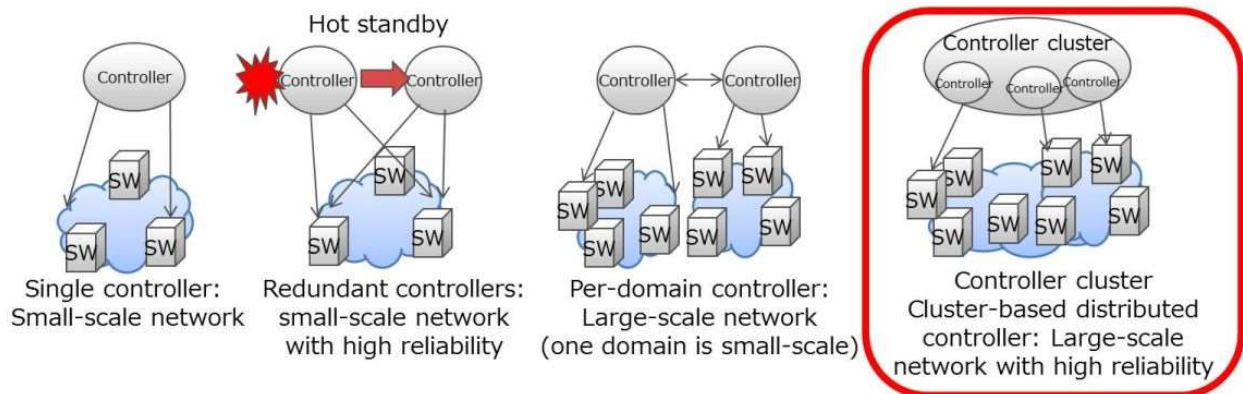
Ένας κατακεντρωμένος ελεγκτής SDN μπορεί να είναι είτε μια κεντρική συστάδα (Centralized Cluster) με κόμβους ή ένα σύνολο από κατακεντρωμένες μονάδες στο φυσικό επίπεδο. Η πρώτη περίπτωση με μια κεντρική συστάδα είναι καταλληλότερη για πυκνά κέντρα δεδομένων (Data Center) καθώς προσφέρει μεγαλύτερη διεκπεραιωτική ικανότητα. Η δεύτερη περίπτωση με κατακεντρωμένες μονάδες είναι καταλληλότερη σε δίκτυα μεγαλύτερης έκτασης όπως τα δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Network – WAN), καθώς προσφέρει μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα που μπορούν να συμβούν είτε στο λογισμικό είτε στο υλικό. Σε κάθε περίπτωση, εφόσον το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από πολλαπλές συσκευές, το δίκτυο SDN θα έχει τη δυνατότητα κλιμάκωσης έτσι ώστε να μπορεί καλύψει τις απαιτήσεις πιθανόν κάθε περιβάλλοντος, από μικρά δίκτυα μέχρι δίκτυα ευρείας κλίμακας. Μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει και τις δύο περιπτώσεις κατακεντρωμένων ελεγκτών SDN είναι κατάλληλη για παρόχους υπηρεσιών νέφους που αποτελούνται από πολλαπλά κέντρα δεδομένα, διασυνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω ενός WAN, όπου κάθε κέντρο περιέχει εσωτερικά συστάδες ελεγκτών, ενώ υπάρχουν κατακεντρωμένοι κόμβοι – ελεγκτές σε διάφορα σημεία του WAN.

Στην περίπτωση που ένα SDN αποτελείται κατακεντρωμένες μονάδες, χωρίς την επιβολή σημασιολογίας υψηλής συνέπειας, υπάρχει το ενδεχόμενο μετά από την ενημέρωση τιμής για ένα οποιοδήποτε χαρακτηριστικό σε κάποιον από τους ελεγκτές του SDN να καθυστερήσει η ενημέρωση των υπολοίπων ελεγκτών για τη νέα τιμή του χαρακτηριστικού αυτού, οδηγώντας στο φαινόμενο διαφορετικοί ελεγκτές να περιέχουν αποθηκευμένη διαφορετική τιμή για το ίδιο χαρακτηριστικό, γεγονός που δημιουργεί ασυνέπεια στο δίκτυο. Με την επιβολή σημασιολογίας υψηλής συνέπειας η ενημέρωση θα γίνεται ταχύτερα, έτσι ώστε όλοι οι ελεγκτές να περιλαμβάνουν την πιο ενημερωμένη τιμή για όλα τα χαρακτηριστικά ανά πάσα στιγμή. Η επιβολή σημασιολογίας υψηλής συνέπειας, παρά το φόρτο που δημιουργεί, προσφέρει μια απλοποιημένη διεπαφή στους προγραμματιστές εφαρμογών των δικτύων SDN.

Επίσης, στην ίδια περίπτωση, εφόσον υπάρχουν περισσότεροι του ενός ελεγκτές, αν συμβεί κάποια βλάβη σε κάποιον από τους κόμβους – ελεγκτές τότε είναι ευκολότερο να αναλάβει τα καθήκοντα και τις συσκευές του προβληματικού κόμβου κάποιος άλλος. Αν και μέχρι στιγμής αυτή η συμπεριφορά ικανοποιείται από τους ελεγκτές σε περίπτωση ολικής βλάβης κάποιου ελεγκτή που τον θέτει μη αποκρινόμενο, σε περίπτωση που

κάποιος ελεγκτής λειτουργεί εν μέρει σωστά λόγω κάποιου προβλήματος τότε δεν πραγματοποιείται η αλλαγή αυτή και η δυσλειτουργία του ελέγχου δεν αποκαθίσταται, οδηγώντας σε ανεπιθύμητη συμπεριφορά.

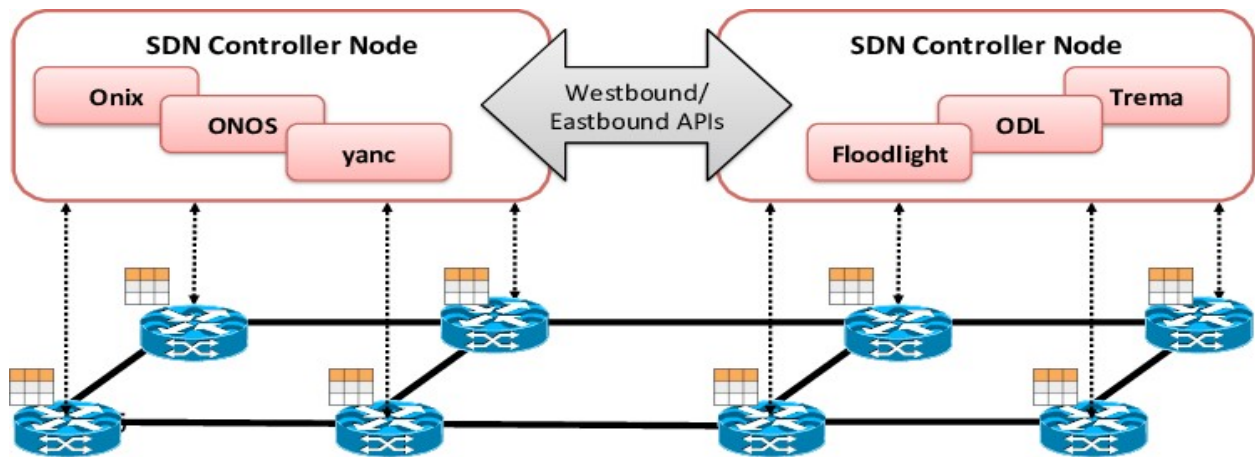
Ένας ελεγκτής μιας συσκευής είναι επαρκής για τη διαχείριση ενός μικρού δικτύου, αν και θα υπάρχει πρόβλημα στο δίκτυο σε περίπτωση βλάβης της συσκευής αυτής. Ομοίως, αν έχουμε ένα σύνολο από καταναμημένες συσκευές ελέγχου εντός του δικτύου, κάθε μία από τις οποίες αναλαμβάνει τη διαχείριση ενός τμήματος του δικτύου, μειώνεται η επίπτωση της βλάβης μιας από τις συσκευές αυτές στο δίκτυο, αλλά δεν εξαλείφεται. Οπότε, αν είναι σημαντικό να είναι συνεχώς διαθέσιμο το επίπεδο ελέγχου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συστάδα από ελεγκτές, παρέχοντας έναν υψηλότερο βαθμό διαθεσιμότητας και/ή την υποστήριξη μεγαλύτερου πλήθους δικτυακών συσκευών. Εν τέλει, με τη χρήση καταναμημένων ελεγκτών, στο επίπεδο ελέγχου βελτιώνεται η ελαστικότητα, η κλιμάκωση και η επίπτωση των προβλημάτων που οφείλονται στην κατάτμηση του δικτύου.



Εικόνα 20: Πλεονεκτήματα καταναμημένου έναντι κεντροποιημένου ελέγχου σε SDN [45]

Στην περίπτωση του κεντροποιημένου ελέγχου σε SDN, εφόσον ο έλεγχος γίνεται κεντρικά δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει κάποιο είδος επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών ελέγχου. Ωστόσο, στην περίπτωση των καταναμημένων ελεγκτών SDN, λόγω της ύπαρξης ενός πλήθους συσκευών ελέγχου είναι απαραίτητο να υπάρχει μια γρήγορη και άμεση επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών συσκευών ελέγχου, για να αποφευχθούν προβλήματα ασυνέπειας όπως το ενδεχόμενο διαφορετικοί ελεγκτές να περιέχουν αποθηκευμένη διαφορετική τιμή για συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του δικτύου. Για την επίτευξη της επικοινωνίας αυτής, είναι απαραίτητη η ύπαρξη της ανατολικής διεπαφής (Eastbound Interface) και της δυτικής διεπαφής (Westbound Interface).

Μέχρι στιγμής, κάθε ελεγκτής έχει υλοποιημένη τη δική του ανατολική/δυτική διεπαφή. Οι διεπαφές αυτές προσφέρουν εισαγωγή/εξαγωγή δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των ελεγκτών, αλγορίθμους για μοντέλα συνέπειας δεδομένων, και δυνατότητες παρακολούθησης/ειδοποίησης για αλλαγές στη λειτουργικότητα. Ωστόσο, προκειμένου για να υπάρχει συμβατότητα και συνεργασία μεταξύ διαφορετικών ελεγκτών είναι απαραίτητο να καθοριστούν και να υλοποιηθούν σταθερές ανατολικές/δυτικές διεπαφές. Η χρήση των διεπαφών αυτών προσφέρει έναν ενορχηστρωμένο και διαλειτουργικό τρόπο για τη δημιουργία πιο αξιόπιστων καταναμημένων πλατφορμών ελέγχου με καλύτερη κλιμάκωση. Η διαλειτουργικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της ποικιλομορφίας των συσκευών του επιπέδου ελέγχου. Πράγματι, η ποικιλομορφία αυξάνει την ευρωστία του συστήματος μειώνοντας την πιθανότητα συνηθισμένων βλαβών, όπως είναι τα σφάλματα λογισμικού.

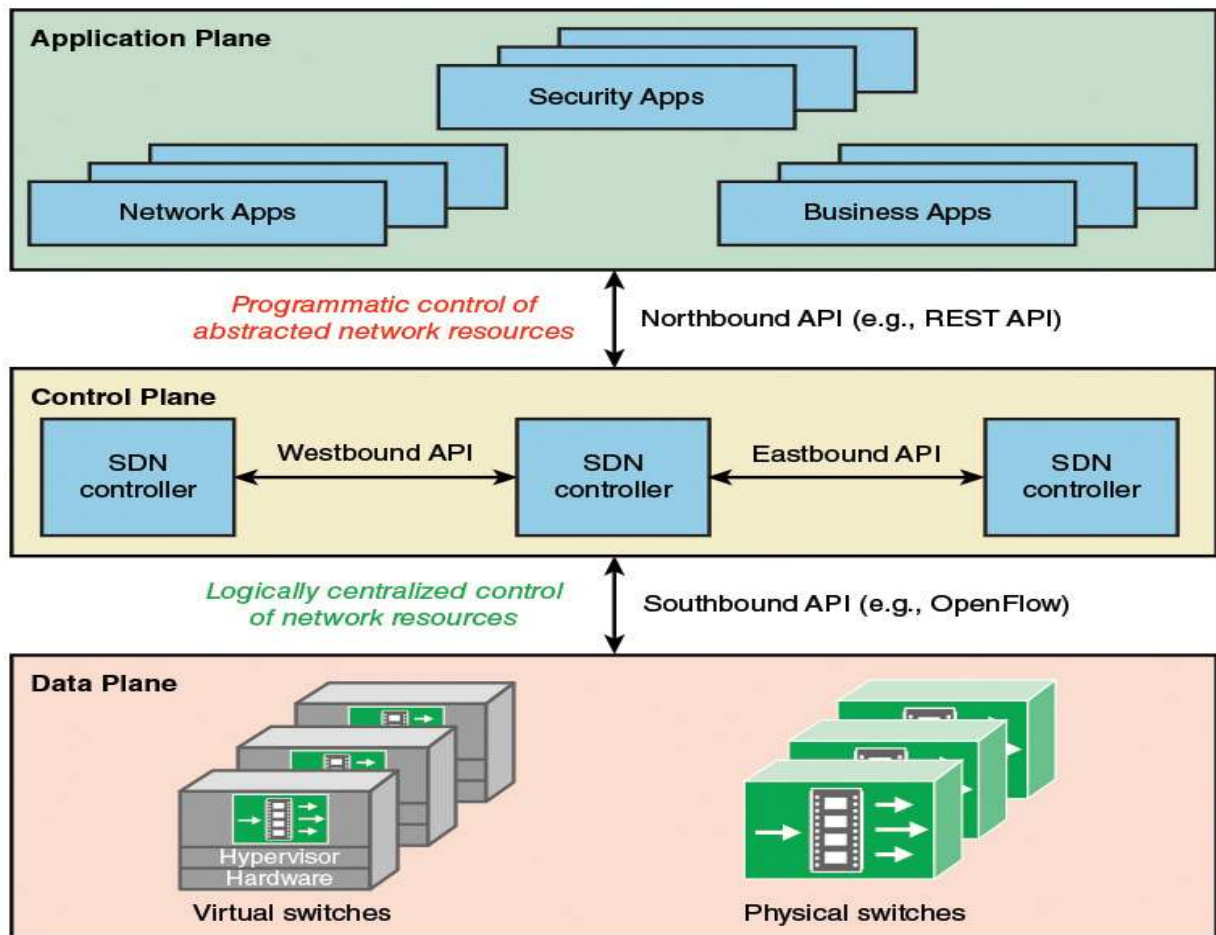


Εικόνα 21: Συσχέτιση διεπαφών Westbound & Eastbound του SDN [44]

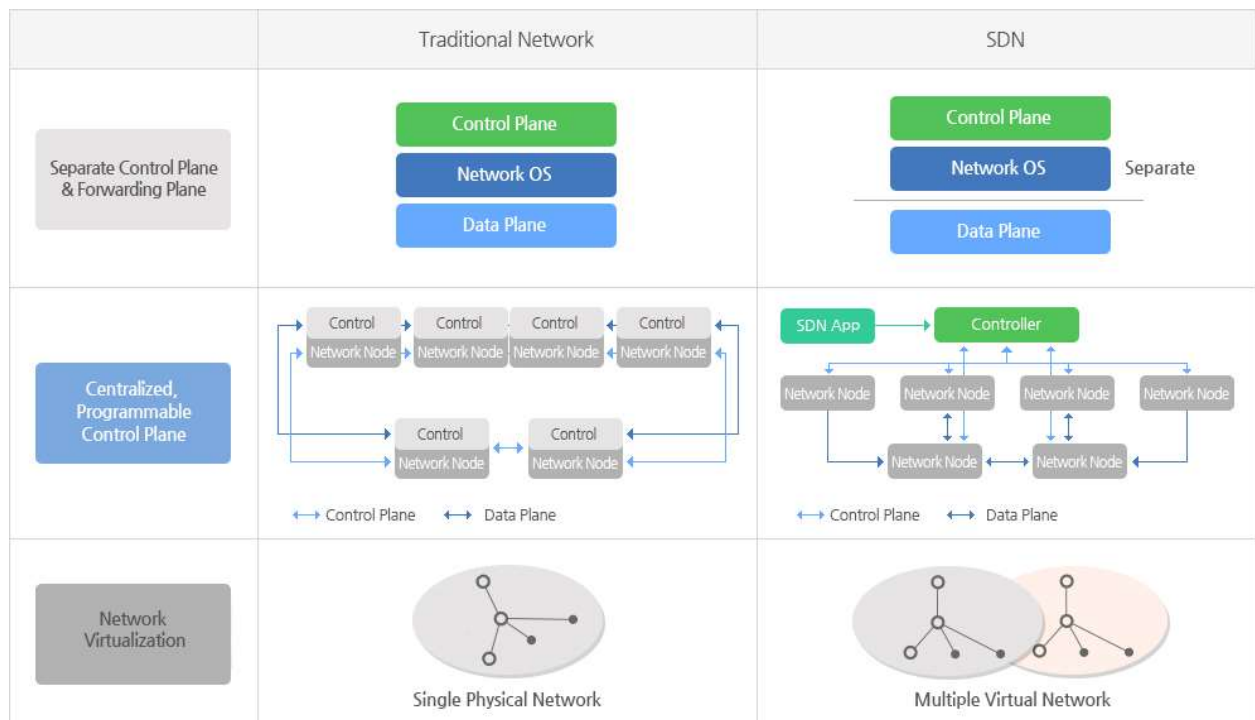
Σε μια εγκατάσταση πολλαπλών τομέων (Domain), οι διεπαφές ανατολής/δύσης ενδέχεται να απαιτούν επίσης πιο συγκεκριμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ των ελεγκτών τομέα SDN [46]. Ορισμένες από τις βασικές λειτουργίες αυτών των πρωτοκόλλων είναι ο συντονισμός της ρύθμισης της ροής που προέρχεται από εφαρμογές, η ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την προσβασιμότητα για τη διευκόλυνση της δρομολόγησης μεταξύ των SDN, η ενημέρωση προσβασιμότητας ώστε να διατηρείται η κατάσταση δικτύου, κ.ά..

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα σχετικά με τις διεπαφές ανατολής / δύσης είναι η ετερογένεια. Για παράδειγμα, εκτός από την επικοινωνία με ομότιμους ελεγκτές SDN, οι ελεγκτές ενδέχεται επίσης να χρειαστεί να επικοινωνήσουν με τους δευτερεύοντες ελεγκτές (σε μια ιεραρχία ελεγκτών) και τους μη-SDN ελεγκτές. Για να είναι διαλειτουργικές, οι διεπαφές ανατολής και δύσης πρέπει να προσαρμόζονται στις διαφορετικές διεπαφές ελεγκτών, με το συγκεκριμένο σύνολο υπηρεσιών των ελεγκτών αυτών και τα ποικίλα χαρακτηριστικά της υποκείμενης υποδομής, συμπεριλαμβανομένης της ποικιλομορφίας της τεχνολογίας, της γεωγραφικής έκτασης και της κλίμακας του δικτύου και της διάκρισης μεταξύ του WAN και του LAN – ενδεχομένως πέρα από τα όρια διαχείρισης. Στις περιπτώσεις αυτές, πρέπει να ανταλλάσσονται διαφορετικές πληροφορίες μεταξύ των ελεγκτών, συμπεριλαμβανομένης της ανακάλυψης των δυνατοτήτων αυτών και της γειννίας μεταξύ αυτών, των πληροφοριών σχετικά με την τοπολογία (στο πλαίσιο των συμφωνημένων συμβάσεων μεταξύ των τομέων διαχείρισης), των πληροφοριών χρέωσης, κ.ά. [47].

Τέλος, μια μεθοδολογία "πυξίδας SDN" [48] προτείνει μια καλύτερη διάκριση μεταξύ οριζόντιων διεπαφών προς ανατολάς και προς δυσμάς, αναφερόμενη στις δυτικές διεπαφές ως πρωτόκολλα SDN-προς-SDN και API ελεγκτών, ενώ ανατολικές διεπαφές θα χρησιμοποιούνται για την αναφορά σε σταθερά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με το παλαιού τύπου επίπεδο ελέγχου.



Εικόνα 22: Ολοκληρωμένη εικόνα του SDN [49]



Εικόνα 23: Διαφορές μεταξύ παραδοσιακών δικτύων και SDN [50]

3.3 Network Functions Virtualization

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα υποκεφάλαια, για την εξέλιξη των δικτύων είναι απαραίτητη η εγκατάσταση νέου εξοπλισμού στο φυσικό επίπεδο, αλλαγή που συνεπάγεται κόστος υλοποίησης, αγοράς και εγκατάστασης. Ωστόσο, εκτός από τον εξοπλισμό αυτό, υπάρχει ένα επιπλέον κόστος, το οποίο “κρύβεται” στην ανομοιογένεια και στην πολυπλοκότητα του νέου εξοπλισμού, καθώς για να προσφέρεται η επιθυμητή λειτουργία είναι απαραίτητο να υπάρχει συντονισμός και επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών συσκευών, καθώς και να πραγματοποιείται επεξεργασία των πληροφοριών που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών. Δυστυχώς, κάποιες συμπεριφορές από τις παραπάνω δεν είναι ακόμα ορισμένες/ολοκληρωμένες ενώ για κάποιες άλλες απαιτείται επιπλέον υλικό προκειμένου να πραγματοποιείται κάποια διαδικασία. Αυτό σημαίνει καθυστέρηση της υλοποίησης και αύξηση του κόστους της.

Για να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα, προτάθηκε η υλοποίηση των μη ορισμένων/ακριβών λειτουργιών ως συστατικά λογισμικού, χρησιμοποιώντας το παράδειγμα της εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύων (Network Functions Virtualization – NFV). Πολλές εταιρίες και οργανισμοί προτυποποίησης προωθούν την έρευνα πάνω στο παράδειγμα NFV, προκειμένου να μειώσουν το κόστος και να παρέχουν ευελιξία και εγγυήσεις στην απόδοση των κυψελωτών δικτύων. Στο NFV, λειτουργίες δικτύου υλοποιούνται σε συστατικά λογισμικού που ονομάζονται εικονικές λειτουργίες δικτύου (Virtual Network Function – VNF), τα οποία αναπτύσσονται σε μεγάλου βεληνεκούς εξυπηρετητές ή νέφη αντί για εξειδικευμένο υλικό.

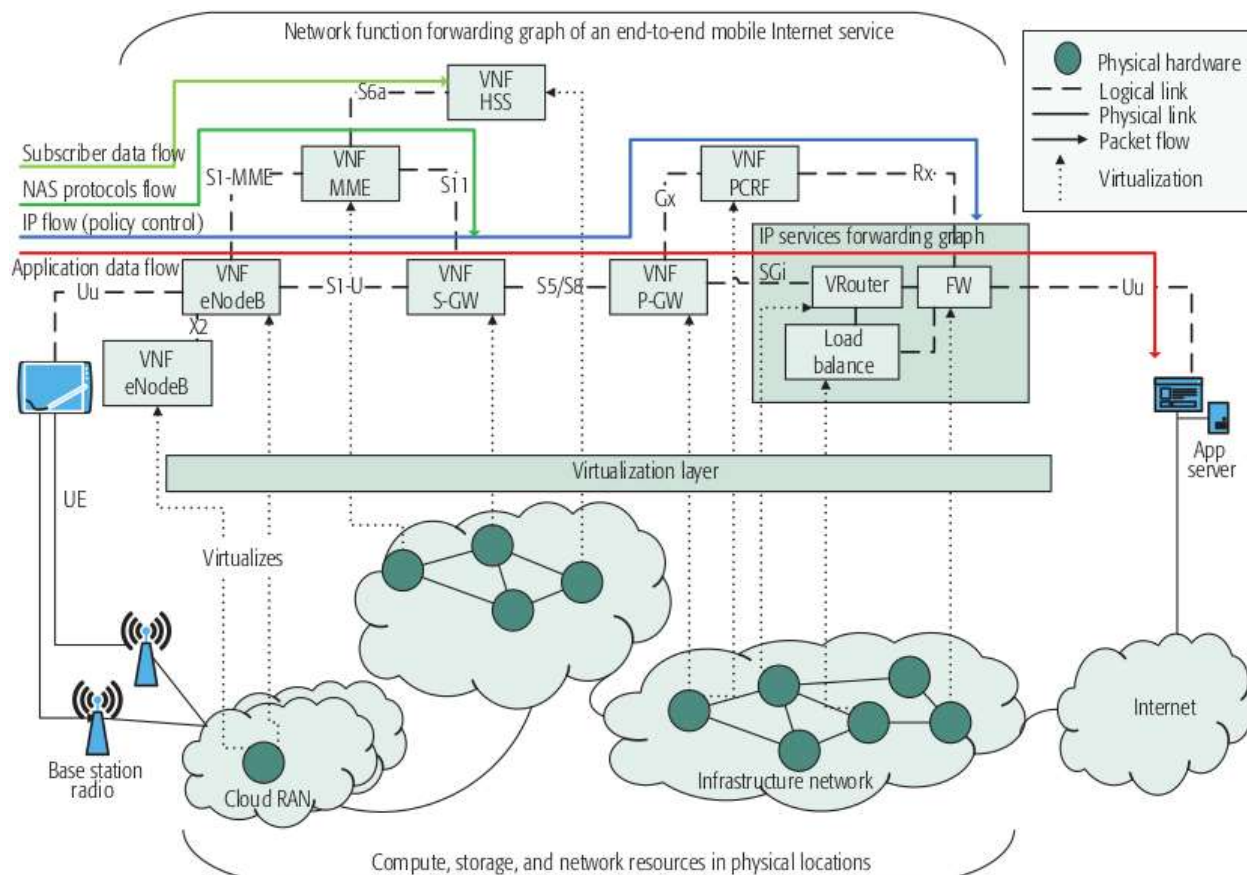
Για παράδειγμα, μέσω του NFV οι πόροι ψηφιακής επεξεργασίας σήματος μεταφέρονται στις υποδομές του νέφους αντί να χρησιμοποιούνται αποκλειστικές μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης (Baseband Processing Unit – BBU) σε κάθε σταθμό βάσης. Με τη μεταφορά των πόρων επεξεργασίας σήματος στο cloud μειώνεται ο φόρτος σηματοδότησης και υπολογιστικής επεξεργασίας, βελτιστοποιείται το κόστος και παρέχεται ευελιξία έτσι ώστε ένας πάροχος υπηρεσιών να μπορεί να ενεργοποιεί κάποια συγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας σήματος μόνο για συγκεκριμένες τερματικές συσκευές σε ολόκληρο το δίκτυο, αντί να ενεργοποιεί άσκοπα όλες τις μονάδες σε κάθε σταθμό βάσης.

Το NFV θα παίξει ένα σημαντικό ρόλο στο 5G, διότι θα βοηθήσει στο να ξεπεραστούν διάφορα προβλήματα όπως:

1. Η βελτιστοποίηση της τροφοδοσίας των πόρων των VNF για αποδοτικότητα κόστους και ενέργειας.
2. Η φορητότητα και η κλιμάκωση των VNF από δικτυακή συσκευή σε δικτυακή συσκευή.
3. Η προσφορά εγγυήσεων στην απόδοση των λειτουργιών των VNF μεταξύ των οποίων είναι η αστοχία, η καθυστέρηση και η ανεκτική απώλεια πακέτων.
4. Η συνύπαρξη των VNF με μη-εικονικές λειτουργίες δικτύων [51].

Με τη χρήση του NFV, οι υπηρεσίες περιγράφονται ως ένα προωθητικό γράφημα συνδεδεμένων λειτουργιών του δικτύου (Forwarding Graph of Connected Network Functions), το οποίο ορίζει την αλληλουχία των λειτουργιών του δικτύου που επεξεργάζονται διαφορετικές ροές εντός του δικτύου από άκρο σε άκρο (βλ. Εικόνα 24). Η διαχείριση της φορητότητας και τα πρωτόκολλα του επιπέδου μη-πρόσβασης (Non-Access Stratum) ρέουν εντός διαφορετικών λειτουργιών του δικτύου, για καλύτερη διαχείριση της φορητότητας, πιστοποίηση και επιβολή πολιτικών. Σε αντίθεση με τα τρέχοντα κυψελωτά δίκτυα όπου μια λειτουργία ενεργοποιείται σε ολόκληρο το δίκτυο,

με τη χρήση των κατευθυνόμενων γραφημάτων δίνεται η δυνατότητα στους διαχειριστές των δικτύων 5G να ενεργοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ανά υπηρεσία.

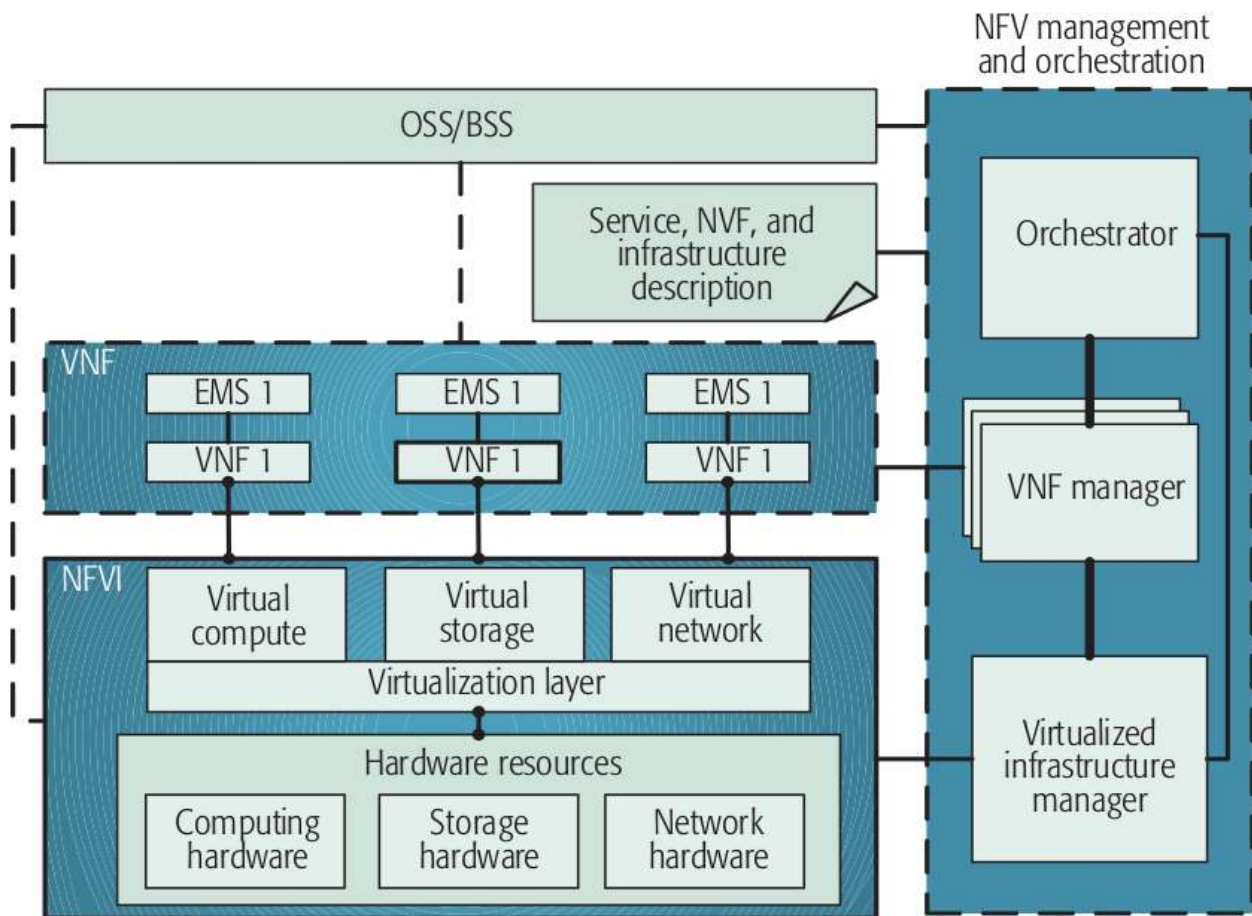


Εικόνα 24: Εικονικοποίηση ενός απλοποιημένου προωθητικού γραφήματος που υλοποιεί μια φορητή υπηρεσία Διαδικτύου [52]

Η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου πραγματοποιούνται με τη χρήση ενός ξεχωριστού επιπέδου εικονικοποίησης που διαχωρίζει τη σχεδίαση των υπηρεσιών από την υλοποίησή τους βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα, την ελαστικότητα, την ταχύτητα και την ευελιξία. Μεταξύ των λειτουργιών δικτύων που μπορούν να εικονικοποιηθούν είναι:

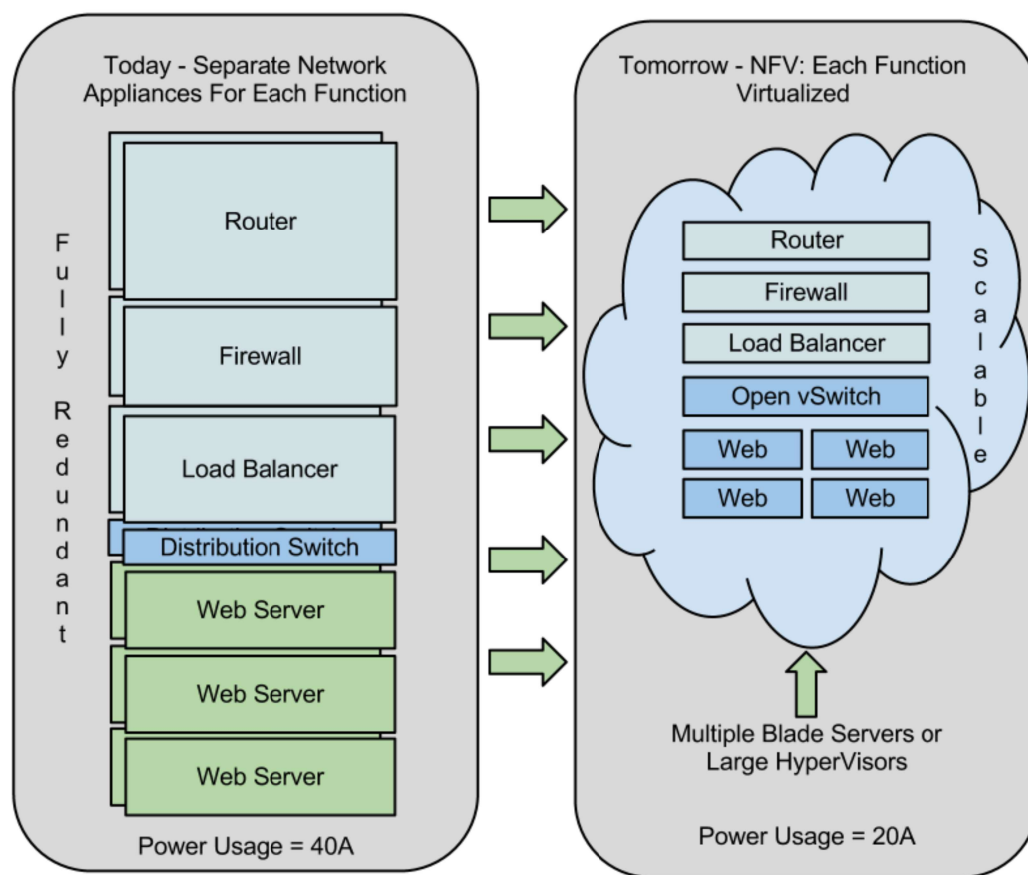
1. Λειτουργίες του εξελιγμένου κεντρικού δικτύου πακέτων (Evolved Packet Core – EPC) όπως η μονάδα διαχείρισης φορητότητας (Mobility Management Entity), η πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway – SGW) και η πύλη πακέτων δεδομένων δικτύου (Packet Data Network Gateway – PGW).
2. Λειτουργίες BBU, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control – MAC), του ελέγχου ασύρματης ζεύξης (Radio Link Control) και του ελέγχου ασύρματων πόρων (Radio Resource Control) [53].
3. Λειτουργίες μεταγωγής.
4. Λειτουργίες εξισορρόπησης του φόρτου της κυκλοφορίας.
5. Λειτουργίες κέντρων υπηρεσιών.

Η NFV αρχιτεκτονική αναφοράς [51] υποστηρίζει ένα μεγάλο εύρος υπηρεσιών οι οποίες περιγράφονται ως προωθητικά γραφήματα που ενορχηστρώνουν την ανάπτυξη και τη λειτουργία VNF σε μια ποικιλία υπολογιστικών πόρων, πόρων αποθηκευτικού χώρου και πόρων δικτύου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, το υλικό είναι συνήθως συγκεντρωμένο και διασυνδεδεμένο μέσω πόρων δικτύου. Άλλοι δικτυακοί πόροι διασυνδέουν τα VNF με εξωτερικά δίκτυα και με μη-εικονικοποιημένες λειτουργίες, επιτρέποντας την συνύπαρξη των ήδη υπαρχουσών τεχνολογιών με τις εικονικοποιημένες λειτουργίες δικτύων του 5G. Η διαχείριση και ενορχήστρωση του NFV περιλαμβάνει μονάδες φροντίδας των πόρων που επιτυγχάνουν τα υποσχόμενα πλεονεκτήματα του NFV.



Εικόνα 25: ETSI NFV Reference Architecture [52]

Οι διαχειριστές VNF (βλ. Εικόνα 25) πραγματοποιούν τις εξής 2 βασικές λειτουργίες: πρόνοια της σωστής λειτουργίας και των πόρων. Η λειτουργία VNF αποτελείται από τη διαχείριση της υποδομής, τη διαχείριση ασφαμάτων, τη διαχείριση επιδόσεων, τον σχεδιασμό χωρητικότητας και τη βελτιστοποίηση. Η πρόνοια πόρων εξασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή τους όπως η δημιουργία εικονικών μηχανών (Virtual Machine – VM) σε διακομιστές, τη βέλτιστη συνδεσιμότητα μεταξύ VNF, την εξοικονόμηση ενέργειας και την επαναδέσμευση των πόρων. Επιπλέον, οι διαχειριστές πόρων ανακαλύπτουν υπολογιστές, αποθηκευτικούς χώρους και πόρους δικτύου στην υποδομή. Ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός διαχειριστή VNF αξιοποιεί τα σημαντικότερα οφέλη του NFV για τη μείωση του απαιτούμενου κεφαλαίου και του κόστους λειτουργίας σε 5G μέσω της δυναμικής κατανομής πόρων, της εξισορρόπησης φορτίου κυκλοφορίας και της ευκολότερης λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου [54].



Εικόνα 26: Πλεονεκτήματα του NFV [55]

Το NFV αντιμετωπίζει διάφορες δυσκολίες και προβλήματα στη δικτύωση. Κάποια από αυτά σχετίζονται με τις απότομες διακυμάνσεις του φόρτου των δικτύων που απαιτούν την προσαρμογή των VM των VNF δημιουργώντας την ανάγκη για ιδανική ανάθεση των πόρων σε VM. Μια τεχνολογία που μπορεί να βοηθήσει σε αυτό είναι η φορητότητα των VM των VNF μεταξύ διαφορετικών εξυπηρετητών, με προϋπόθεση να ξεπεράσει τις παρακάτω προκλήσεις.

1. Πρέπει να διατηρούνται οι απαραίτητες πληροφορίες δικτύου και διευθύνσεων IP και MAC.
2. Πρέπει να υπάρχει πρόσβαση στις απαραίτητες πληροφορίες υλικού, φάσματος και καναλιού του ασύρματου δικτύου πρόσβασης που εικονικοποιείται σε πραγματικό χρόνο
3. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερο κέρδος, η χρήση των πόρων πρέπει να παραμένει όσο το δυνατόν υψηλότερη.

Κάποια άλλα προβλήματα σχετίζονται με το φόρτο που προκύπτει κατά τη μεγάλη αύξηση του πλήθους των διευθύνσεων όταν υπάρχουν πολλές VNF στον ίδιο εξυπηρετητή και τη δυσκολία του χειρισμού του πλήθους αυτού από το επίπεδο μεταγωγής. Άλλα προβλήματα σχετίζονται με την ανάγκη του διαχωρισμού των διευθύνσεων των VNF όταν η υποδομή είναι κοινόχρηστη μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών, ώστε να παρέχεται ασφάλεια, ευελιξία και ιδανική προώθηση της κίνησης.

Δηλαδή, ο σκοπός είναι να εφαρμοστεί το NFV διατηρώντας τα πλεονεκτήματά του και τα πλεονεκτήματα κλιμάκωσης των ήδη υπάρχοντων και υψηλά κατανεμημένων

κυψελωτών δικτύων. Έτσι, χαρακτηριστικά όπως η εξισορρόπηση φόρτου και η τοποθέτηση VM σε περιβάλλον νέφους θα γίνεται σε πραγματικό χρόνο και θα υποστηρίζει χιλιάδες back-end κυψελωτές εικονικές λειτουργίες.

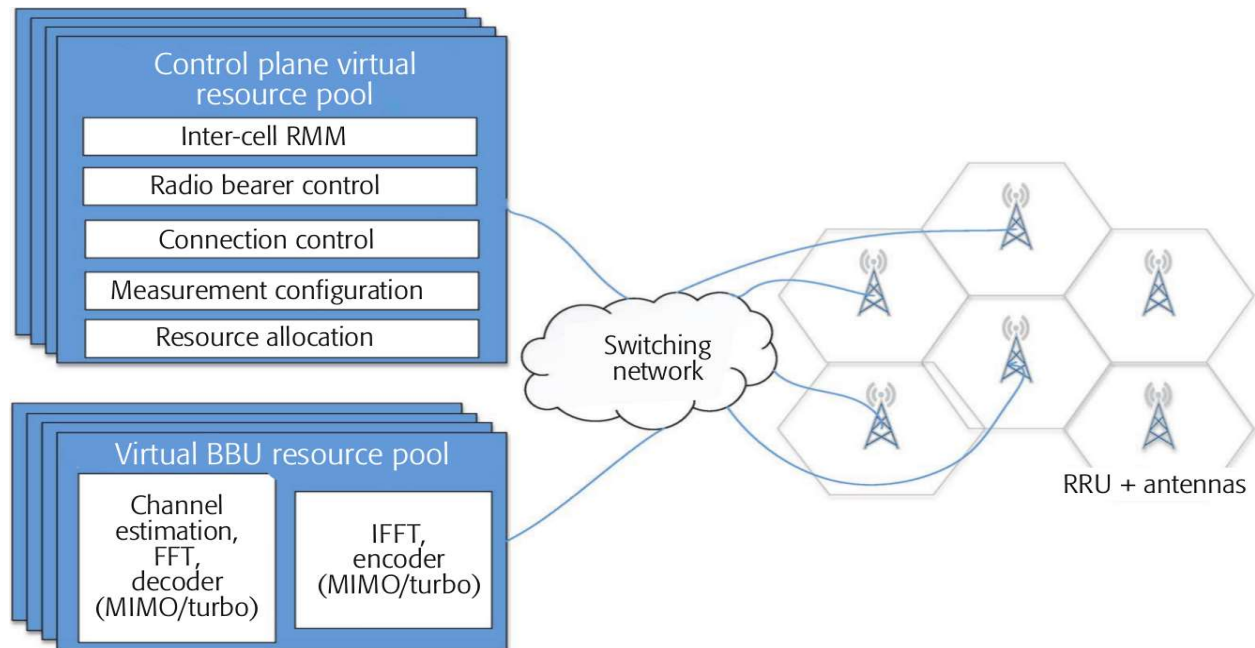
Η τεχνική της επικάλυψης δικτύου (Network Overlay) είναι μια προσπάθεια επίλυσης των παραπάνω προβλημάτων του NFV μέσω της υλοποίησης εικονικών δικτύων με VNF ως επικαλύμματα. Η πρώτη συσκευή που συνδέεται σε ένα VNF καλείται άκρο εικονικοποίησης δικτύου (Network Virtualization Edge – NVE) και είναι ουσιαστικά ένας φυσικός μεταγωγής ή δρομολογητής ή ένας εικονικός μεταγωγέας σε ένα σύστημα επίβλεψης του δικτύου που εγκλωβίζει τα αρχικά πακέτα από το VNF και προσδιορίζει τον προορισμό NVE που θα απεγκλωβίσει το πακέτο πριν το παραδώσει στο επόμενο VNF. Το δίκτυο προωθεί το πακέτο με βάση την επικεφαλίδα εγκλωβισμού που ανεξάρτητα από το ωφέλιμο φορτίο του πακέτου.

Τα NFV και SDN σχετίζονται με πολλούς τρόπους. Πρώτον, το SDN είναι μια τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα ύπαρξης του NFV, διότι μπορεί να απλοποιήσει την εφαρμογή της επικάλυψης δικτύου, διότι ένας ελεγκτής SDN μπορεί να διατηρεί μια καθολική αντιστοίχιση διευθύνσεων εικονικών δικτύων σε διευθύνσεις φυσικών δικτύων και να προγραμματίζει τους μεταγωγείς του NVE εγκαθιστώντας κανόνες ώστε οι μεταγωγείς να τροποποιούν τις επικεφαλίδες των πακέτων από διαφορετικές ροές VNF σύμφωνα με την αντιστοίχιση αυτή. Δεύτερον, η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου όπως οι δρομολογητές και οι μεταγωγείς είναι πολύπλοκη διαδικασία με τις συμβατικές τεχνολογίες δικτύωσης, ενώ η τεχνολογία SDN παρέχει μια φυσική λύση. Για παράδειγμα, ας φανταστούμε την πολυπλοκότητα ενός δρομολογητή που τρέχει πολλούς εικονικούς δρομολογητές, κάθε ένας από τους οποίους υλοποιεί το δικό του επίπεδο ελέγχου. Τρίτον, η τεχνολογία SDN παρέχει ευέλικτη δέσμευση των συγκεντρωμένων υπολογιστικών πόρων σε ένα συγκεκριμένο VNF, διαχειρίζεται με ελαστικότητα τις κατανομές πόρων σύμφωνα με τις απαιτήσεις κυκλοφορίας και εύκολα κινητοποιεί VNF με ταχεία τροποποίηση στους κανόνες προώθησης του NVE.

Ένας ελεγκτής SDN, προκειμένου να υλοποιήσει επίπεδα επικάλυψης κάνει μια απλή τροποποίηση των διευθύνσεων των πακέτων. Με αυτόν τον τρόπο δε χρειάζεται κάποια αλλαγή στο επίπεδο δεδομένων. Ο ελεγκτής διατηρεί τη συσχέτιση ανάμεσα στα φυσικά και στα εικονικά δίκτυα, καθώς και τους δρομολογητές μέσα από τους οποίους ρέουν τα δεδομένα των εικονικών δικτύων. Για τον αυστηρό διαχωρισμό των εικονικών δικτύων και την ευέλικτη απομόνωση των ροών δεδομένων αυτών μέσω SDN, ορίζουμε ένα εύρος φυσικών διευθύνσεων IP για το ίδιο φυσικό δίκτυο, ώστε οι διευθύνσεις των πακέτων ενός εικονικού να μεταφράζονται σε ένα επιθυμητό και συγκεκριμένο εύρος διευθύνσεων φυσικού δικτύου, με κόστος το μεγάλο πλήθος διευθύνσεων IP που απαιτούνται για να γίνει αυτό. Μέσω SDN μπορεί επίσης να οριστεί ανεξάρτητη συμπεριφορά για κάθε εικονικό δίκτυο των VNF. Ακόμα και αν η εικονικοποίηση ενός δικτύου δεν υλοποιείται μέσω SDN, ένας ανεξάρτητος ελεγκτής SDN μπορεί να ελέγχει τη συμπεριφορά κάθε εικονικού δικτύου, ανεξάρτητα από άλλα εικονικά δίκτυα. Οπότε η τεχνολογία SDN είναι μια φυσική επιλογή για να υλοποιηθούν VNF σε 5G.

Το ασύρματο δίκτυο 5G περιλαμβάνει λειτουργίες που αντί για την εφαρμογή τους σε υλικό μπορούν να εικονικοποιηθούν, μειώνοντας το πλήθος των συσκευών και την κατανάλωση ενέργειας, βελτιώνοντας τη διαχείριση του δικτύου και των λειτουργιών και επιτρέποντας τη δημιουργία νέων υπηρεσιών. Τα κύρια οφέλη στη μείωση του κεφαλαίου εξοπλισμού και λειτουργίας προκύπτουν μέσω της εικονικοποίησης των BBU (βλ. Εικόνα 27), δημιουργώντας έτσι το ονομαζόμενο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης νέφους (Cloud-RAN) [53] όπου το NFV παρέχει το απαιτούμενο επίπεδο ενορχηστρώσεων για το για την εικονικοποίηση των επιπέδων 2 και 3 της διασύνδεσης ραδιοσυχνοτήτων και το απαραίτητο πλαίσιο για την ενσωμάτωση εξειδικευμένου υλικού

και επιταχυντών για την επεξεργασία βασικής ζώνης. Κάθε εικονικό BBU έχει ακριβώς τη ίδια ισχύ με ένα φυσικό BBU.



Εικόνα 27: Συνήθεις λειτουργίες RAN στα επίπεδα ελέγχου και χρήστη του 3GPP [52]

Επίσης, συνδυάζοντας τα SDN και VNF μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα νέες και προχωρημένες τεχνολογίες στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης του 5G, όπως η επικοινωνία D2D και η CoMP, και η πύκνωση του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να παρέχει μεταξύ άλλων και το ζητούμενο περιβάλλον μηδαμινής καθυστέρησης στα άκρα του δικτύου. Οπότε, η τεχνολογία αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στο 5G.

3.4 Radio Access Network as a Service

Το κεντρικοποιημένο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης (Centralized RAN – C-RAN) αξιολογείται ως ένας πιθανός τρόπος για την αποτελεσματική συγκέντρωση των υπολογιστικών πόρων του ασύρματου δικτύου πρόσβασης [56]. Στο C-RAN, πολλές τοποθεσίες συνδέονται με ένα κεντρικό κέντρο δεδομένων όπου εκτελείται όλη η επεξεργασία βασικής ζώνης (BB). Τα ραδιοφωνικά σήματα ανταλλάσσονται μέσω ειδικών γραμμών μετάδοσης (που ονομάζονται fronthaul) μεταξύ απομακρυσμένων ραδιοφωνικών κεφαλών (RRH) και του κέντρου δεδομένων.

Μια τεχνολογία που σχετίζεται με την ευέλικτη ασύρματη σύνδεση με δίκτυα είναι η παροχή του δικτύου ασύρματης πρόσβασης ως υπηρεσία (Radio Access Network as a Service – RANaaS). Η συγκέντρωση της επεξεργασίας και της διαχείρισης σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G θα πρέπει να είναι ευέλικτη και προσαρμοσμένη στις πραγματικές απαιτήσεις της εκάστοτε υπηρεσίας. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα συμβιβασμό μεταξύ της πλήρους συγκέντρωσης, όπως και στην C-RAN, και της αποκέντρωσης, όπως συμβαίνει και στα σημερινά δίκτυα. Αυτή η αντιστάθμιση αντιμετωπίζεται μέσω του σκεπτικού της προσφοράς του ασύρματου δικτύου πρόσβασης ως υπηρεσία, η οποία εν μέρει συγκεντρώνει τις λειτουργίες του δικτύου αυτού ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες καθώς και τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Το RANaaS είναι μια

εφαρμογή του παραδείγματος XaaS [57], που υποστηρίζει ότι κάθε είδους λειτουργία μπορεί να συσκευάζεται και να παραδίδεται με τη μορφή μιας υπηρεσίας, ενδεχομένως συγκεντρωμένης μέσα σε μια πλατφόρμα νέφους. Αυτό επιτρέπει την αξιοποίηση των αυξανόμενων δυνατοτήτων αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων που παρέχονται από μια πλατφόρμα νέφους που φιλοξενείται σε κέντρα δεδομένων. Ο σχεδιασμός RANaaS βασισμένος σε νέφος επιτρέπει την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα από διάφορες οπτικές γωνίες:

1. Ανάλογα με τη συνδεσιμότητα δικτύου, το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης είναι συγκεντρωμένο και χρησιμοποιείται η κατάλληλη λειτουργικότητα του λογισμικού.
2. Οι πραγματικές περιπτώσεις χρήσης και τα τρέχοντα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας καθορίζουν τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται και που σχεδιάστηκαν για αυτές τις περιπτώσεις.
3. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πιο πρόσφατες υλοποιήσεις λογισμικού και εξελιγμένοι αλγόριθμοι, οι οποίοι αξιοποιούν αποτελεσματικότερα τους διαθέσιμους πόρους σε ένα κέντρο δεδομένων.

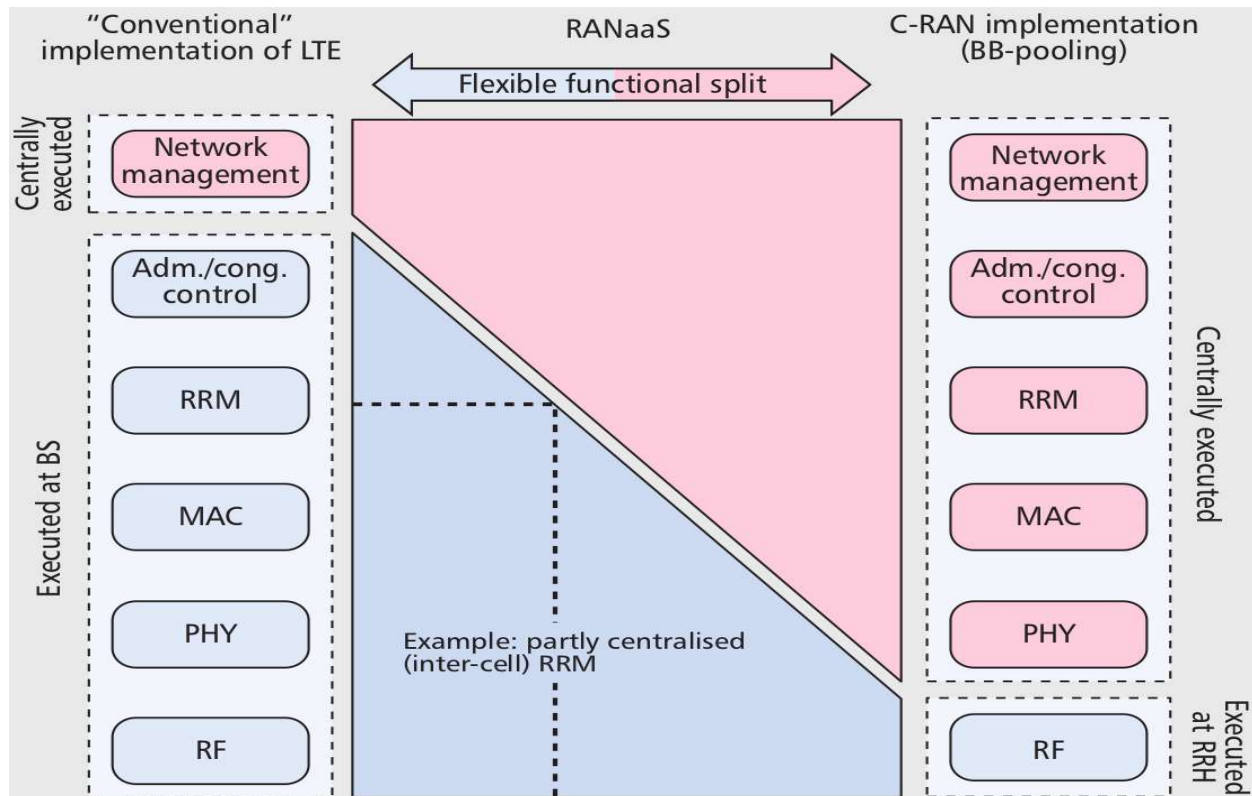
Αυτό επιτρέπει την επίτευξη των θεωρητικών ορίων σε σχέση με τη διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος, την ενεργειακή απόδοση ή την ικανότητα να αξιοποιήσης του back-haul. Αυτός ο αυξημένος βαθμός ευελιξίας και προσαρμοστικότητας θα αποτελέσει βασικό παράγοντα για τα μελλοντικά δίκτυα 5G.

Το κεντρικό στοιχείο του RANaaS είναι η ευέλικτος διαχωρισμός των λειτουργιών της στοίβας των ασύρματων πρωτοκόλλων μεταξύ της κεντρικής πλατφόρμας RANaaS και των τοπικών ασύρματων σημείων πρόσβασης (Radio Access Point – RAP). Αυτή η λειτουργική διάσπαση εισάγει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στη σχεδίαση της επεξεργασίας και την ευελιξία στην πραγματική εκτέλεση των λειτουργιών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28. Η αριστερή πλευρά αποτελεί παράδειγμα παραδοσιακής υλοποίησης 4G-LTE όπου όλες οι λειτουργίες έως τον έλεγχο εισόδου/συμφόρησης υλοποιούνται τοπικά στο RAP, δηλαδή στο σταθμό βάσης (BS). Η δεξιά πλευρά απεικονίζει την προσέγγιση C-RAN, όπου μόνο το ασύρματο front-end υλοποιείται τοπικά και όλες οι άλλες λειτουργίες είναι κεντριοποιημένες (στην περίπτωση αυτή ένα RAP μειώνεται, π.χ. σε ένα RRH). Αντίθετα, το RANaaS δεν κεντριοποιεί πλήρως όλες τις λειτουργίες ασύρματου δικτύου πρόσβασης, αλλά κεντριοποιεί μόνο μερικές από αυτές.

Λόγω του ότι το Third Generation Partnership Project (3GPP) 4G-LTE επιβάλλει ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά στο συγχρονισμό καθώς και τους βρόχους ανάδρασης μεταξύ επιμέρους επιπέδων πρωτοκόλλου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ο παραπάνω διαχωρισμός λειτουργιών σε κάθε επίπεδο πρωτοκόλλων. Ως εκ τούτου, σε μια ανάπτυξη με περιορισμένο backhaul, το μεγαλύτερο μέρος της στοίβας ασύρματων πρωτοκόλλων και διαχείρισης ασύρματων πόρων (Radio Resource Management) εκτελούνται τοπικά, ενώ οι λειτουργίες με λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις όπως η διαχείριση του φορέα και η εξισορρόπηση φόρτου τοποθετούνται στην πλατφόρμα RANaaS. Αν υπάρχει διαθέσιμο backhaul μεγάλης χωρητικότητας, επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός συγκέντρωσης με τη μετατόπιση λειτουργιών κατώτερου στρώματος (π.χ. τμήματα του PHY και του MAC) στην πλατφόρμα RANaaS.

Μια άλλη σημαντική πρόκληση είναι η εκμετάλλευση εικονικών πόρων σε εμπορικό υλικό, το οποίο δεν παρέχει τα ίδια χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου όπως το υλικό που χρησιμοποιείται επί του παρόντος. Αυτό θα εισαγάγει μια πρόσθετη υπολογιστική καθυστέρηση και μια αστάθεια, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψιν στο σχεδιασμό του πρωτοκόλλου. Από την άλλη πλευρά, αυτό αποτελεί και μια ευκαιρία επειδή οι

αλγόριθμοι μπορούν να εκμεταλλευθούν αποτελεσματικά τον πιθανώς μεγάλο όγκο πόρων, πράγμα που συνεπάγεται μεγάλη προοπτική για υπολογιστική ποικιλομορφία.



Εικόνα 28: Ευέλικτος διαχωρισμός λειτουργιών [58]

Η παρακάτω λίστα συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά μιας εφαρμογής RANaaS παρόμοια με τα βασικά χαρακτηριστικά μιας πλατφόρμας υπολογιστικής νέφωσης:

1. Παροχή ασύρματης χωρητικότητας κατά απαίτηση, για την προσφορά υπηρεσιών κινητής επικοινωνίας πιο προσαρμοσμένες στις πραγματικές ανάγκες των φορέων εκμετάλλευσης και των συνδρομητών, οι οποίες ποικίλουν σημαντικά στο χρόνο και στο χώρο σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G.
2. Εικονικοποίηση πόρων και λειτουργιών ασύρματου δικτύου πρόσβασης για βελτιστοποιημένη χρήση, διαχείριση και κλιμάκωση με το πραγματικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.
3. Συγκέντρωση πόρων που επιτρέπει πιο εξελιγμένα σενάρια δικτύωσης όπου οι εικονικοί φορείς προσφέρουν στοχευμένες υπηρεσίες που επιτρέπουν πιο ποικίλες επιχειρηματικές ευκαιρίες. Αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε πολύ πυκνά δίκτυα 5G όπου ο αριθμός των επιλογών ανάπτυξης μπορεί να είναι περιορισμένος.
4. Ελαστικότητα με κλιμάκωση πόρων δικτύου στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας καθώς και κλιμάκωση του αριθμού ενεργών RAP.
5. Μετρήσεις υπηρεσιών, οι οποίες επιτρέπουν στους φορείς εκμετάλλευσης να πωλούν υπηρεσίες λειτουργίας του ασύρματου δικτύου πρόσβασης (δηλαδή την κεντρική μονάδα συντονισμού και επεξεργασίας καθώς και τη χρήση των RAP) και να χρεώνουν τη χρήση αυτών σε μετρήσιμη και ελεγχόμενη βάση. Αυτό θα επιτρέψει την πιο διαφοροποιημένη χρήση των πόρων του ραδιοφωνικού δικτύου και των σεναρίων εικονικών φορέων.

6. Πολλαπλών μισθώσεων, επιτρέποντας απομόνωση, επιβολή πολιτικής και χρέωση διαφορετικών χρηστών της πλατφόρμας RANaaS (δηλαδή διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών). Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη διασφάλιση της ασφάλειας σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G.

3.5 Anything as a Service

Ένα ομοσπονδιακό νέφος (Federated Cloud), που ονομάζεται επίσης ομοσπονδία νεφών (Cloud Federation), είναι η ανάπτυξη και η διαχείριση πολλών εξωτερικών και εσωτερικών υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους με σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών των επιχειρήσεων [59].

Ένα νέφος ακολούθησης (Follow-Me Cloud) είναι ένα γενικό πλαίσιο συνεργασίας μεταξύ ενός δικτύου κατανεμημένων φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και ενός δικτύου περιφερειακών κέντρων δεδομένων, δηλαδή ένα ομοσπονδιακό νέφος, μέσω του οποίου μια υπηρεσία νέφους θα μπορεί να ακολουθεί τον τελικό χρήστη κατά τη διάρκεια της κινητικότητάς του [60].

Ένα cloudlet είναι ένα νέφος κέντρου δεδομένων μικρής κλίμακας με δυνατότητες κινητικότητας/φορητότητας που βρίσκεται στο άκρο του διαδικτύου. Ο κύριος σκοπός του cloudlet είναι η υποστήριξη διαδραστικών εφαρμογών κινητής τηλεφωνίας και εφαρμογών κινητής τηλεφωνίας που απαιτούν πολλούς πόρους, παρέχοντας ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους σε κινητές συσκευές με χαμηλή καθυστέρηση. Πρόκειται για ένα νέο αρχιτεκτονικό στοιχείο που επεκτείνει τη σημερινή υποδομή υπολογιστικού νέφους. Αντιπροσωπεύει τη μεσαία βαθμίδα μιας ιεραρχίας 3 επιπέδων: mobile device - cloudlet - cloud. Ένα cloudlet μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κέντρο δεδομένων σε ένα κουτί του οποίου ο στόχος είναι να φέρει τις δυνατότητες υπολογιστικού νέφους πιο κοντά στους τελικούς χρήστες [61], [62].

Ένα ομοσπονδιακό νέφος δικτύωσης (Federated Networked Cloud – FNC) στοχεύει στην πλήρη συνένωση των υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών και IT, παρέχοντας τις απαραίτητες τεχνολογίες για την αυτόματη ενσωμάτωση του δικτύου και του νέφους. Αυτό γίνεται μέσω της δημιουργίας και διαχείρισης κατανεμημένων πόρων νέφους (υπολογιστικούς, αποθήκευσης και δικτύωσης) τόσο εντός όσο και μεταξύ των τομέων των παρόχων υπηρεσιών. Το κέρδος για τους παρόχους υπηρεσιών είναι πολύ πιο σταθερές και αξιόπιστες υπηρεσίες δικτύου σε κέντρα δεδομένων και ευέλικτη διαμόρφωση και ελαστική δικτύωση στο δίκτυο ευρείας περιοχής που διασυνδέει τα κέντρα δεδομένων [63].

Ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του 5G θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευέλικτος βασιζόμενος σε NFV, SDN και cloud computing. Αυτή η ευελιξία συνίσταται στην κατασκευή, κατά απαίτηση και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα [64], στιγμιοτύπων (Instance) υποδομών εικονικού δικτύου (Virtual Network Infrastructure – VNI), το οποίο ουσιαστικά είναι ένα σύνολο VM, μαζί με τις αντίστοιχες εικονικές λειτουργίες δικτύου (VNF), π.χ. πύλη πακέτων δεδομένων (PGW) και πύλη εξυπηρέτησης (SGW), δηλαδή, να υπάρχει η κατάλληλη κλιμάκωση στην ξαφνική αύξηση της κυκλοφορίας.

Εν τω μεταξύ, η τάση προς την αποκεντρωμένη/κατανεμημένη αρχιτεκτονική του cloud, με τη μορφή cloudlet ή FNC, δηλαδή του υπολογιστικού άκρου, θα πρέπει να επιτρέπει την τοποθέτηση VNF κοντά σε τελικούς χρήστες. Αυτό θα μειώσει το μήκος του μονοπατιού επικοινωνίας από άκρο σε άκρο μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και των αντίστοιχων διακομιστών, γεγονός που θα βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών.

Το σύστημα δικτύου 5G θα πρέπει επίσης να επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών να δημιουργούν και να ενορχηστρώνουν, με έναν εύκολο και δυναμικό τρόπο, υπηρεσίες δικτύου που στοχεύουν σε συγκεκριμένη βελτιστοποίηση των πόρων δικτύου, π.χ. προσωρινή αποθήκευση, εκφόρτωση επισκεψιμότητας ή βελτιστοποίηση μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Αυτή η ανάγκη περιγράφεται μέσω της έννοιας του όλα ως υπηρεσίες (Anything as a Service – ANYaaS), όπου η δημιουργία και η ενορχήστρωση κατά παραγγελία των 5G υπηρεσιών καθορίζονται και επιτρέπονται, εκμεταλλευόμενες τα πλεονεκτήματα τόσο του cloud computing όσο και του NFV. Το ANYaaS επιτρέπει την δημιουργία στιγμιότυπων ενός ή περισσότερων VNI που σχετίζονται με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, μαζί με την ενσωμάτωσή τους, προκειμένου να δημιουργηθεί μια συγκεκριμένη υπηρεσία 5G που στοχεύει σε μια συγκεκριμένη βελτιστοποίηση πόρων δικτύου. Μεταξύ των περιπτώσεων υπηρεσίας που ενδέχεται να εκκινήσουν οι ANYaaS είναι οι ακόλουθες.

3.5.1 Mobile Content Delivery Network as a Service

Η ανάπτυξη του ασύρματου δικτύου παροχής διανομής ως υπηρεσία (Content Delivery Network as a Service – CDNaaS) δημιουργεί και επιτρέπει τη διαχείριση ενός στιγμιότυπου υπηρεσίας (Service Instance – SI) ενός εικονικού δικτύου διανομής περιεχομένου (Content Delivery Network – CDN), όπου στιγμιότυπα CDN VNF (π.χ. IPTV, βίντεο κατά παραγγελία, βιντεοκασέτες) είναι δημιουργημένα και τοποθετημένα στρατηγικά πάνω στους κοντινούς χρήστες που είναι διασυνδεδεμένοι μέσω ενός FNC και υποστηρίζεται από έξυπνες στρατηγικές προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων που βασίζονται, μεταξύ άλλων, στη δημοτικότητα του περιεχομένου καθώς και στη γεωγραφική διανομή και στα πρότυπα κινητικότητας των θεατών. Το τελευταίο μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως κίνητρο για τη δημιουργία νέων VNF CDN έτσι ώστε το περιεχόμενο βίντεο που ενδιαφέρει να αποθηκεύεται σε κοντινά cache VNF μετά από την κινητικότητα ενός θεατή ή μιας ομάδας θεατών, ομοίως με την έννοια του νέφους ακολούθησης.

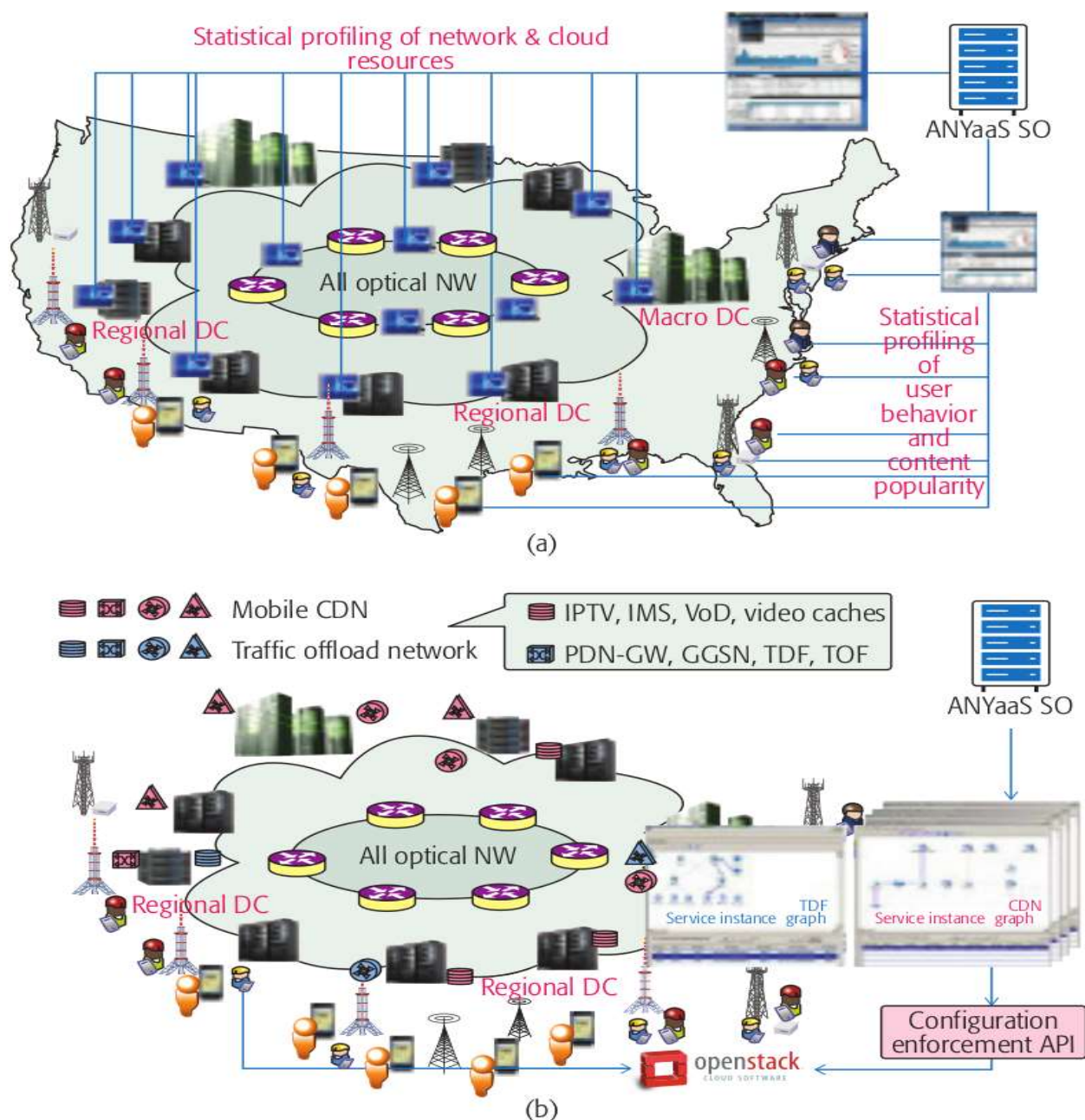
3.5.2 Traffic Offload as a Service

Ο χειρισμός της κίνησης ως υπηρεσία (Traffic Offload as a Service – TOFaaS) δημιουργεί και επιτρέπει τη διαχείριση ενός στιγμιότυπου υπηρεσίας ενός VNI που αποτελείται από στιγμιότυπα τοπικής πύλης (Local Gateway – L-GW) VNF (π.χ., εναλλακτικά στιγμιότυπα VNF με PGW μικρής κλίμακας), πάνω από το FNC. Θεωρείται ότι τα VNF L-GW έχουν τη δυνατότητα να εκφορτώνουν επιλεκτικά την κυκλοφορία IP προς συγκεκριμένα δίκτυα, όπως καθορίζεται από τις πολιτικές των φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα μιας κατανεμημένης αρχιτεκτονικής cloud, τα L-GW VNF μπορούν να δημιουργηθούν σε cloudlets κοντά στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης προκειμένου να επιτευχθεί αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου, ομοίως με την έννοια του Multi-Access Edge Computing που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 3.6 [65].

3.5.3 Πλεονεκτήματα του Anything as A Service

Έστω ένας φορέας δικτύου κινητής τηλεφωνίας (Mobile Network Operator – MNO) πρέπει να αντιμετωπίσει την αυξανόμενη ροή δεδομένων βίντεο. Για το σκοπό αυτό, ο φορέας αυτός σκοπεύει να δημιουργήσει ένα οικονομικά αποδοτικό mobile CDN μέσω

του οποίου τα δημοφιλή βίντεο να αποθηκεύονται με στρατηγική μνήμη (δηλαδή CDNaaS). Ο φορέας θέλει επίσης τα αιτήματα σε δημοφιλή βίντεο να διαχειρίζονται από το δημιουργημένο mobile CDN και η αντίστοιχη ροή βίντεο να εκφορτώνεται σε σημεία εκφόρτωσης της κυκλοφορίας κοντά στο RAN (TOFaaS), για να αποφευχθεί η συμφόρηση των ελάχιστων πόρων του κεντρικού του δικτύου. Ανάλογα με τις στρατηγικές που ακολουθούνται για την τοποθέτηση των βίντεο στο δίκτυο, τεχνικές caching θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά το φόρτο στον πυρήνα του ασύρματου δικτύου.



Εικόνα 29: Η έννοια ANYaaS: (a) η αρχιτεκτονική επιπέδου αφαίρεσης του διαχειριστή υπηρεσιών ANYaaS και (b) ο κύκλος ζωής της διαχείρισης των περιπτώσεων εξυπηρέτησης [66]

Η εικόνα 29 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο ένας εντοπιστής υπηρεσιών (Service Orchestrator) ANYaaS παράγει / αναπτύσσει ένα δίκτυο CDN και ένα δίκτυο εκφόρτωσης κίνησης ως υπηρεσίες. Ενώ η Εικόνα 29α δείχνει το βήμα της

παρακολούθησης των πόρων της υποκείμενης υποδομής του cloud και τη γεωγραφική κατανομή και συμπεριφορά του τελικού χρήστη όσον αφορά στην προβολή βίντεο, η Εικόνα 29b απεικονίζει τον ντετερμινισμό των δύο γραφημάτων στιγμιότυπων υπηρεσιών (Service Instance Graph – SIG) CDN και TOF και την εφαρμογή / εντοπισμό τους μέσω κατάλληλης πλατφόρμας διαχείρισης cloud.

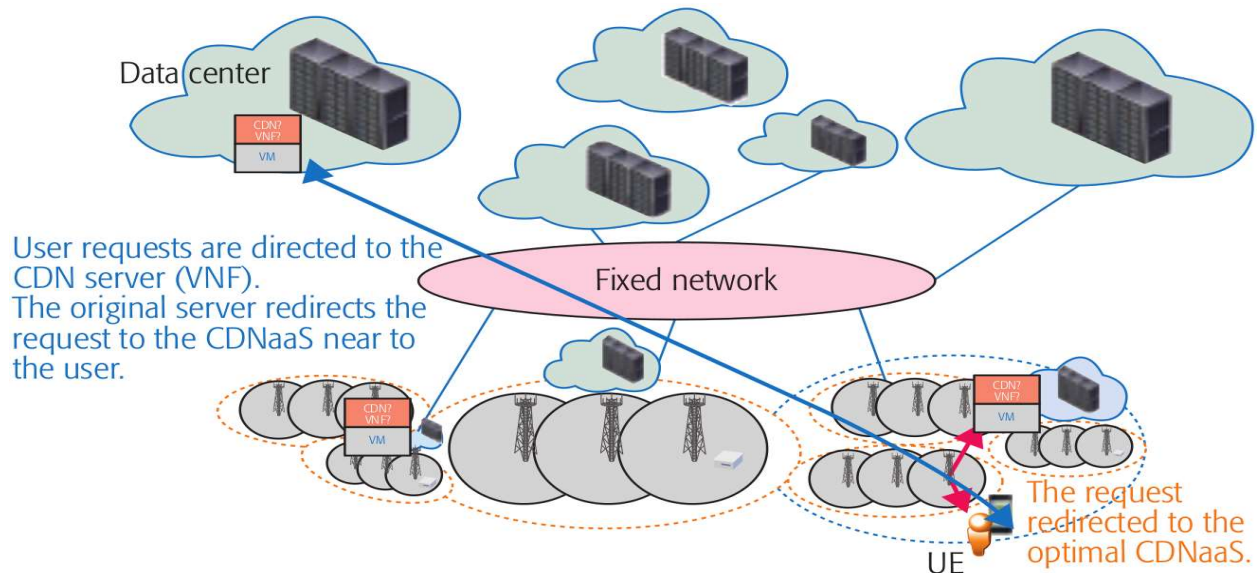
Το ANYaaS SO μπορεί να λαμβάνει ανατροφοδότηση από εργαλεία παρακολούθησης που συγκεντρώνουν δεδομένα σχετικά με την απόδοση και τη διαθεσιμότητα πόρων της υποκείμενης υποδομής του cloud μαζί με τη συμπεριφορά των χρηστών. Οι πληροφορίες σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους και τα πρότυπα συμπεριφοράς των χρηστών χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των προφίλ των χρηστών και της απόδοσης του cloud. Εάν εντοπιστεί μια συγκεκριμένη ροή, που καταναλώνει μεγάλο μέρος των πόρων του δικτύου, το ANYaaS SO μπορεί να ζητήσει από τον διαχειριστή του NFV την δημιουργία μιας υπηρεσίας TOFaaS. Το αίτημα αυτό μπορεί επίσης να αποτελεί συνέχεια μιας ρητής αίτησης του φορέα εκμετάλλευσης βάσει πολιτικών που έχουν ρυθμιστεί εκ των προτέρων στο ANYaaS SO. Το αίτημα μπορεί επίσης να περιλαμβάνει το μοτίβο επισκεψιμότητας, τα προφίλ των χρηστών και τις τοποθεσίες τους στο δίκτυο.

Η ανάπτυξη ενός mobile CDN και των cache του εξαρτάται από τις πολιτικές του φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου και την επιχειρηματική του σχέση με τους παρόχους περιεχομένου. Σχετικά με τον τελευταίο, ένας πάροχος περιεχομένου μπορεί να εγκαταστήσει έναν εξυπηρετητή CDN στον πυρήνα του ασύρματου δικτύου, π.χ. έναν αυτόνομο εξυπηρετητή ή ένα VM που φιλοξενείται στο cloud (βλ. Εικόνα 29). Μέσω της ανακατεύθυνσης του Συστήματος Ονομάτων Τομεών (Domain Name System), όλα τα αιτήματα των χρηστών ανακατευθύνονται στον τοπικό διακομιστή CDN που φιλοξενείται στον πυρήνα του ασύρματου δικτύου. Αν ο διακομιστής έχει το ζητούμενο περιεχόμενο, τότε θα προωθήσει το περιεχόμενο στον χρήστη. Διαφορετικά, θα στείλει το αίτημα στον αρχικό εξυπηρετητή και θα αποθηκεύσει προσωρινά την απάντηση του εξυπηρετητή για μελλοντικά αιτήματα.

Για να δημιουργηθεί ένα CDN SI, το ANYaaS OS ακολουθεί την ίδια διαδικασία όπως και για τη δημιουργία ενός στιγμιότυπου υπηρεσίας TOF, κάνοντας κάποιες σημαντικές εκτιμήσεις. Για παράδειγμα, το μέγεθος αποθήκευσης είναι πιο σημαντικό στο CDNaaS σε σχέση με το TOFaaS δεδομένου ότι έχει αντίκτυπο στο συνολικό μέγεθος του περιεχομένου βίντεο που μπορεί να αποθηκεύσει ένα συστατικό στιγμιότυπου υπηρεσίας (Service Instance Component – SIC) CDNaaS. Η εικόνα 30 δείχνει ένα παράδειγμα ενός CDN SI, όπου οι αιτήσεις των χρηστών ανακατευθύνονται στο πλησιέστερο CDNaaS SIC.

Με βάση τη δημοτικότητα του περιεχομένου και τη γεωγραφική κατανομή του, το ANYaaS OS μπορεί να καθορίσει τις τοποθεσίες όπου πρέπει να αναπτυχθούν τα CDNaaS SIC. Στη συνέχεια, ο αρχιτέκτονας NFV δημιουργεί το CDNaaS SI χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα ρυθμίσεων. Με βάση τον αριθμό των θέσεων τις οποίες που λαμβάνει υπόψη το CDNaaS SI για την ανάπτυξη, ο περιγραφέας CDNaaS καθορίζει τον αριθμό των VNF προς ανάπτυξη, τη διαμόρφωσή τους, και την τοποθέτησή τους στο ομοσποδιακό νέφος. Ο περιγραφέας υποδεικνύει επίσης το λογισμικό CDN που θα χρησιμοποιηθεί για τα CDNaaS VNF. Στη συνέχεια, ο διαχειριστής της εικονικής υποδομής (Virtual Infrastructure Manager – VIM) παράγει τα VM και δημιουργεί τον διαχειριστή CDNaaS για να χειριστεί τα διαφορετικά CDNaaS SIC. Ο διαχειριστής παρακολουθεί τα CDNaaS SIC και κάνει αυτές τις πληροφορίες διαθέσιμες στο ANYaaS SO έτσι ώστε το τελευταίο να μπορεί να αντιδράσει (προς τα πάνω ή προς τα κάτω κλιμάκωση) σε οποιαδήποτε αλλαγή στην κυκλοφορία δικτύου ή στην αποτυχία ενός VM. Τέλος, τα VMs διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας κατάλληλης τεχνολογίας SDN δημιουργώντας ένα ιεραρχικό CDN, δηλαδή εάν ένα

CDNaaS SIC δεν έχει το περιεχόμενο, μπορεί να το ζητήσει από ένα άλλο CDNaaS SIC πριν το ζητήσει από τον κεντρικό διακομιστή CDN. Μόλις ενεργοποιηθούν τα CDNaaS SIC, ο διακομιστής CDN ενημερώνεται προκειμένου να λάβει τα νέα CDNaaS SIC κατά την εξυπηρέτηση των μελλοντικών αιτημάτων των χρηστών, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 30.

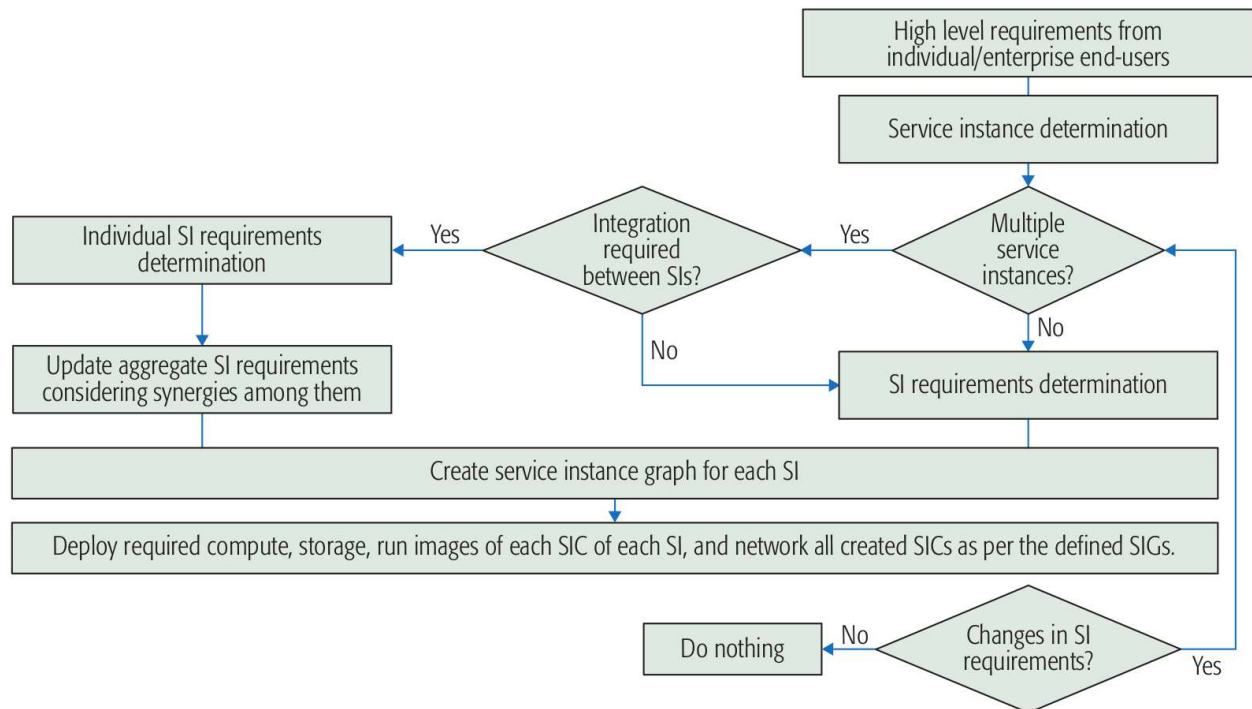


Εικόνα 30: Το CDNaaS εν ώρα δράσης [66]

Έστω η περίπτωση κατά την οποία ένας φορέας κινητής τηλεφωνίας λαμβάνει αίτημα για τη ροή ζωντανών εκδηλώσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή που στοχεύει σε συγκεκριμένο πληθυσμό χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Μια τέτοια περίπτωση χρήσης μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα τοπικό γεγονός, π.χ. μια μουσική συναυλία που δεν μεταδόθηκε στην τηλεόραση. Αυτή η περίπτωση χρήσης είναι διαφορετική από τη περίπτωση χρήσης CDNaaS που παρουσιάστηκε παραπάνω, καθώς δεν υπάρχει συμφωνία με έναν πάροχο περιεχομένου και συνεπώς δεν απαιτείται κάποιος κεντρικός διακομιστής CDN. Επιπλέον, τα cache πρέπει να τοποθετούνται προσεκτικά πάνω από το ομοσπονδιακό νέφος. Το κόστος από την άποψη της διαδρομής επικοινωνίας στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεν είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση της θέσης ενός cache από το eNodeB [67]. Το κόστος είναι μάλλον μια κυρτή συνάρτηση της σχετικής απόστασης των θέσεων των κρυφών μνήμων ως προς τα eNodeB. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα, η τοποθέτηση ενός cache σε απόσταση δύο αλμάτων (Hop) από ένα eNB και η σύνδεσή της με ένα L-GW αποτελεί την καλύτερη λύση. Συνεπώς, αυτή η περίπτωση χρήσης απαιτεί το σχηματισμό CDNaaS και TOFaaS SIG μαζί για να βελτιστοποιηθεί η τοποθέτηση του cache.

Μία από τις κύριες προκλήσεις σε αυτή την περίπτωση αφορά στην ενορχήστρωση και των δύο στιγμιότυπων υπηρεσιών, δηλαδή ποια υπηρεσία πρέπει να κατασκευαστεί πρώτα ή αν η ενορχήστρωση θα πρέπει να δημιουργήσει και τις δύο περιπτώσεις υπηρεσίας με ατομικό τρόπο. Αφού λάβει ένα αίτημα από έναν πάροχο περιεχομένου, το ANYaaS SO στέλνει μια ειδοποίηση στον ενορχηστρωτή του NFV για την κατασκευή των αντίστοιχων CDN και TOF SI. Το ANYaaS SO υποδεικνύει ότι απαιτούνται πολλαπλές SI και απαιτείται αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των SI. Η αλληλεπίδραση SI αποφασίζεται από το ANYaaS σύμφωνα με κάποια λογική ή υποδεικνύεται ρητά από τον πάροχο περιεχομένου ή τον φορέα εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. Στη

συνέχεια, ο ενορχηστρωτής του NFV χρησιμοποιεί τον περιγραφέα υπηρεσίας για να υποδείξει τη δημιουργία ενσωματωμένων υπηρεσιών CDNaas και TOFaas.



Εικόνα 31: ANYaaS SO ψευδο-αλγόριθμος για να αποφασίσει εάν θα δημιουργηθούν από κοινού ή ξεχωριστά SIG [66]

Το πιο κρίσιμο βήμα γίνεται στον περιγραφέα και τη διαμόρφωση της υπηρεσίας όπου αποφασίζεται η τοποθέτηση του SIC στο ομοσπονδιακό σύννεφο. Ο αλγόριθμος τοποθέτησης SIC αρχίζει με τον προσδιορισμό του πού θα τοποθετηθεί το TOFaas SIC ώστε να μεγιστοποιεί την κάλυψη των χρηστών που θα ενδιαφέρονται για το περιεχόμενο. Επιπλέον, τα L-GW θα πρέπει να είναι, σε γενικές γραμμές, σε κατάλληλη απόσταση από τους κόμβους RAN ώστε να βελτιστοποιείται το δίκτυο [67]. Με την δημιουργία του TOFaas SI, τα CDNaas SIC τοποθετούνται κοντά στα L-GW SIC. Μετά από αυτό, ο ενορχηστρωτής του NFV δημιουργεί το χάρτη SIG και στέλνει αίτημα στο VIM προκειμένου να αναπτύξει το SI σύμφωνα με αυτό το χάρτη.

Το VIM εφαρμόζει τα VM για να φιλοξενήσει τις διαφορετικά SIC των δύο TOFaas, και τα CDNaas SI δημιουργούν τους διαχειριστές SI που είναι υπεύθυνοι για τον κύκλο ζωής των δύο SIs. Ο διαχειριστής SI στέλνει τις πληροφορίες παρακολούθησης στο ANYaaS SO, το οποίο μπορεί να ζητήσει να αλλάξει την απαίτηση SI εάν η τοποθέτηση SI δεν είναι αποτελεσματική. Για παράδειγμα, εάν η QoE των χρηστών είναι χαμηλότερη λόγω του γεγονότος ότι το SIG δεν είναι βέλτιστο, δηλαδή τα SI δεν έχουν τοποθετηθεί στις βέλτιστες θέσεις ή οι χρήστες έχουν αλλάξει θέση. Η Εικόνα 31 συνοψίζει τον ψευδο-αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί εάν θα σχηματιστούν από κοινού ή ξεχωριστά SIGs.

3.6 Multi-access Edge Computing

Το Multi-access Edge Computing (MEC) – πρώην Mobile Edge Computing – είναι ένα αναδυόμενο οικοσύστημα που στοχεύει στη συνένωση των τηλεπικοινωνιακών

υπηρεσιών και των υπηρεσιών IT, παρέχοντας μια πλατφόρμα υπολογιστικού νέφους στα άκρα του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Το MEC προσφέρει αποθηκευτικούς και υπολογιστικούς πόρους στα άκρα, μειώνοντας την καθυστέρηση για τους τελικούς χρήστες κινητής τηλεφωνίας και αξιοποιώντας αποτελεσματικότερα το mobile backhaul και τα δίκτυα πυρήνα.

Ο στόχος του ETSI MEC Industry Specification Group είναι να δημιουργηθεί ένα ανοικτό περιβάλλον μεταξύ όλων των πλατφορμών νέφους πολλαπλών παρόχων που βρίσκεται στο άκρο του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, το οποίο να είναι προσβάσιμο από τους παρόχους εφαρμογών / υπηρεσιών και τρίτων οντοτήτων, σε μια προσπάθεια να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με τα εντατικοποιημένα περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους υπό την έννοια της καθυστέρησης και της διασφάλισης υψηλότερων ταχυτήτων [68]. Μεταφέροντας τις εργασίες μεγάλου πλήθους δεδομένων στο άκρο και επεξεργάζοντας τα δεδομένα τοπικά ως προς τη θέση των χρηστών, οι φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων μπορούν να μειώσουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση στα δίκτυα πυρήνα και στο backhaul, ενώ παράλληλα βοηθούν στην εκφόρτωση βαρέων υπολογιστικών εργασιών από τον περιορισμένο σε υπολογιστική ισχύ εξοπλισμό των χρηστών (User Equipment) στο άκρο του δικτύου. Γενικά, μια τέτοια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική νέφους αποτελεί μια τεχνολογία πυλώννα για τα αναδυόμενα συστήματα 5G που μετασχηματίζουν τους παλαιούς σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας προσθέτοντάς τους δυνατότητες υπολογιστικού νέφους και ένα περιβάλλον IT στο άκρο του δικτύου.

Το MEC παρέχει δυνατότητες IT και cloud computing στο άκρο του ασύρματου δικτύου πρόσβασης σε κοντινή απόσταση από τους τελικούς χρήστες, προσφέροντας ένα περιβάλλον εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης με υψηλό εύρος ζώνης και πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο σε αναλυτικά στοιχεία συχνότητων και δικτύου. Η χρήση του MEC μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας ευρείας γκάμας νέων εφαρμογών και υπηρεσιών, φέρνοντας την καινοτομία και οδηγώντας σε νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Συγκεκριμένα, οι πληροφορίες βάση συμφραζομένων και συγκεκριμένου περιεχομένου, η εγγύτητα και η γνώση της τοποθεσίας μπορούν να δημιουργήσουν ευκαιρίες επιχειρηματικής αξίας, προσφέροντας μια προσαρμοσμένη εμπειρία κινητής ευρυζωνικότητας. Οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν επίσης να επωφεληθούν από το MEC για τη συλλογή περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τους πελάτες όσον αφορά στο περιεχόμενο, την τοποθεσία και τα ενδιαφέροντα, προκειμένου να διαφοροποιήσουν τη λειτουργικότητά τους ή να εισαγάγουν νέες υπηρεσίες ή απλά να χρησιμοποιήσουν αυτές τις πληροφορίες για εμπορικούς σκοπούς.

Το MEC προσφέρει μια ανοιχτή πλατφόρμα στο άκρο του ασύρματου δικτύου, διευκολύνοντας την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών από πολλαπλούς ενοίκους, επιτρέποντας σε εξουσιοδοτημένες τρίτες οντότητες να χρησιμοποιήσουν τις δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας, εισάγοντας νέες υπηρεσίες κατ' απαίτηση με έναν ευέλικτο τρόπο. Οι MNO μπορούν στη συνέχεια να παρέχουν υπηρεσίες cloud και επιπλέον να αποκομίζουν κέρδος από την ευρυζωνική εμπειρία παρέχοντας μια εικόνα του RAN και των συνθηκών του δικτύου σε τρίτους για να διευκολύνουν τις βελτιώσεις των υπηρεσιών. Το MEC μπορεί επίσης να επωφεληθεί από την πανταχού παρούσα κάλυψη των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας για να γίνει ο βασικός παράγοντας για την υποστήριξη υπηρεσιών M2M και IoT που έχουν ωριμάσει αρκετά ώστε να διαμορφώσουν κάθετα τμήματα/υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης ενέργειας, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των έξυπνων πόλεων [68]. Από την επιχειρηματική σκοπιά, το MEC θα πρέπει να επιτρέπει μια αρχιτεκτονική ασφαλούς πλατφόρμας νέφους και θα πρέπει να παρέχει API για να επιτρέψει σε τρίτες οντότητες να την μοιράζονται και να τη χρησιμοποιούν δυναμικά, να εγκαθιστούν και να τροποποιούν εύκολα νέες υπηρεσίες και να αλληλεπιδρούν αποτελεσματικά με το RAN.

3.6.1 Computational Offloading

Η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται σημαντικά στο MEC λόγω της μειωμένης καθυστέρησης και της εγγύτητας με το άκρο του RAN. Ως εκ τούτου, οι χρήστες απολαμβάνουν ταχύτερη εκτέλεση και βελτιωμένη απόδοση. Για τις υπηρεσίες βίντεο, το πιο έντονο υπολογιστικά κομμάτι είναι η κωδικοποίηση. Κατά τη διάρκεια της τηλεδιάσκεψης, όταν μια κινητή συσκευή προσπαθεί να πραγματοποιήσει μια κλήση βίντεο, εκτελείται μια φάση διαπραγματεύσεως για την επιλογή του είδους της διαθέσιμης κωδικοποίησης πριν από την κωδικοποίηση του βίντεο στην κινητή συσκευή και την αποστολή. Μια τέτοια διαδικασία καταναλώνει ενέργεια και μπορεί να χρειαστεί αρκετό χρόνο. Ως λύση, προτάθηκε [69] ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για την εκφόρτωση της υπηρεσίας κωδικοποίησης σε έναν διακομιστή στο άκρο. Μέσω της εκφόρτωσης της κωδικοποίησης εξοικονομείται ενέργεια και μειώνεται η καθυστέρηση στη συνδεσιμότητα εξασφαλίζοντας μια αρκετά καλή ποιότητα βίντεο. Στην περίπτωση της επικοινωνίας M2M, φορητών και άλλων συσκευών IoT, οι εφαρμογές μεγάλων υπολογιστικών απαιτήσεων μπορούν να εκφορτωθούν στο άκρο. Αυτό μπορεί να γίνει με διαχωρισμό των αναγκών της εφαρμογής, εκφορτώνοντας μόνο το μέρος των υπολογισμών στο άκρο.

Ένα σχήμα ομοσπονδιακού νέφους στο άκρο που επικεντρώνεται στις εφαρμογές IoT έχει εξεταστεί [70] με την εισαγωγή της έννοιας του υβριδικού νέφους που διαχωρίζει άψογα τις εφαρμογές στις πλατφόρμες νέφους πυρήνα και άκρου, εκτελώντας λειτουργίες που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση και/ή συστατικά αλληλεπίδρασης χρηστών στο άκρο διατηρώντας ταυτόχρονα ένα κλιμακούμενο νέφος. Ο στόχος είναι να διευκολυνθούν αποτελεσματικά δύο νέες κατηγορίες εφαρμογών:

1. Εσωτερικού εντοπισμού υψηλής ακρίβειας που βασίζεται στη χαμηλή καθυστέρηση.
2. Μια κλιμακούμενη και ανθεκτική παρακολούθηση βίντεο που εξοικονομεί εύρος ζώνης.

Το mobile gaming είναι μια άλλη περιοχή που απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ. Με την εκφόρτωση του τμήματος σύνθεσης γραφικών (Graphics Rendering) από τις κινητές συσκευές στο άκρο, το παιχνίδι μπορεί να γίνει πιο διαδραστικό λόγω της ταχύτερης απόκρισης. Στην περίπτωση παιχνιδιών με πολλούς παίκτες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ισορροπία μεταξύ της εκφόρτωσης και της απόδοσης των πόρων του νέφους, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτωση μιας συγκεκριμένης πλατφόρμας νέφους.

Μια συμπληρωματική υπηρεσία που επωφελείται από τα πλεονεκτήματα του MEC, που ονομάζεται βελτιστοποίηση περιεχομένου με επίγνωση του RAN, μπορεί να ενισχύσει την απόδοση της υπολογιστικής εκφόρτωσης. Η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του RAN και του περιβάλλοντος του χρήστη πριν από την εκφόρτωση μπορεί να βοηθήσει τόσο τη συσκευή όσο και το δίκτυο ώστε να αξιοποιήσουν στο έπακρο τις υπηρεσίες της πλατφόρμας MEC.

3.6.2 Distributed Content Delivery and Caching

Καθώς το περιεχόμενο και ειδικά το βίντεο είναι η πιο δημοφιλής υπηρεσία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, χιλιάδες στοιχεία περιεχομένου βίντεο μεταφορτώνονται καθημερινά στα δίκτυα των παρόχων περιεχομένου. Τέτοιο περιεχόμενο αποθηκεύεται στις κεντρικές βάσεις δεδομένων των παρόχων και κατόπιν μετασχηματίζεται από τη μορφή που είναι αποθηκευμένο στην πηγή σε μια τελική μορφή για την παράδοση, προτού διανεμηθεί σε πολλούς διακομιστές ροής βίντεο εντός διαφορετικών τοποθεσιών δικτύου για περαιτέρω διανομή. Παρά τις προσπάθειες για καλύτερη διανομή

περιεχομένου, αρκετοί χρήστες ενδέχεται να βιώσουν διακοπές στις υπηρεσίες βίντεο εξαιτίας προβλημάτων buffering και κολλήματα λόγω έλλειψης περιεχομένου στην εγγύτητα των τελικών χρηστών, ειδικά σε περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών. Η παροχή κατανεμημένου caching μέσω της επέκτασης των υπηρεσιών CDN προς το άκρο του δικτύου κινητής τηλεφωνίας μπορεί να βελτιώσει την εμπειρία χρήσης των τελικών χρηστών, μειώνοντας παράλληλα τη χρήση του backhaul και του πυρήνα του δικτύου.

3.6.3 Application-Awareness and Content Optimization

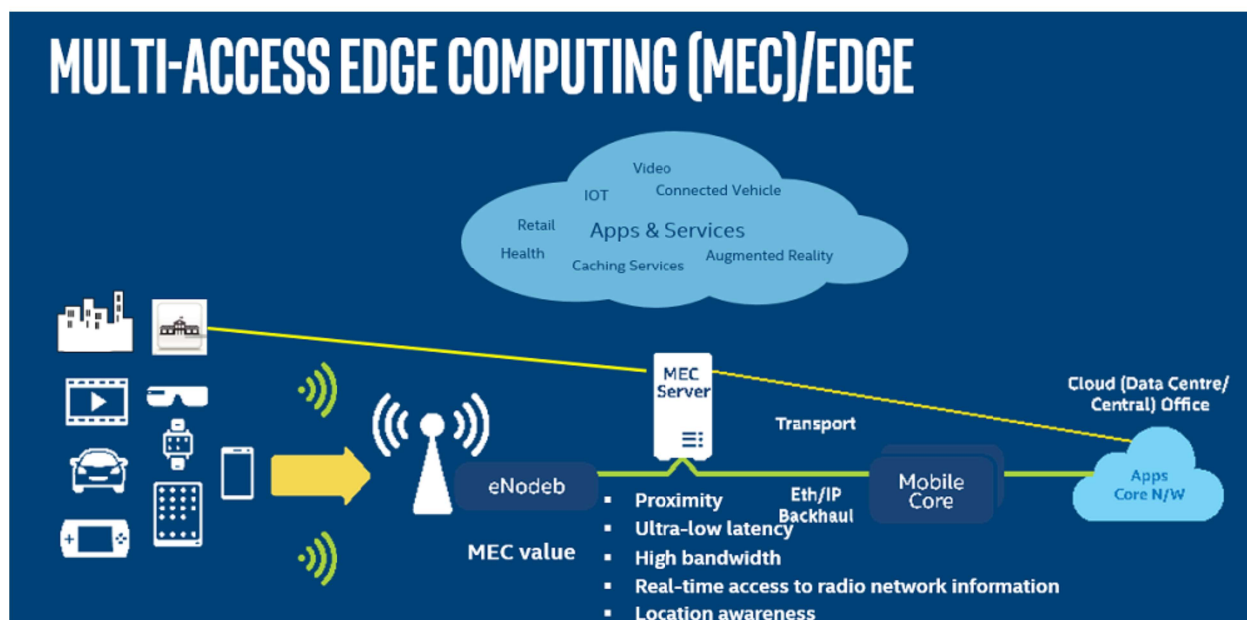
Καθώς η πλατφόρμα MEC βρίσκεται πιο κοντά στο ασύρματο περιβάλλον και στον τελικό χρήστη, μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απόδοση της εφαρμογής. Ειδικότερα, μπορεί να παρέχει επίγνωση για βελτιστοποίηση των επιδόσεων των εφαρμογών σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, μεταβάλλοντας την κωδικοποίηση περιεχομένου ροής εντός του άκρου του δικτύου [71], π.χ., για τη μείωση των κολλημάτων στην αναπαραγωγή βίντεο. Μια τέτοια ενέργεια μπορεί επίσης να λαμβάνει υπόψη τα αναλυτικά στοιχεία του ασύρματου δικτύου σχετικά με την ποιότητα των συνδέσεων, επιτρέποντας τη δυναμική βελτιστοποίηση περιεχομένου για τη βελτίωση της εμπειρίας χρήσης και την αποδοτικότητα των πόρων του δικτύου, π.χ. για την κυκλοφορία TCP.

Μια ροή υψηλής ποιότητας βίντεο μπορεί επίσης να κωδικοποιηθεί στο άκρο για συσκευές με μικρές οθόνες που δεν μπορούν να επωφεληθούν από υψηλή ποιότητα. Εναλλακτικά, ένα βίντεο μπορεί να τεθεί σε παύση όταν δεν υπάρχουν αλλαγές στα καρέ, π.χ. CCTV, εξοικονομώντας έτσι πόρους του δικτύου. Για εξοικονόμηση ενέργειας σε εξοπλισμό ασύρματης επικοινωνίας, το MEC μπορεί να ρυθμίσει απότομες αλλαγές δεδομένων που σχετίζονται με μη κρίσιμες εφαρμογές και να συντονίσει τη μετάδοσή τους με τους χρόνους αφύπνισης των σημείων πρόσβασης.

Μια άλλη πτυχή της επίγνωσης των εφαρμογών και της βελτιστοποίησης του περιεχομένου είναι ο αντίκτυπος των κοινωνικών δικτύων ως πολύτιμων αισθητήρων της ανθρώπινης δραστηριότητας [72]. Οι πληροφορίες που προέρχονται από κοινωνικά δίκτυα μπορούν να είναι χρήσιμες για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων για συγκεκριμένες εφαρμογές με βάση την υποδεικνυόμενη δημοτικότητα σε μια συγκεκριμένη περιοχή ή την προοπτική δημιουργίας κοινωνικών ομάδων, π.χ. σε πανεπιστημιακές πανεπιστημιούπολεις. Τα προσωπικά σύννεφα [73], δημιουργούν ένα στιγμιότυπο στο επίπεδο του hypervisor που επιλέγει τους κατάλληλους πόρους σε μια πλατφόρμα ομοσπονδιακού νέφους που ταιριάζει καλύτερα στο συγκεκριμένο περιβάλλον και στη χρήση. Οι πληροφορίες τοπικών μεταφορών δεδομένων μπορούν επίσης να βοηθήσουν στο προληπτικό caching ή στη διαθεσιμότητα εφαρμογών σε συγκεκριμένες πλατφόρμες MEC με βάση τη γνώση της πυκνότητας των χρηστών. Σε περιστασιακά γεγονότα, για παράδειγμα αθλητικά πρωταθλήματα, ορισμένες εφαρμογές και περιεχόμενο βίντεο μπορούν να αποθηκευτούν σε μια τοπική πλατφόρμα MEC, παρέχοντας υπηρεσίες αναπαραγωγής βίντεο κατά απαίτηση [74]. Η επεξεργασία βίντεο στην πλατφόρμα MEC μπορεί επίσης να βοηθήσει στην απομάκρυνση συγκεκριμένου περιεχομένου βίντεο από δεδομένα που έχουν μεταφορτωθεί απευθείας από χρήστες βάσει των πολιτικών ρύθμισης.

Το online gaming μπορεί επίσης να επωφεληθεί από την υποβοηθούμενη επίγνωση των εφαρμογών MEC για να εξασφαλίσει υψηλό εύρος ζώνης και αυστηρή καθυστέρηση παράλληλα με μια κατ' απαίτηση ισχυρή μηχανή παιχνιδιών πολλαπλών παικτών όσον αφορά στην επεξεργασία και την αποθήκευση. Ειδικότερα, αποκτά δυναμική το thin client gaming, π.χ. Nvidia Shield και Valve Steam, όπου η επεξεργασία και η εκτέλεση

του παιχνιδιού γίνεται σε απομακρυσμένο νέφος ενώ μια ροή, δηλαδή ήχος και βίντεο, αποστέλλεται στο χρήστη. Η MEC μπορεί να προσφέρει τα παίγνια ως υπηρεσία (Gaming as a Service – GaaS) μέσω της ύπαρξης μιας υπηρεσίας full-stack gaming, δηλαδή OS, middleware, δεδομένα και εφαρμογή, τα οποία μπορούν να απολαμβάνουν οι χρήστες μέσω συνδρομής. Αυτό διευκολύνει την πρόσβαση των χρηστών σε παιχνίδια ανεξάρτητα από το υλικό και το λογισμικό των συσκευών τους, παρέχοντας την ευκαιρία για μια τεράστια ποικιλία on-line παιχνιδιών με χαμηλότερο κόστος.



Εικόνα 32: Multi-access Edge Computing [75]

4. ON-DEVICE VIDEO CACHING

4.1 Εισαγωγή

Παράλληλα με τις πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών, ένας διαρκώς αυξανόμενος αριθμός χρηστών κινητής τηλεφωνίας προσελκύεται συνεχώς για να απολαύσει μια πληθώρα υπηρεσιών πολυμέσων χρησιμοποιώντας smartphone και tablet. Ενώ η ζήτηση για πλούσιο περιεχόμενο πολυμέσων έχει αυξηθεί τρομερά τα τελευταία χρόνια, η χωρητικότητα του ασύρματου συνδέσμου, του ασύρματου δικτύου, του mobile backhaul και του πυρήνα του ασύρματου δικτύου δεν μπορεί να αντιμετωπίσει την εκρηκτική αύξηση της κινητής τηλεφωνίας λόγω του κεντρικού χαρακτήρα των αρχιτεκτονικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας [76]. Πράγματι, παρά τις συνεχείς προσπάθειες των MNO και των προμηθευτών δικτυακού εξοπλισμού να αυξήσουν το εύρος ζώνης ασύρματης ζεύξης, υιοθετώντας εξελιγμένες τεχνικές τόσο στο φυσικό επίπεδο (PHY) όσο και στα επίπεδα MAC και 4G-LTE Advanced, όπως η χρήση MIMO, η συνάθροιση φερόντων (Carrier Aggregation) και η συντονισμένη το CoMP, η αποδοτικότητα χρήσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος φθάνει ξεκάθαρα στο θεωρητικό της όριο.

Παρατηρώντας το πρόβλημα της υπερβολικής αύξησης της κυκλοφορίας, έχουμε συμπεράνει πως ένα σημαντικό μέρος της κυκλοφορίας περιεχομένου πολυμέσων εντός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας οφείλεται σε διπλές λήψεις μερικών δημοφιλών περιεχομένων (π.χ. δημοφιλή μουσικά βίντεο) με μεγάλα μεγέθη [77], [78], [79]. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές και οι μηχανικοί διερευνούν αποτελεσματικούς τρόπους μείωσης των πολλαπλών μεταδόσεων του ίδιου περιεχομένου υιοθετώντας έξυπνες στρατηγικές αποθήκευσης cache μέσα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και επιτρέποντας στους χρήστες των κινητών να έχουν πρόσβαση σε δημοφιλές περιεχόμενο από τα cache των κοντινών πυλών των MNO. Από την οπτική γωνία των παρόχων υπηρεσιών Ίντερνετ (Internet Service Provider – ISP), αυτό βοηθά επίσης στη μείωση της κυκλοφορίας που πραγματοποιείται εντός και μεταξύ διαφορετικών ISP [78], καθώς και στη σημαντική μείωση του χρόνου απόκρισης που απαιτείται για την ανάκτηση ενός αρχείου περιεχομένου. Έτσι, μπορεί να εξαλειφθεί ο αντίκτυπος των δυναμικών της κίνησης εντός του διαδικτύου στην ποικιλία της καθυστέρησης απόκρισης.

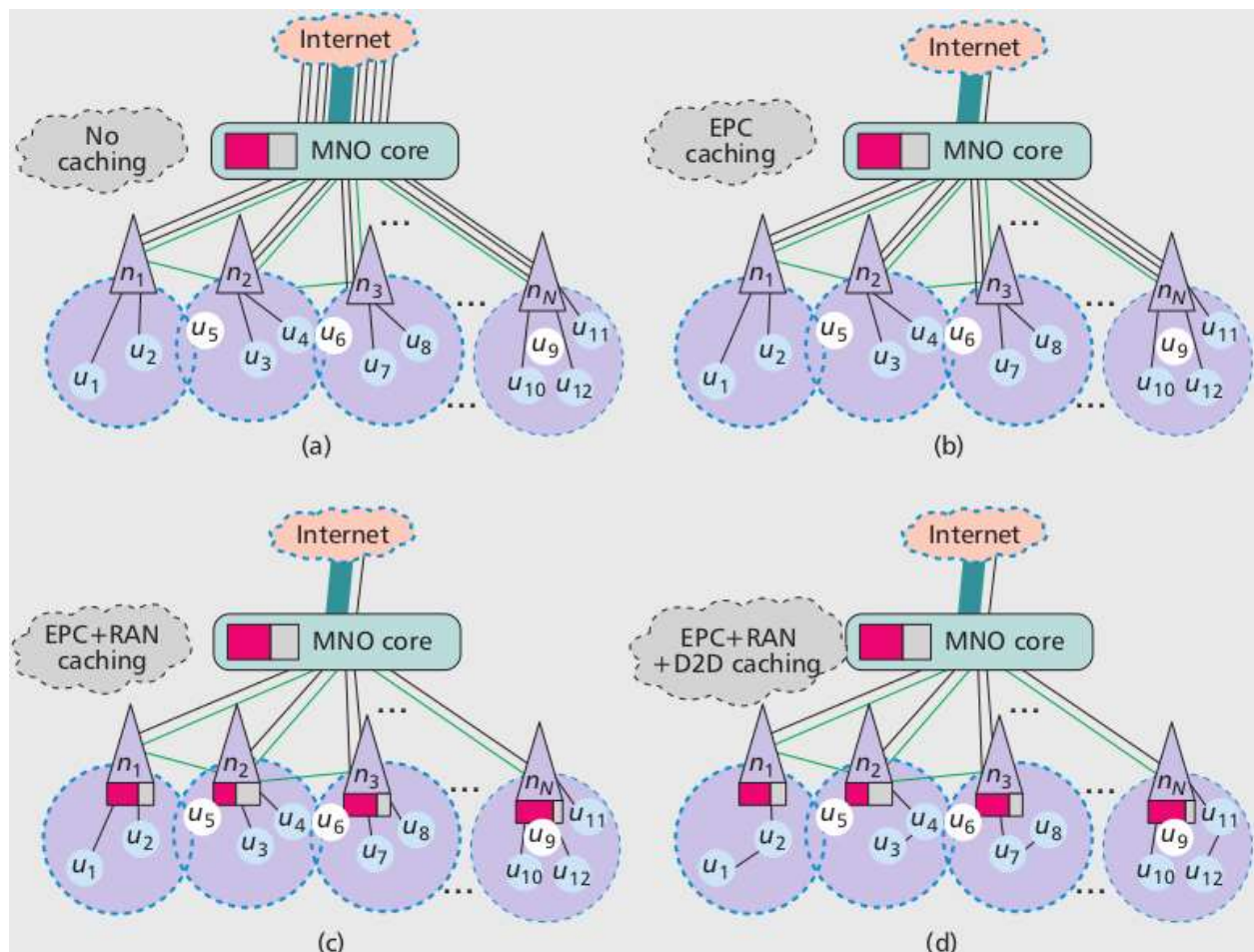
Επιπλέον, η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης μέσω της έξυπνης αποθήκευσης του δημοφιλέστερου περιεχομένου ενισχύει την ενεργειακή απόδοση των δικτύων 4G συμβάλλοντας αποτελεσματικά στην εξέλιξη των πράσινων δικτύων 5G. Η προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G και 4G-LTE έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να μειώσει την κίνηση εντός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας κατά ένα τρίτο ως δύο τρίτα [78], [79].

Μέχρι στιγμής, στα κυψελωτά δίκτυα έχει προταθεί το caching στον εξελιγμένο πυρήνα πακέτων (EPC) ο οποίος, μεταξύ πολλών άλλων κόμβων, αποτελείται από την πύλη εξυπηρέτησης (S-GW) και την πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων (P-GW), καθώς και το caching στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης (RAN) το οποίο αποτελείται από τα eNodeB και από σημεία πρόσβασης που δεν ανήκουν στον εξοπλισμό του 3GPP όπως τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi και οι σταθμοί βάσης Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Δηλαδή όλες οι προτάσεις για το μέρος που θα πραγματοποιηθεί το caching περιλαμβάνουν το άκρο του ασύρματου δικτύου πρόσβασης και αποτελούν μέρος του MEC.

Το μέγεθος του περιεχομένου που αποκτάται από τους παρόχους περιεχομένου αυξάνεται σημαντικά και είναι επομένως αδύνατο να αποθηκευτεί ολόκληρο το περιεχόμενο στο cache. Οπότε, είναι σημαντικό να αποφασιστεί ποιο περιεχόμενο θα αποθηκευτεί στο cache λαμβάνοντας υπόψη τη δημοτικότητα του περιεχομένου. Στην

πράξη μόνο ένα μικρό μέρος του δημοφιλούς περιεχομένου προσπελαύνεται από ένα μεγάλο πλήθος χρηστών κινητής τηλεφωνίας, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του περιεχομένου των CP παραμένει μη δημοφιλής [78], [79].

Οι πολιτικές αποθήκευσης περιεχομένου, δηλαδή η λήψη απόφασης σχετικά με το τι να αποθηκευτεί και για πόσο χρόνο, είναι καθοριστικής σημασίας για τη συνολική απόδοση του caching. Είναι ουσιαστικά σημαντικό να εκτιμηθεί το όφελος πίσω από ένα περιεχόμενο, αξιολογώντας τη σημερινή δημοτικότητα του, τη δυνητική δημοτικότητα, το μέγεθος αποθήκευσης και τις τοποθεσίες των υφιστάμενων αντιγράφων του πάνω από την τοπολογία του δικτύου. Αντίθετα με την υιοθέτηση παραδοσιακών πολιτικών προσωρινής αποθήκευσης, όπως οι LRU, LFU και FIFO, είναι δύσκολο να σχεδιάσουμε συνεργατικές πολιτικές προσωρινής αποθήκευσης για το caching στα EPC και RAN ώστε να κάνουμε τη χρήση και την ύπαρξη του cache πιο αποδοτική.



Εικόνα 33: Σύγκριση των (a) no caching; (b) EPC caching; (c) EPC + RAN caching; (d) EPC + RAN + D2D Caching [81]

Ο φόρτος της ασύρματης σύνδεσης μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με τη χρήση τεχνικών τοπικής προσωρινής αποθήκευσης και κοινής χρήσης, όπως από συσκευή σε συσκευή (D2D). Μέσω του D2D, οι χρήστες του ασύρματου δικτύου μπορούν να χρησιμοποιούν εύρος ζώνης εγκεκριμένο από τον φορέα υπηρεσίας για την άμεση επικοινωνία των συσκευών τους χωρίς την υποστήριξη της επικοινωνίας τους από κάποια υποδομή, ώστε να μπορούν να αποθηκεύουν περιεχόμενο στις συσκευές τους και να το μοιράζονται άμεσα με τους φίλους τους [80]. Στην Εικόνα 33 φαίνεται αναλυτικά το πλεονέκτημα του συνδυασμού των παραπάνω τεχνικών caching.

4.2 On-device caching

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η διαδικασία του caching μπορεί να γίνει σε διάφορα επίπεδα του δικτύου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επικεντρωνόμαστε στη διαδικασία του D2D caching και πιο συγκεκριμένα στο on-device caching, όπου κάποια συσκευή που συνδέεται στο διαδίκτυο αποθηκεύει τοπικά είτε ολόκληρο είτε ένα μέρος του περιεχομένου που ζητήθηκε από το χρήστη της. Μέσω του on-device caching, ένας χρήστης κατά την πλοήγησή του στο διαδίκτυο, είτε μέσω κάποιας εφαρμογής web browser που επιτρέπει την πρόσβαση σε πολλαπλές διαδικτυακές υπηρεσίες, είτε μέσω κάποιας web εφαρμογής που εξυπηρετεί αιτήματα από και προς συγκεκριμένη διαδικτυακή υπηρεσία (π.χ. YouTube Android/iOS APP), μπορεί να αποθηκεύει στη συσκευή του ένα μέρος του περιεχομένου που λαμβάνει. Αυτό το περιεχόμενο μπορεί να παραμείνει αποθηκευμένο στη συσκευή για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα κριθεί απαραίτητο, ανάλογα με το είδος του περιεχομένου, το μέγεθός του, το σκοπό για τον οποίο πραγματοποιήθηκε η αποθήκευσή του, τη χωρητικότητα της συσκευής, κλπ.. Δηλαδή, πρέπει να δομηθεί μια πολιτική – αλγόριθμός για τη διαδικασία του on-device caching.

Η παραπάνω διαδικασία θα έχει οφέλη τόσο για τους τελικούς χρήστες, όσο και για τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών δικτύων αλλά και για τις υπηρεσίες παροχής ψηφιακού περιεχομένου. Πιο συγκεκριμένα, οι τελικοί χρήστες των υπηρεσιών παροχής περιεχομένου θα έχουν ταχύτερη πρόσβαση σε δημοφιλές περιεχόμενο. Ένας χρήστης, έχοντας ήδη αποθηκευμένο ένα τμήμα του περιεχομένου στη συσκευή του, δε θα πραγματοποιήσει εκ νέου λήψη ολόκληρου του περιεχομένου, αφού ένα μέρος του είναι έχει ήδη ληφθεί και είναι άμεσα διαθέσιμο. Αντιθέτως, θα χρειαστεί αποκλειστικά η λήψη του μη αποθηκευμένου τμήματος, το οποίο σίγουρα θα αποτελεί πληροφορία μικρότερου μεγέθους από το συνολικό μέγεθος του περιεχομένου. Οπότε, η λήψη θα διαρκέσει λιγότερο χρόνο, επιταχύνοντας την προβολή του περιεχομένου, βελτιώνοντας την εμπειρία χρήσης.

Μέσω του D2D caching μπορεί να υπάρχει άμεση επικοινωνία των συσκευών των τελικών χρηστών των δικτύων και να μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσος διαμοιρασμός της αποθηκευμένης πληροφορίας από μία συσκευή σε μια άλλη συσκευή. Δηλαδή, το τμήμα του ψηφιακού περιεχομένου που αιτείται ένας τελικός χρήστης μπορεί να είναι αποθηκευμένο στη συσκευή ενός άλλου τελικού χρήστη στο ίδιο τοπικό δίκτυο, το οποίο σημαίνει ότι ο πρώτος μπορεί να το λάβει το αιτούμενο περιεχόμενο από τον δεύτερο και αποφεύγει την άσκοπη επικοινωνία με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή. Αν για παράδειγμα η συσκευή Α έχει αποθηκεύσει ένα τμήμα ενός video stream από κάποια υπηρεσία video streaming και η συσκευή Β εντός του ίδιου δικτύου ζητήσει την προβολή του συγκεκριμένου video από την ίδια υπηρεσία, τότε η συσκευή Α θα μπορέσει να μεταβιβάσει το αποθηκευμένο τμήμα του video stream της στη συσκευή Β άμεσα, διαδικασία που απαιτεί ελάχιστο χρόνο σε σχέση με τη λήψη ολόκληρου του video stream από την υπηρεσία. Οπότε, θα υπάρξει μια σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου που θα χρειαστεί για την λήψη του video stream, άρα και για την προβολή του video στη συσκευή Β, βελτιώνοντας την εμπειρία χρήσης. Αυτή η διαδικασία μεταφοράς τμημάτων ψηφιακού περιεχομένου μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταξύ όλων των συσκευών στο ίδιο τοπικό δίκτυο.

Όσον αφορά στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, μέσω του on-device caching θα μειωθεί κατά ένα σημαντικό ποσοστό η χρήση του εύρους ζώνης που απαιτείται από τους χρήστες για τη λήψη περιεχομένου από το διαδίκτυο. Ως εκ τούτου, το δίκτυο κάθε παρόχου θα μπορεί να εξυπηρετήσει καλύτερα το ίδιο πλήθος χρηστών

με πριν ή ενδεχομένως ένα αυξημένο πλήθος χρηστών στο μέλλον, αφού με την εξοικονόμηση μέρους του εύρους ζώνης η παροχή περιεχομένου θα γίνεται γρηγορότερα και με λιγότερες καθυστερήσεις, βελτιώνοντας την εμπειρία χρήσης των χρηστών κατά τη διάρκεια της συνδρομής τους στο δίκτυο. Οπότε, οι χρήστες δε θα νιώσουν την ανάγκη να αλλάξουν πάροχο υπηρεσιών δικτύου και επιπλέον δε θα απαιτείται απαραίτητα η εγκατάσταση νέου εξοπλισμού/υλικού προκειμένου να βελτιωθεί η διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου μειώνοντας έτσι το συνολικό χρηματικό κόστος βελτίωσης του δικτύου. Τα παραπάνω μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση των κερδών των παρόχων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

Οι πάροχοι ψηφιακού περιεχομένου μπορούν επίσης να επωφεληθούν από το on-device caching, αφού λόγω του διαμοιρασμού περιεχομένου τοπικά, μειώνεται το πλήθος των αιτημάτων για περιεχόμενο προς τους servers της κάθε υπηρεσίας. Οπότε, μέσω του μικρότερου πλήθους αιτημάτων, η εξυπηρέτησή τους ολοκληρώνεται ταχύτερα, βελτιώνοντας έτσι την εμπειρία των χρηστών κατά τη χρήση της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Επιπλέον, η ταχύτερη ολοκλήρωση της εξυπηρέτησης των αιτημάτων, μπορεί να οδηγήσει στο να παραμένουν αδρανείς οι servers των παραπάνω υπηρεσιών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, εξοικονομώντας ηλεκτρικό ρεύμα και μειώνοντας το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης του υπάρχοντος εξοπλισμού των servers. Τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση των κερδών των υπηρεσιών παροχής ψηφιακού περιεχομένου.

Η διαδικασία πραγματοποίησης του on-device caching δεν είναι απλή, υπό την έννοια ότι δεν υπάρχει μοναδικός αλγόριθμος που να την πραγματοποιεί. Τα κριτήρια επιλογής/κατασκευής αλγορίθμου μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του περιεχομένου που αποθηκεύεται, τον μέσο όρο μεγέθους του τύπου περιεχομένου, τον ελεύθερο αποθηκευτικό χώρο της συσκευής, το σκοπό για τον οποίο αποθηκεύεται το περιεχόμενο, δηλαδή το σκοπό της εφαρμογής κλπ.. Οπότε, χρειάζεται κάποιος έξυπνος αλγόριθμος τόσο για τη λήψη περιεχομένου από το διαδίκτυο όσο και για τη διαχείριση των περιορισμένων πόρων της συσκευής.

Για παράδειγμα, έστω ένας αλγόριθμος on-device caching που επικεντρώνεται στο δημοφιλές περιεχόμενο. Ο αλγόριθμος αυτός θα μπορούσε, σε μια απλή του μορφή να λειτουργεί αρχικά ως web crawler και να αναζητά στον ιστό δημοφιλές περιεχόμενο βάσει του τι είναι δημοφιλές τη στιγμή της αναζήτησης. Μια πιο “έξυπνη” μορφή του αλγορίθμου θα μπορούσε να χρησιμοποιεί τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης ώστε να μπορεί να προβλέψει με σχετικά καλή ακρίβεια ποιο από το πρόσφατα ανηρτημένο περιεχόμενο στο διαδίκτυο είναι πιθανότερο να αποκτήσει δημοτικότητα στο μέλλον και/ή να ζητηθεί από το χρήστη ώστε να το αποθηκεύσει εκ των προτέρων. Προφανώς ο αλγόριθμος αυτός θα πρέπει να έχει πρόσβαση στο ιστορικό του χρήστη της συσκευής ώστε να λαμβάνει υπόψιν τη συμπεριφορά και τις συνήθειες του χρήστη της και να συνδυάζει τα δεδομένα αυτά με τη συμπεριφορά όλων των χρηστών στον ιστό για καλύτερα αποτελέσματα.

Γνωρίζοντας ότι η δημοτικότητα οποιουδήποτε περιεχομένου του διαδικτύου μπορεί να αλλάξει δυναμικά με πολύ έντονο ρυθμό, καθώς εξαρτάται από τη διάδραση μεταξύ ενός πλήθους χρηστών του διαδικτύου, ο αλγόριθμος πρέπει να φροντίζει η αποθήκευση του περιεχομένου στη συσκευή να έχει ένα μικρό χρονικό περιθώριο “εγκυρότητας”, διότι είναι πιθανόν εντός ενός μικρού χρονικού διαστήματος από τη στιγμή της αποθήκευσής του το περιεχόμενο να μην είναι πλέον δημοφιλές. Επίσης, οι φορητές συσκευές χαρακτηρίζονται, τουλάχιστον προσωρινώς, από ένα πολύ μικρό μέγεθος αποθηκευτικού χώρου κατά μέσο όρο, που σημαίνει ότι ο αποθηκευτικός χώρος είναι πολύτιμος για το χρήστη της συσκευής καθώς ο πρωταρχικός του ρόλος είναι η αποθήκευση των προσωπικών του δεδομένων. Οπότε, ο αλγόριθμος θα πρέπει να φροντίζει αρχικά να μη καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του ελεύθερου αποθηκευτικού

χώρου αφού ενδέχεται να ζητηθεί ανά πάσα στιγμή από το χρήστη της συσκευής και στη συνέχεια να ανακατανέμει τους πόρους της συσκευής, δηλαδή το χώρο αποθήκευσης, ώστε το πλέον “ξεπερασμένο/παρωχημένο” περιεχόμενο να δίνει τη θέση του σε πιο “φρέσκο” περιεχόμενο, προκειμένου να μη διατηρεί άχρηστο υλικό που ενδέχεται να μη ζητηθεί ποτέ από το χρήστη.

Επίσης, ο αλγόριθμος πρέπει τόσο κατά τη λήψη όσο και κατά την αποθήκευση να λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμένους πόρους της συσκευής, μπαταρία, εύρος ζώνης του μόντεμ, καθώς και τους ενδεχόμενους περιορισμούς του δικτύου ή του πλάνου δεδομένων του συνδρομητή. Για παράδειγμα, αν η συσκευή λειτουργεί με μπαταρία δεν πρέπει να γίνεται σπατάλη ενέργειας χωρίς λόγο, αν η σύνδεση στο διαδίκτυο έχει ογκοχρέωση ή κάποιο περιορισμό στο πλήθος των δεδομένων που μπορούν να μεταφερθούν δεν πρέπει να γίνεται κατάχρηση της σύνδεσης, αν η συσκευή έχει περιορισμένο ελεύθερο αποθηκευτικό χώρο τότε η αποθήκευση πρέπει να γίνεται χωρίς να γεμίζει το ολόκληρο τον αποθηκευτικό χώρο της συσκευής ώστε να μην περιορίζονται οι υπόλοιπες δραστηριότητες του χρήστη της.

Γενικότερα, η αυτοματοποίηση μιας τέτοιας διαδικασίας caching είναι δύσκολη και αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις. Λόγω αυτού γίνεται πολύ έντονη έρευνα πάνω σε αλγορίθμους που θα μπορούν να κάνουν αποδοτικά τη διαδικασία του caching τόσο στο δίκτυο όσο και στις συσκευές των χρηστών. Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε σε εφαρμογές που επιχειρούν το caching video κατ’ απαίτηση του χρήστη της συσκευής.

4.3 Caching περιεχομένου τύπου video σε mobile συσκευές

Όπως γνωρίζουμε όλοι, τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην καθημερινότητα των χρηστών. Για την πιο άμεση και πιο αποτελεσματική αλληλεπίδραση μεταξύ των χρηστών, όλες οι πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης επιτρέπουν το διαμοιρασμό βίντεο τα οποία μπορούν να προέρχονται είτε από κάποιον πάροχο περιεχομένου είτε άμεσα από τους χρήστες. Επίσης, υπάρχουν πλατφόρμες οι οποίες δίνουν στους χρήστες τη δυνατότητα μεταφόρτωσης πρωτότυπου περιεχομένου βίντεο, προκειμένου να διαφημίσουν τον εαυτό τους ή την επιχείρησή τους και/ή να έχουν έσοδα από την προβολή των βίντεο αυτών.

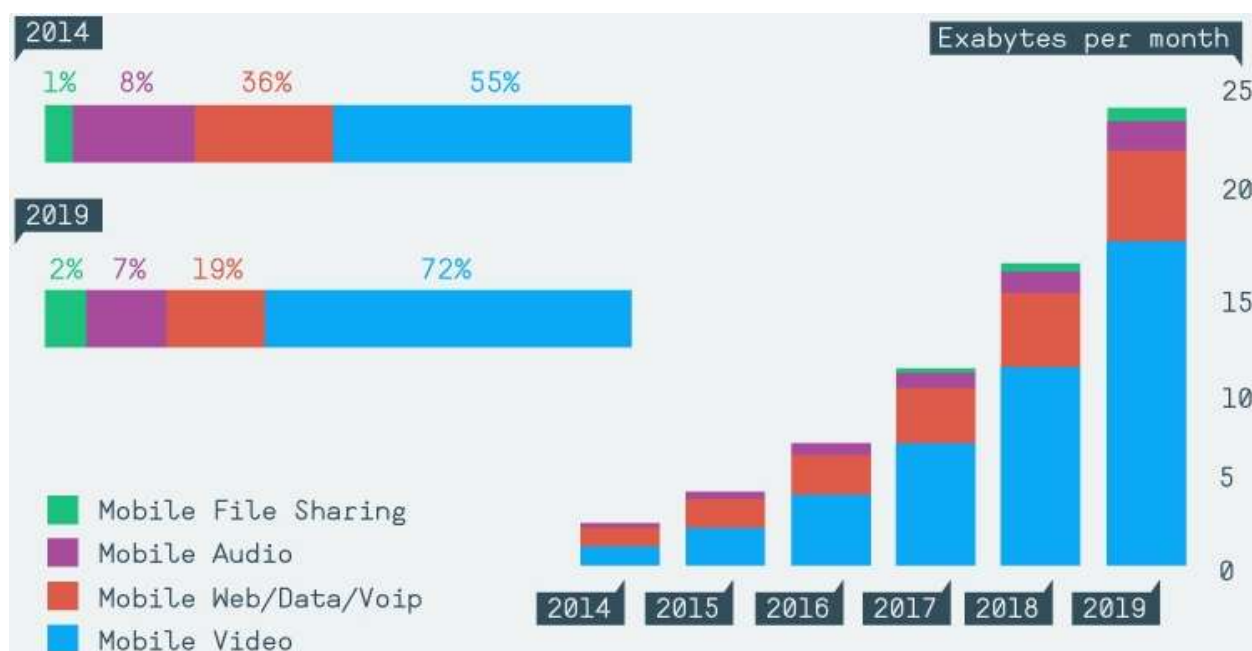
Η Cisco υποστηρίζει [82] πως το 2021, από τη συνολική κίνηση IP στο διαδίκτυο:

1. Το 82% θα αποτελεί μεταφορά περιεχομένου βίντεο.
2. Το 13% θα αποτελεί ζωντανή μετάδοση βίντεο.
3. Το 3.4% θα αποτελεί ζωντανή μετάδοση βίντεο από κυκλώματα παρακολούθησης.
4. Το 26% θα αποτελεί μεταφορά βίντεο για παρακολούθηση τηλεόρασης.
5. Το 71% του περιεχομένου βίντεο θα μεταφέρεται μέσω CDN.
6. Το 17% θα αποτελεί κίνηση μέσω mobile δικτύων.
7. Το 63% θα προέρχεται μέσω “έξυπνων” συσκευών.

Τα παραπάνω στατιστικά οφείλονται κυρίως σε δύο παράγοντες:

1. Στις “έξυπνες” συσκευές
2. Στην κίνηση δεδομένων μέσω των ασύρματων δικτύων

Η Cisco υποστηρίζει επίσης [82] πως το 2021 το πλήθος των συσκευών που θα βρίσκονται συνδεδεμένες σε δίκτυα IP θα είναι τριπλάσιο του πληθυσμού ανθρώπων της Γης την ίδια περίοδο.



Εικόνα 34: Αύξηση του Mobile Video : Το μέλλον είναι στο Mobile [83]

Λόγω του μεγάλου μεγέθους που χαρακτηρίζει το περιεχόμενο τύπου βίντεο, που μπορεί να εκτίνεται από μερικές εκατοντάδες megabyte ως κάποιες δεκάδες gigabyte, σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση της ανάλυσης βίντεο που μπορούν να καταγράψουν οι “έξυπνες” συσκευές των χρηστών, που σήμερα φτάνει το 4K στα 60 FPS, καθώς και της ανάλυσης που υποστηρίζουν τόσο οι φορητές συσκευές όσο και οι σταθερές, που σήμερα φτάνει το 8K UHD (7680 × 4320 progressive scan), αυτό το περιεχόμενο είναι το μόνο που μπορεί να προκαλέσει τεράστια συμφόρηση στα δίκτυα καθώς και μεγάλες καθυστερήσεις και κολλήματα κατά την αναπαραγωγή του στις συσκευές των τελικών χρηστών. Οπότε, το περιεχόμενο τύπου βίντεο αποτελεί το πιο “ελκυστικό” περιεχόμενο για caching καθώς το caching τέτοιου περιεχομένου θα επιφέρει τα μεγαλύτερα οφέλη για το Internet, τους CP, τους MNO, τους ISP και τους τελικούς χρήστες.

Η δημοτικότητα των smartphone και γενικότερα των φορητών συσκευών μικρού μεγέθους έχει αυξηθεί κατακόρυφα κατά την τελευταία δεκαετία, τόσο λόγω της στροφής της βιομηχανίας στην παραγωγή τέτοιων συσκευών οδηγώντας στη μείωση του κόστους της αγοράς τους όσο και λόγω των διευκολύνσεων που προσφέρουν, αφού είναι πολυεργαλεία και όχι απλές συσκευές επικοινωνίας. Ως αποτέλεσμα, ένα πολύ μεγάλο μέρος του πληθυσμού της υψηλίου έχει στην κατοχή του κάποιο smartphone ή tablet ή wearable, τα οποία πλέον αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς τους. Μάλιστα κάποιοι έχουν στην κατοχή τους περισσότερες από μία “έξυπνες” συσκευές.

Επιπλέον, τα λειτουργικά συστήματα των φορητών συσκευών έχουν εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό που πλέον έχουν πολλές λειτουργίες και δυνατότητες. Ωστόσο οι δυνατότητες των συσκευών αυτών δεν περιορίζονται στο λειτουργικό τους σύστημα, αλλά μπορούν να επεκταθούν περαιτέρω μέσω εφαρμογών από τρίτους προγραμματιστές οι οποίες είναι διαθέσιμες προς στους χρήστες των συσκευών μέσω διάφορων πηγών λογισμικού. Ως αποτέλεσμα, μια συσκευή smartphone ή tablet μπορεί πλέον να

αντικαταστήσει έναν υπολογιστή, σταθερό ή φορητό, καλύπτοντας ωστόσο όλες τις ανάγκες του μέσου όρου των χρηστών.

Επίσης, έπειτα από την καθιέρωση των δικτύων ADSL2+ και 4G-LTE Advanced, οι ταχύτητες σύνδεσης στο διαδίκτυο έχουν αυξηθεί σημαντικά, βελτιώνοντας την εμπειρία πλοήγησης, γεγονός που οδήγησε στην ευρύτερη χρήση του διαδικτύου. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω με την καθημερινή παρατήρηση των ανθρώπων γύρω μας, μπορούμε να συμπεράνουμε πως οι περισσότεροι χρήστες του διαδικτύου, κατά κύριο λόγο, πλοηγούνται στον ιστό από το smartphone ή το tablet τους.

Τέλος, οι συσκευές mobile χρειάζονται ιδιαίτερη μεταχείριση σε σχέση με τους υπολογιστές. Λόγω του περιορισμένου αποθηκευτικού τους χώρου, ο οποίος κατά μέσο όρο κυμαίνεται μεταξύ 32GB και 64GB, της μικρής μπαταρίας τους, η οποία κατά μέσο όρο κυμαίνεται μεταξύ 2500mAh και 5000mAh και του υψηλού κόστους της ασύρματης σύνδεσης στο διαδίκτυο μέσω των κυψελωτών δικτύων, η διαδικασία του on-mobile caching έχει αρκετές προκλήσεις αλλά και πολύ σημαντικά οφέλη.

4.4 Υπάρχουσες λύσεις – εφαρμογές και λειτουργικότητα

4.4.1 Πάροχοι υπηρεσιών ροής βίντεο

Όσον αφορά στους παρόχους υπηρεσιών ροής βίντεο, επικεντρωθήκαμε στις πιο δημοφιλείς διεθνείς υπηρεσίες που έχουν ένα σημαντικό πλήθος επισκεπτών – χρηστών σε καθημερινή βάση και να είναι ασφαλείς για τον τελικό χρήστη, παρέχοντας τουλάχιστον ασφαλή σύνδεση HTTPS από προεπιλογή. Κάποιες από αυτές δεν είναι αποκλειστικά υπηρεσίες βίντεο, αλλά προσφέρουν μεταξύ άλλων τη δυνατότητα μεταφόρτωσης και παρακολούθησης βίντεο. Οπότε, οι υπηρεσίες που δοκιμάσαμε είναι οι παρακάτω:

1. YouTube (www.youtube.com)
2. Vimeo (www.vimeo.com)
3. Dailymotion (www.dailymotion.com)
4. Twitch (www.twitch.tv)
5. LiveLeak (www.liveleak.com)
6. Veoh (www.veoh.com)
7. Break (www.break.com)
8. MetaCafe (www.metacafe.com)
9. Facebook (www.facebook.com)
10. Instagram (www.instagram.com)
11. the dodo (www.thedodo.com)
12. BitChute (www.bitchute.com)

Από αυτές, απερρίφθησαν οι Veoh, Break και MetaCafe λόγω μη υποστήριξης HTTPS (το Veoh υποστηρίζει HTTPS αλλά πρώτον δεν το υποστηρίζει από προεπιλογή και δεύτερον η λειτουργία του είναι αρκετά πιο προβληματική σε σχέση με τη λειτουργία του με HTTP), καθώς και οι Twitch και the dodo διότι εφόσον έχουν συγκεκριμένη θεματολογία και δεν είναι περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία βίντεο απευθύνονται σε ένα πολύ περιορισμένο κοινό.

4.4.2 Λειτουργικά συστήματα – πλατφόρμες για mobile συσκευές

Οι πιο διαδεδομένες πλατφόρμες – λειτουργικά συστήματα για φορητές συσκευές είναι οι εξής τρεις:

- Android
- iOS
- Windows 10 Mobile Το Android είναι ένα λειτουργικό σύστημα που ανήκει στην κατηγορία του Ελεύθερου Λογισμικού/Λογισμικού Ανοιχτού Κώδικα και αναπτύσσεται από την Google. Εκτός από τις επίσημες συσκευές της Google, δηλαδή τις συσκευές Pixelbook, Pixel και Nexus, το Android είναι εγκατεστημένο και σε “έξυπνες” συσκευές τρίτων κατασκευαστών. Για την ακρίβεια, οι περισσότερες mobile συσκευές στην αγορά που περιλαμβάνουν τα smartphone, τα tablet, και τα wearable, έχουν εγκατεστημένο το λειτουργικό σύστημα Android. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλο πλήθος διαθέσιμων συσκευών με Android και μάλιστα σε οποιοδήποτε εύρος τιμών.

Το iOS είναι ένα λειτουργικό σύστημα που αναπτύσσεται από την Apple, και βρίσκεται εγκατεστημένο αποκλειστικά στις “έξυπνες” συσκευές της ίδιας. Δεν είναι διαθέσιμο σε συσκευές από άλλους κατασκευαστές, γεγονός που περιορίζει το πλήθος συσκευών σημαντικά. Επίσης οι συσκευές της Apple είναι συσκευές υψηλού κόστους, το οποίο σε συνδυασμό με το μικρό τους πλήθος σημαίνει ότι είναι πιο σπάνιες μεταξύ των καταναλωτών.

Το Windows 10 Mobile είναι ένα λειτουργικό σύστημα που αναπτύσσεται από τη Microsoft. Εκτός από τις επίσημες συσκευές της Microsoft, δηλαδή τις συσκευές Microsoft και Lumia, το Windows 10 Mobile είναι εγκατεστημένο και σε ελάχιστες συσκευές τρίτων κατασκευαστών. Ωστόσο, το πλήθος όλων των συσκευών με εγκατεστημένο το Windows 10 Mobile είναι σημαντικά μικρότερο από το πλήθος των συσκευών που έχουν εγκατεστημένο κάποιο από τα Android/iOS.

Τα λειτουργικά συστήματα iOS και Windows 10 Mobile χαρακτηρίζονται από το μειονέκτημα ότι δεν υπάρχει τρόπος για την εγκατάσταση λογισμικού (APP) εκτός από τα επίσημα APP Store που έρχονται προεγκατεστημένα στις συσκευές αυτές και υποστηρίζονται από τον κατασκευαστή του αντίστοιχου λειτουργικού συστήματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι περιορίζονται οι πηγές λογισμικού και οι επιλογές μας ως προς εφαρμογές που θέλουμε να μελετήσουμε. Λόγω των παραπάνω, αποφασίσαμε να μελετήσουμε εφαρμογές πάνω γραμμένες για το λειτουργικό σύστημα Android. Συγκεκριμένα, η έρευνα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της συσκευής Lenovo Moto G4 XT1622 με λειτουργικό σύστημα Android 7.0 Nougat.

4.4.3 Αποθετήρια – πηγές λογισμικού

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η έρευνά μας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λειτουργικού συστήματος Android και υπό τη μορφή των εφαρμογών που εκτελούν τη λήψη και αποθήκευση βίντεο από παρόχους ροής βίντεο στις συσκευές των χρηστών. Εφόσον οι πάροχοι υπηρεσιών ροής βίντεο δεν επιτρέπουν την άμεση λήψη των βίντεο που προσφέρουν μέσω των υπηρεσιών τους και δεν υπάρχει επίσημος τρόπος για να γίνει κάτι τέτοιο, αναγκαστικά καταφύγαμε σε ανεπίσημους τρόπους πραγματοποίησης της επιθυμητής διαδικασίας. Πραγματοποιήσαμε έρευνα για εφαρμογές οι οποίες κάνουν parse τον HTML κώδικα της σελίδας με το βίντεο του ιστοτόπου ενός παρόχου ροής βίντεο, εξάγουν τις ροές DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) και στη συνέχεια συνθέτουν μέσω κωδικοποίησης ένα αρχείο βίντεο που μπορεί να αναπαραχθεί τοπικά στη συσκευή μας ακόμα και όταν η αυτή δεν

είναι συνδεδεμένη σε κάποιο δίκτυο. Αν και το γεγονός ότι υπάρχει κάποιος έστω ανεπίσημος τρόπος πραγματοποίησης λήψης βίντεο από παρόχους που δεν το επιτρέπουν επίσημα, το μειονέκτημα της παραπάνω διαδικασίας με το parsing και τα DASH stream είναι οποιαδήποτε αλλαγή στον HTML κώδικα της σελίδας με το βίντεο υποχρεώνει το δημιουργό της εφαρμογής να προσαρμόσει εκ νέου τη συμπεριφορά της, ώστε να ανταπεξέρχεται σε τέτοιες αλλαγές και να προσφέρει την επιθυμητή λειτουργικότητα. Ο βαθμός δυσκολίας και ο χρόνος που απαιτείται για την προσαρμογή των εφαρμογών αυξάνει με το πλήθος των υπηρεσιών παροχής ροής βίντεο που υποστηρίζονται από αυτές.

Οπότε, ξεκινήσαμε την έρευνά μας από τις διαθέσιμες πηγές λογισμικού, ώστε να βρούμε όσον το δυνατόν περισσότερες ήδη υπάρχουσες εφαρμογές (APP) που να εκτελούν τη ζητούμενη ή μια παρεμφερή λειτουργία. Φροντίσαμε όλες πηγές λογισμικού σημειώσουμε να είναι ασφαλείς για τον τελικό χρήστη, παρέχοντας τουλάχιστον ασφαλή σύνδεση HTTPS από προεπιλογή, να έχουν έναν Android client για τη διευκόλυνση της αναζήτησης και της ενημέρωσης των εφαρμογών, καθώς και να προσφέρουν ελεύθερη πρόσβαση, αναζήτηση και λήψη εφαρμογών (εκτός από το Google Play Store που είναι η προεπιλεγμένη και προεγκατεστημένη πηγή λογισμικού για όλες τις συσκευές Android οπότε είχαμε ήδη λογαριασμό) ώστε να μπορέσουμε να ερευνήσουμε πιο ελεύθερα. Αποκλείσαμε όλες τις πηγές λογισμικού που σχετίζονται αποκλειστικά με συσκευές κατασκευαστών, όπως Huawei AppGallery, Samsung App Store, Xiaomi App Store κλπ..

Μεταξύ των πηγών που ανακαλύφθηκαν είναι οι:

1. Google Play Store (play.google.com)
2. Amazon AppStore (www.amazon.com/b/?node=2350149011)
3. AppsAPK (www.appsapk.com)
4. CNET (download.cnet.com/android/)
5. Aptoide (www.aptoide.com)
6. F-Droid (www.f-droid.org)
7. GetJar (www.getjar.com)
8. Uptodown (www.en.uptodown.com)
9. 1Mobile (www.1mobile.com)

Από αυτές, το Amazon AppStore απαιτούσαι λογαριασμό για την είσοδο στην υπηρεσία και την εξερεύνηση των διαθέσιμων εφαρμογών, τα AppsAPK και CNET δεν είχαν Android client ενώ το 1Mobile δεν είχε ασφαλή σύνδεση HTTPS, οπότε απερρίφθησαν και οι τρεις αυτές πηγές.

4.4.4 Υπάρχουσες λύσεις – εφαρμογές λήψης βίντεο

Ιδανικά, θα θέλαμε οι εφαρμογές που θα αξιολογήσουμε να ανήκουν στην κατηγορία του ελεύθερου λογισμικού / λογισμικού ανοιχτού κώδικα (Free and Open Source Software – FOSS) ώστε να μπορούμε να μελετήσουμε τον κώδικά τους και να συνεισφέρουμε σε αυτές ή να αναπτύξουμε μια δική μας λύση βασιζόμενοι πάνω σε μια υπάρχουσα εφαρμογή. Ωστόσο, γνωρίζοντας πως υπάρχει χρέωση για την ανάρτηση των εφαρμογών στα περισσότερα αποθετήρια λογισμικού που διαχειρίζονται από εταιρίες και πως οι δημιουργοί εφαρμογών προσπαθούν να βιοποριστούν μέσω των εφαρμογών αυτών, δεν το θέσαμε ως αυστηρό κριτήριο.

Η αναζήτηση εφαρμογών πραγματοποιήθηκε κυρίως με τη χρήση της φράσης “Video Download” ως κλειδί αναζήτησης. Τα κριτήρια της αναζήτησής μας ποίκιλαν ανάλογα με τις δυνατότητες φιλτραρίσματος των αποτελεσμάτων αναζήτησης που παρείχε το εκάστοτε αποθετήριο λογισμικού στο οποίο αναζητούσαμε εφαρμογές. Γενικότερα όμως, τα επιθυμητά κριτήρια αναζήτησης των εφαρμογών προς δοκιμή ήταν τα παρακάτω:

1. Η εφαρμογή πρέπει να υποστηρίζει την Αγγλική γλώσσα, δηλαδή το περιβάλλον της να είναι στα Αγγλικά (υπήρχαν πολλές εφαρμογές γραμμένες σε άλλες μη ευρωπαϊκές γλώσσες που ήταν αδύνατον να χρησιμοποιηθούν λόγω της έλλειψης γνώσης των γλωσσών αυτών).
2. Η θέση της εφαρμογής στην κατάταξη εντός της λίστας αποτελεσμάτων (υψηλότερη κατάταξη συνήθως συνεπάγεται μεγαλύτερη αξιοπιστία, τουλάχιστον στο Google Play Store).
3. Η καλή βαθμολογία από τους χρήστες της εφαρμογής (τουλάχιστον 4.0 στα 5.0 αφού υψηλότερη βαθμολογία χρηστών συνήθως συνεπάγεται μεγαλύτερη αξιοπιστία, καλύτερη λειτουργικότητα και καλύτερη εμπειρία χρήσης).
4. Η δωρεάν λήψη (λόγω έλλειψης χρηματοδότησης δεν υπήρχε η δυνατότητα δοκιμής εφαρμογών που απαιτούν πληρωμή για τη λήψη ή για επιπλέον λειτουργικότητα).
5. Η υποστήριξη της εφαρμογής από το δημιουργό της (εφόσον η έρευνα πραγματοποιήθηκε τον 06/2018 η εφαρμογή να έχει αναβαθμιστεί τους τελευταίους 6 μήνες, δηλαδή εντός του 2018).
6. Η δυνατότητα της εφαρμογής να υποστηρίζει περισσότερες από δύο ανεξάρτητες υπηρεσίες προβολής ροής βίντεο (π.χ. οι υπηρεσίες Facebook και Instagram ανήκουν στην ίδια εταιρία, οπότε δεν είναι ανεξάρτητες).

Από τα αποτελέσματα αναζήτησης σε κάθε αποθετήριο αγνοήθηκαν οι εφαρμογές που είχαν βρεθεί και δοκιμαστεί κατά την αναζήτηση σε προηγούμενο αποθετήριο. Οπότε, στις λίστες που ακολουθούν παρακάτω κάθε εφαρμογή αναφέρεται μόνο μία φορά και συγκεκριμένα στη λίστα του αποθετηρίου στο οποίο τη συναντήσαμε για πρώτη φορά. Επίσης, στις παρακάτω λίστες δεν αναφέρονται εφαρμογές οι οποίες ενώ φαίνονται να πληρούν τα παραπάνω κριτήρια αναζήτησης στην πράξη δεν προσέφεραν την αναφερόμενη λειτουργικότητα, δηλαδή δεν υποστήριζαν τη λήψη βίντεο από καμία υπηρεσία. Τέλος, στις παρακάτω λίστες δεν αναφέρονται εφαρμογές που πληρούσαν τα παραπάνω κριτήρια, αλλά στην πράξη ήταν υπερβολικά αργές στην απόκριση ή είχαν περίπλοκο και δυσνόητο περιβάλλον διεπαφής ή ήταν αναξιόπιστες και προβληματικές ή βομβάρδιζαν το χρήστη με πολλές διαφημίσεις, κάνοντάς τες κουραστικές και δύσχρηστες για τον τελικό χρήστη, κάτι που σίγουρα συμβάλλει αρνητικά στην εμπειρία χρήσης αυτών.

Η έρευνα ξεκίνησε από την επίσημη και δημοφιλέστερη πηγή λογισμικού και εφαρμογών για συσκευές με λειτουργικό σύστημα Android, το Google Play Store. Γνωρίζαμε εκ των προτέρων ότι οι εφαρμογές που αναρτώνται στο Google Play Store ελέγχονται από τη Google, που είναι η διαχειρίστρια εταιρία της συγκεκριμένης πηγής λογισμικού, ώστε κάθε εφαρμογή που δημοσιεύεται να μην παραβιάζει τους όρους χρήσης των υπηρεσιών της Google. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως εφόσον το YouTube ανήκει στη Google, αποκλείεται οι εφαρμογές που βρίσκονται στο Google Play Store να μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την προβολή και/ή τη λήψη βίντεο από το YouTube, καθώς μέσα στους όρους χρήσης του YouTube δηλώνεται ξεκάθαρα ότι η λήψη βίντεο από την υπηρεσία αυτή απαγορεύεται αυστηρά, εκτός και αν ο δημιουργός κάποιου βίντεο παρέχει τη δυνατότητα λήψης αυτού μέσω εξωτερικού υπερσυνδέσμου. Ακόμα και το επίσημο YouTube API που παρέχεται στους δημιουργούς εφαρμογών δε δίνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής και/ή λήψης βίντεο, αλλά σχετίζεται αποκλειστικά με σχόλια

χρηστών και διαχείριση των καναλιών των δημιουργών. Οπότε, αναζητήσαμε εφαρμογές που να υποστηρίζουν τη λήψη βίντεο από τις υπόλοιπες υπηρεσίες.

Από τα αποτελέσματα αναζήτησης, δοκιμάσαμε περίπου 50 εφαρμογές. Καμία από αυτές δεν ανήκε στην κατηγορία FOSS, ήταν όλες ιδιόκτητο λογισμικό (Proprietary Software). Ωστόσο, οι περισσότερες είτε δεν προσέφεραν τη λειτουργικότητα που υπόσχονταν στην περιγραφή τους, κοινώς δε μπορούσαν να πραγματοποιήσουν λήψη βίντεο από καμία υπηρεσία, είτε υποστήριζαν αποκλειστικά τη λήψη βίντεο από τις υπηρεσίες Facebook και/ή Instagram που ανήκουν στην ίδια εταιρία. Τις πρώτες τις αγνοήσαμε εντελώς, οπότε δεν κρατήσαμε κάποια αναφορά σε αυτές. Όσον αφορά στις δεύτερες, παρόλο που δεν τις αξιολογήσαμε περαιτέρω διότι δεν πληρούν τα κριτήριά μας λόγω της περιορισμένης λειτουργικότητάς τους, θεωρήσαμε πρέπον να τις συμπεριλάβουμε στην παρούσα εργασία, ως μέρος της έρευνάς μας αλλά μόνο για την περίπτωση του Google Play Store.

Η λίστα των εφαρμογών από το Google Play Store που προσέφεραν τη δυνατότητα λήψης βίντεο μόνο από το Facebook και/ή το Instagram είναι η εξής:

1. Video Downloader for Facebook [83]
2. HD Video Download for Facebook [84]
3. Video Downloader for Instagram [85]
4. Video Downloader - for Instagram Repost App [86]
5. Video Downloader for Facebook [87]
6. MyVideoDownloader for Facebook: download videos! [88]
7. Video Downloader for Facebook Video Downloader [89]
8. Video Downloader for Facebook [90]
9. Video and Photo Downloader [91]
10. Video Downloader For Facebook: Download Video [92]
11. Inst Download - Video & Photo [93]
12. Video Downloader for Facebook [94]

Η λίστα των εφαρμογών από το Google Play Store που ικανοποιούσαν τα κριτήριά μας, παρείχαν την επιθυμητή λειτουργικότητα και αξιολογήθηκαν είναι η εξής:

1. Browser Video Downloader [95]
2. CM Browser [96]
3. GetThemAll [97]
4. Video Downloader [98]

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε πως οι εφαρμογές Browser Video Downloader και CM Browser δεν είναι αποκλειστικά εφαρμογές λήψης βίντεο, αλλά αποτελούν εφαρμογές περιηγητή ιστού (Web Browser) οι οποίες μεταξύ των λειτουργιών τους υποστηρίζουν και τη λήψη βίντεο από παρόχους υπηρεσιών ροής βίντεο.

Στη συνέχεια, αναζητήσαμε Android APP στις τρίτες πηγές λογισμικού, εκτός του Google Play Store με τα ίδια κριτήρια. Κάποιες από τις εφαρμογές που υπήρχαν στο Google Play Store υπήρχαν και σε άλλα αποθετήρια λογισμικού. Επίσης, κάποιες εφαρμογές, υπήρχαν σε περισσότερα από ένα αποθετήρια λογισμικού, πολλές φορές με διαφορετικό όνομα από το ένα αποθετήριο στο άλλο. Για να αποφύγουμε τον πλεονασμό και την επανάληψη δε θα τις αναφέρουμε καμία εφαρμογή στις λίστες

περισσότερες από μία φορές. Επίσης, στα αποθετήρια αυτά η αναζήτηση εφαρμογών πραγματοποιήθηκε επίσης με τη χρήση της φράσης “Youtube Download” ως κλειδί αναζήτησης, για να βεβαιωθούμε πως θα βρούμε εφαρμογές που να επιτρέπουν τη λήψη από το YouTube, κάτι που δεν είχαμε καταφέρει κατά την αναζήτηση στο Google Play Store.

Από τις εφαρμογές αυτές, οι περισσότερες υποστήριζαν αποκλειστικά τη λήψη βίντεο από το YouTube. Παρόλο που δεν τις αξιολογήσαμε περαιτέρω διότι δεν πληρούν τα κριτήριά μας λόγω της περιορισμένης λειτουργικότητάς τους, θεωρήσαμε πρέπει να τις συμπεριλάβουμε στην παρούσα εργασία, ως μέρος της έρευνάς μας διότι απαγορεύονται ρητά στο Google Play Store αλλά το YouTube αποτελεί τη δημοφιλέστερη υπηρεσία παροχής ροής βίντεο.

Η λίστα των εφαρμογών εκτός του Google Play Store που προσέφεραν τη δυνατότητα λήψης βίντεο μόνο από το YouTube είναι η εξής:

1. Do-Tube [99]
2. YouTube-DL [100]
3. arkTube [101]
4. YouTube Downloader for Android [102]
5. TubeMate [103]
6. NewPipe [104]

Το UpToDown δεν παρείχε κάποιο μηχανισμό φιλτραρίσματος των αποτελεσμάτων αναζήτησης. Ως εκ τούτου, αναζητήσαμε εφαρμογές βάσει της βαθμολογίας τους (τουλάχιστον 4.0 στα 5.0) και της ημερομηνίας της πιο πρόσφατης ενημέρωσής τους (εντός του 2018). Από αυτές που πληρούσαν τα συγκεκριμένα κριτήρια δοκιμάσαμε περίπου 50 εφαρμογές. Επίσης, λόγω του μικρού πλήθους εφαρμογών με βαθμολογίες, δοκιμάσαμε κάποιες που δεν είχαν βαθμολογία. Αγνοήσαμε τις εφαρμογές που στην πράξη δεν υποστήριζαν τη λήψη βίντεο από καμία υπηρεσία ή υποστήριζαν τη λήψη βίντεο αποκλειστικά από τις υπηρεσίες Facebook και/ή Instagram, καθώς οι δεύτερες δεν πληρούσαν τα κριτήριά μας σε σχέση με τη λειτουργικότητα και είχαμε μια ήδη μεγάλη λίστα με παρόμοιες εφαρμογές από το Google Play Store.

Από το UpToDown οι εφαρμογές Do-Tube και YouTube-DL έχουν ήδη συμπεριληφθεί στη λίστα με τις εφαρμογές που υποστηρίζουν μόνο τη λήψη βίντεο από το YouTube, οπότε δεν τις προσθέσαμε στην παρακάτω λίστα. Η λίστα των εφαρμογών από το UpToDown που ικανοποιούσαν τα κριτήριά μας, παρείχαν την επιθυμητή λειτουργικότητα και αξιολογήθηκαν είναι η εξής:

1. Videoder [105]
2. KeepVid [106]

Το Aptoide επίσης δεν παρείχε κάποιο μηχανισμό φιλτραρίσματος των αποτελεσμάτων αναζήτησης. Ως εκ τούτου, αναζητήσαμε εφαρμογές βάσει της βαθμολογίας τους (τουλάχιστον 4.0 στα 5.0) και της ημερομηνίας της πιο πρόσφατης ενημέρωσής τους (εντός του 2018). Από αυτές που πληρούσαν τα συγκεκριμένα κριτήρια δοκιμάσαμε περίπου 50 εφαρμογές. Αγνοήσαμε τις εφαρμογές που στην πράξη δεν υποστήριζαν τη λήψη βίντεο από καμία υπηρεσία ή υποστήριζαν τη λήψη βίντεο αποκλειστικά από τις υπηρεσίες Facebook και/ή Instagram, καθώς οι δεύτερες δεν πληρούσαν τα κριτήριά μας σε σχέση με τη λειτουργικότητα και είχαμε μια ήδη μεγάλη λίστα με παρόμοιες εφαρμογές από το Google Play Store.

Από το Aptoide οι εφαρμογές arkTube, GoTube και YouTube Downloader for Android έχουν ήδη συμπεριληφθεί στη λίστα με τις εφαρμογές που υποστηρίζουν μόνο τη λήψη βίντεο από το YouTube. Η λίστα των εφαρμογών από το Aptoide που ικανοποιούσαν τα κριτήριά μας, παρείχαν την επιθυμητή λειτουργικότητα και αξιολογήθηκαν είναι η εξής:

1. InsTube [107]
2. Snaptube Pro [108]

Το GetJar επίσης δεν παρείχε κάποιο μηχανισμό φιλτραρίσματος των αποτελεσμάτων αναζήτησης αλλά και καμία απολύτως πληροφορία για τις εφαρμογές όπως βαθμολογία, ημερομηνία της πιο πρόσφατης ενημέρωσης κλπ., εκτός από το πλήθος λήψεων της εφαρμογής από χρήστες. Από τις 10 εφαρμογές που εμφανίστηκαν κατά την αναζήτησή μας με τους όρους κλειδιά, τις δοκιμάσαμε όλες. Αγνοήσαμε τις εφαρμογές που στην πράξη δεν υποστήριζαν τη λήψη βίντεο από καμία υπηρεσία ή υποστήριζαν τη λήψη βίντεο αποκλειστικά από τις υπηρεσίες Facebook και/ή Instagram, καθώς οι δεύτερες δεν πληρούσαν τα κριτήριά μας σε σχέση με τη λειτουργικότητα και είχαμε μια ήδη μεγάλη λίστα με παρόμοιες εφαρμογές από το Google Play Store.

Από το GetJar η μόνη εφαρμογή που ικανοποιούσε τα κριτήριά μας είναι η TubeMate που έχει ήδη συμπεριληφθεί στη λίστα με τις εφαρμογές που υποστηρίζουν μόνο τη λήψη βίντεο από το YouTube, οπότε δεν υπάρχει άλλο κάτι για να παραθέσουμε από το GetJar.

Το F-Droid επίσης δεν παρείχε κάποιο μηχανισμό φιλτραρίσματος των αποτελεσμάτων αναζήτησης αλλά και καμία απολύτως πληροφορία για τις εφαρμογές όπως βαθμολογία, ημερομηνία της πιο πρόσφατης ενημέρωσης κλπ., εκτός από το πλήθος λήψεων της εφαρμογής από χρήστες. Από τις 5 εφαρμογές που εμφανίστηκαν κατά την αναζήτησή μας με τους όρους κλειδιά, τις δοκιμάσαμε όλες. Αγνοήσαμε τις εφαρμογές που στην πράξη δεν υποστήριζαν τη λήψη βίντεο από καμία υπηρεσία ή υποστήριζαν τη λήψη βίντεο αποκλειστικά από τις υπηρεσίες Facebook και/ή Instagram, καθώς οι δεύτερες δεν πληρούσαν τα κριτήριά μας σε σχέση με τη λειτουργικότητα και είχαμε μια ήδη μεγάλη λίστα με παρόμοιες εφαρμογές από το Google Play Store.

Από το F-Droid η μόνη εφαρμογή που ικανοποιούσε τα κριτήριά μας είναι η NewPipe που έχει ήδη συμπεριληφθεί στη λίστα με τις εφαρμογές που υποστηρίζουν μόνο τη λήψη βίντεο από το YouTube, οπότε δεν υπάρχει άλλο κάτι για να παραθέσουμε από το F-Droid.

4.5 Σύγκριση των εφαρμογών

Αρχικά πραγματοποιήσαμε έρευνα σχετικά με το ποιες υπηρεσίες ροής βίντεο από τις προαναφερθείσες στο υποκεφάλαιο 4.4.1 υποστηρίζει η κάθε εφαρμογή. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι παρατηρήσεις μας πάνω στις εφαρμογές, όσον αφορά στις υπηρεσίες παροχής ροής βίντεο που υποστηρίζουν αυτές.

Πίνακας 1: Εφαρμογές και υπηρεσίες ροής βίντεο που υποστηρίζονται από αυτές

	YouTube	Vimeo	Dailymotion	LiveLeak	Facebook	Instagram	BitChute
Browser Video Downloader		✓		✓		✓	✓
CM Browser		✓		✓	✓	✓	✓
Download Video Free		✓	✓	✓	✓	✓	✓
InsTube	✓			✓			
KeepVid	✓	✓	✓			✓	
Snaptube	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Video Downloader		✓	✓	✓		✓	✓
Videoder	✓	✓	✓		✓	✓	

Παρατηρούμε ότι καμία εφαρμογή από αυτές που προέρχονται από το Google Play Store δεν υποστηρίζει τη λήψη βίντεο από το YouTube, όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης, παρατηρούμε πως δεν υπάρχει εφαρμογή που να υποστηρίζει τη λήψη από όλους τους επιλεγμένους παρόχους υπηρεσιών ροής βίντεο. Ακόμη, παρατηρούμε ότι από τους παρόχους αυτούς, οι υποστηριζόμενοι από σχεδόν όλες τις εφαρμογές (οι 7 από τις 8) είναι το Vimeo και το Instagram. Τέλος, όλες αυτές οι εφαρμογές, από προεπιλογή αποθήκευαν τα βίντεο που λάμβαναν στον εσωτερικό αποθηκευτικό χώρο του χρήστη και συνήθως σε φακέλους που δημιουργούσαν οι ίδιες εντός του καταλόγου του χρήστη και δεν αποθήκευαν το ληφθέν βίντεο στον προεπιλεγμένο φάκελο Downloads για τις εφαρμογές, με εξαίρεση μόνο μία από αυτές.

Στη συνέχεια, εφόσον οι εφαρμογές αυτές απευθύνονται χρήστες συσκευών, πραγματοποιήσαμε μια έρευνα του περιβάλλοντος και της διεπαφής των εφαρμογών ως προς το αν προσφέρονται χρήσιμα χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τη διευκόλυνση της πλοήγησης και της χρήσης της εφαρμογής από το μέσο όρο των χρηστών. Τα χαρακτηριστικά που διερευνήσαμε είναι τα παρακάτω:

1. Αν προσφέρονται εντός της εφαρμογής οδηγίες ή υποδείξεις χρήσης της εφαρμογής που να βοηθήσουν το χρήστη της να εξοικειωθεί με το περιβάλλον της και τον τρόπο λειτουργίας της.
2. Αν υπάρχει ενσωματωμένος κάποιος περιηγητής ιστού ώστε να διευκολύνεται η πρόσβαση του χρήστη σε υπηρεσίες ροής βίντεο μέσω της περιήγησής του στον ιστό.
3. Αν παρέχονται εμφανείς σύνδεσμοι προς δημοφιλείς υπηρεσίες ροής βίντεο με τη μορφή εικονιδίων και/ή ονομασιών ώστε ο χρήστης να μπορεί να εύκολη και άμεση πρόσβαση στις υπηρεσίες αυτές.
4. Αν έχει ενσωματωμένη τη λειτουργία αναπαραγωγής βίντεο ώστε να μην απαιτείται τρίτο πρόγραμμα για την αναπαραγωγή των ληφθέντων βίντεο και να μην περιπλέκεται ο χρήστης.
5. Αν διατηρείται εντός της εφαρμογής κάποια λίστα με τις ολοκληρωμένες, τις αποτυχημένες και τις τρέχουσες λήψεις, τόσο για την προβολή των χαρακτηριστικών

τους όσο και για τη διαχείρισή τους, ώστε ο χρήστης να μπορεί να δει τις ολοκληρωμένες λήψεις και να τις αναπαράξει άμεσα, να δει τις τρέχουσες λήψεις και να ακυρώσει όποιες δεν επιθυμεί πλέον και να γνωρίζει αν κάποια λήψη απέτυχε και γιατί.

6. Αν εμφανίζονται ειδοποιήσεις στη γραμμή ειδοποιήσεων του λειτουργικού συστήματος της συσκευής σχετικά με την πρόοδο και την κατάσταση των λήψεων, όπως το όνομα του βίντεο, το ποσοστό ολοκλήρωσης της λήψης, η ταχύτητα λήψης και ενδεχομένως κάποιο πλήκτρο ακύρωσης της λήψης. Επιπλέον, ακουμπώντας την ειδοποίηση να μπορεί να μεταβεί στην οθόνη διαχείρισης των λήψεων της εφαρμογής.

Στον Πίνακα 2 παρατίθενται οι παρατηρήσεις μας πάνω στις εφαρμογές, όσον αφορά στα παραπάνω χαρακτηριστικά της διεπαφής και του περιβάλλοντός τους.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά της διεπαφής χρήσης των εφαρμογών

	Οδηγίες χρήσης	Περιηγητής ιστού	Σύνδεσμοι προς δημοφιλείς υπηρεσίες	Αναπαραγωγή λήψης	Λίστα λήψεων	Ειδοποιήσεις
Browser Video Downloader		✓			✓	✓
CM Browser		✓			✓	✓
Download Video Free	✓	✓		✓	✓	✓
InsTube		✓	✓	✓	✓	✓
KeepVid		✓	✓	✓	✓	✓
Snaptube		✓	✓		✓	✓
Video Downloader	✓	✓		✓	✓	✓
Videoder	✓	✓	✓		✓	✓

Παρατηρούμε ότι όλες οι εφαρμογές περιέχουν ενσωματωμένο έναν περιηγητή ιστού, διευκολύνοντας έτσι την περιήγηση σε διάφορες υπηρεσίες, ειδοποιήσεις για τους χρήστες ώστε να παρατηρούν την εξέλιξη της λήψης τους καθώς και ένα διαχειριστή των λήψεων για γρήγορη πρόσβαση στις ολοκληρωμένες λήψεις και διαχείριση όλων των λήψεων. Παρατηρούμε ωστόσο ότι μόνο οι μισές περιλαμβάνουν άμεση πρόσβαση σε υπηρεσίες ροής βίντεο, το οποίο σημαίνει ότι ενδεχομένως οι πιο άπειροι χρήστες που έχουν συνηθίσει να έχουν πρόσβαση στις υπηρεσίες αυτές από τις “έξυπνες” συσκευές τους μέσω των επίσημων APP των υπηρεσιών τους και όχι μέσω ιστοσελίδων ενδεχομένως να μπερδευτούν κατά τη χρήση της εφαρμογής. Επίσης, παρατηρούμε ότι μόνο οι μισές από τις εφαρμογές αυτές έχουν ενσωματωμένη τη δυνατότητα αναπαραγωγής βίντεο, που σημαίνει ότι στις υπόλοιπες θα χρειαστεί η λήψη τρίτης εφαρμογής αναπαραγωγής βίντεο για να προβληθούν τα ληφθέντα. Τέλος, παρατηρούμε ότι λιγότερες από τις μισές εφαρμογές έχουν ενσωματωμένο κάποιο εγχειρίδιο χρήσης ή έστω κάποιες υποδείξεις προκειμένου να διευκολύνουν το χρήστη τους στην εκμάθησή τους και στη γρήγορη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους, γεγονός

που σε συνδυασμό με το λίγο δυσνόητο περιβάλλον κάποιων από αυτές μπορεί να οδηγήσει σε μια αρκετά φτωχή εμπειρία χρήσης.

Έπειτα, κάναμε μια έρευνα στις πιο τεχνικές λειτουργίες των εφαρμογών που έχουν σχέση με τη διαδικασία λήψης, την ποιότητα και την αποθήκευση. Τα χαρακτηριστικά που διερευνήσαμε είναι τα παρακάτω:

1. Αν προσφέρεται η δυνατότητα παράλληλης λήψης πολλαπλών βίντεο ώστε να μην απαιτείται η ολοκλήρωση της λήψης ενός βίντεο πριν από την έναρξη της λήψης του επομένου, για τη μείωση του συνολικού χρόνου αναμονής.
2. Αν προσφέρεται η δυνατότητα επιτάχυνσης της λήψης των βίντεο με τη χρήση πολυνηματισμού όπου κάθε νήμα αναλαμβάνει τη λήψη ενός συγκεκριμένου τμήματος των βίντεο (από το byte A ως το byte B) προκειμένου να αποφευχθούν καθυστερήσεις λόγω των εναλλαγών πλαισίων (Context Switching). Ιδανικά θα θέλαμε να μπορεί να επιλεγθεί το πλήθος των νημάτων είτε καθολικά για όλες τις λήψεις είτε ανά λήψη, ώστε π.χ. σε περίπτωση που μια λήψη περιλαμβάνει τη μεταφορά πολλών megabyte ή gigabyte να μπορεί να αυξηθεί το πλήθος των νημάτων για την καλύτερη διαχείριση της διαδικασίας λήψης και τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωσή της
3. Αν παρέχεται η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής ποιότητας λήψης μεταξύ των διαφορετικών ροών DASH, ώστε ένας χρήστης να μπορεί να επιλέξει την επιθυμητή ποιότητα ανάλογα με τις ανάγκες του, το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος, το πλάνο δεδομένων του, την ισχύ σήματός του, τον ελεύθερο διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο της συσκευής, την ανάλυση οθόνης της συσκευής κλπ..
4. Αν παρέχεται η δυνατότητα λήψης μόνο ήχου και/ή εξαγωγής του ήχου από το βίντεο μετά από την ολοκλήρωση της λήψης. Αυτό ωφελεί κυρίως τη λήψη βίντεο όπου το σημαντικό περιεχόμενο δεν είναι στην εικόνα του βίντεο, αλλά στον ήχο όπως στην περίπτωση ενός μουσικού βίντεο, μιας εκπομπής με συζητήσεις μεταξύ των μελών κλπ..
5. Αν μπορούμε να επιλέξουμε εμείς τον επιθυμητό κατάλογο για την αποθήκευση των λήψεων καθολικά για όλες τις λήψεις. Λόγω του ότι ο προεπιλεγμένος κατάλογος λήψεων στο Android είναι ο κατάλογος Downloads που βρίσκεται στον υποκατάλογο του χρήστη, ο διαχειριστής λήψεων και προβολής αρχείων συνήθως εμφανίζει μόνο αυτόν και όχι τους υπόλοιπους καταλόγους. Κάποιες εφαρμογές τείνουν να μην επιλέγουν τον κατάλογο αυτό για τις λήψεις αλλά δημιουργούν τους δικούς τους καταλόγους για το υλικό τους, κάτι που μπορεί μεν να βολεύει τους δημιουργούς τους αλλά μπορεί να μπερδεύει το χρήστη τους. Επίσης, μπορεί ο χρήστης να προτιμά να οργανώνει μόνος του τα αρχεία της συσκευής του σε καταλόγους σύμφωνα με τα προσωπικά του κριτήρια, οπότε να θέλει και οι εφαρμογές να αποθηκεύουν τις λήψεις τους στους αντίστοιχους επιθυμητούς καταλόγους. Επίσης, συνήθως οι εφαρμογές δεν προσφέρουν από προεπιλογή τη δυνατότητα αποθήκευσης των λήψεων σε εξωτερική κάρτα SD λόγω των περιορισμών που εισήγαγε η Google στο Android, που σημαίνει ότι σε περίπτωση που ο εσωτερικός χώρος δεν επαρκεί ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει τις λήψεις την κάρτα SD.

Στον Πίνακα 3 παρατίθενται οι παρατηρήσεις μας πάνω στις εφαρμογές, όσον αφορά στις παραπάνω τεχνικές λειτουργίες.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά λήψης και αποθήκευσης των εφαρμογών

	Παράλληλη λήψη	Λήψη με χρήση πολυνηματισμού	Επιλογή ποιότητας	Εξαγωγή ήχου	Καθολική επιλογή καταλόγου αποθήκευσης
Browser Video Downloader					✓
CM Browser	✓				✓
Download Video Free	✓				✓
InsTube	✓	✓	✓	✓	✓
KeepVid	✓	✓	✓	✓	✓
Snaptube	✓	✓	✓	✓	✓
Video Downloader	✓		✓		✓
Videoder	✓	✓	✓	✓	✓

Παρατηρούμε ότι όλες οι εφαρμογές επιτρέπουν την αλλαγή του καθολικού καταλόγου λήψης. Επίσης, παρατηρούμε πως σχεδόν όλες οι εφαρμογές (οι 7 από τις 8) επιτρέπουν την παράλληλη λήψη βίντεο. Ακόμα, παρατηρούμε ότι οι μισές από τις εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούν πολυνηματισμό για την επιτάχυνση των λήψεων. Τέλος, παρατηρούμε ότι οι περισσότερες εφαρμογές δίνουν παρέχουν τη δυνατότητα επιλογής της ποιότητας βίντεο προς λήψη.

Στο τέλος, κάναμε μια έρευνα στις πιο εξελιγμένες λειτουργίες των εφαρμογών που έχουν σχέση με τα ονόματα και τους καταλόγους αποθήκευσης κάθε αρχείου, την αλληλεπίδραση των εφαρμογών μέσω της δυνατότητας “κοινοποίησης” που προσφέρει το Android στις εφαρμογές, την αλληλεπίδραση με το λειτουργικό σύστημα και την ασφάλεια – ιδιωτικότητα. Τα χαρακτηριστικά που διερευνήσαμε είναι τα παρακάτω:

1. Αν προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής του ονόματος με το οποίο θα αποθηκευτεί το βίντεο που θέλουμε να λάβουμε ξεχωριστά για κάθε αρχείο, ώστε ο χρήστης να μπορεί να ονομάσει το βίντεο όπως εκείνος κρίνει καλύτερα απορρίπτοντας το προεπιλεγμένο όνομα που συνήθως είναι ο τίτλος του βίντεο στην υπηρεσία που το παρέχει.
2. Αν προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής του καταλόγου αποθήκευσης του βίντεο που θέλουμε να λάβουμε ξεχωριστά για κάθε αρχείο, ανεξάρτητα από τον επιλεγμένο καθολικό κατάλογο λήψης, ώστε ο χρήστης να μπορεί να οργανώνει τις λήψεις του καλύτερα, ενδεχομένως ανάλογα με το περιεχόμενο του βίντεο και το διαθέσιμο ελεύθερο χώρο της συσκευής και της εξωτερικής κάρτας SD, αν υπάρχει.
3. Αν η εφαρμογή μπορεί να “κληθεί” από άλλες εφαρμογές μέσω της λειτουργίας της κοινοποίησης που προσφέρει τόσο το ίδιο το Android όσο και η κάθε εφαρμογή ξεχωριστά. Σε περίπτωση που ο χρήστης παρακολουθεί κάποιο βίντεο σε μια υπηρεσία π.χ. στο YouTube είτε μέσω του επίσημου YouTube Android APP είτε μέσω ενός περιηγητή ιστού, να μπορεί μέσω της λειτουργίας της κοινοποίησης να επιλέξει την εφαρμογή για να ξεκινήσει άμεσα τη λήψη, χωρίς να χρειάζεται αντιγραφή και επικόλληση συνδέσμων ή εκ νέου περιήγηση στον ιστό μέσω της εφαρμογής.

4. Αν η εφαρμογή αλληλεπιδρά με το Clipboard της συσκευής ώστε όταν αντιγράφεται ένας υπερσύνδεσμος που οδηγεί στην αναπαραγωγή βίντεο κάποιας υπηρεσίας ροής βίντεο τότε οι εφαρμογές να μπορούν από μόνες τους να εμφανίσουν κάποια ειδοποίηση και/ή συντόμευση στο περιβάλλον του χρήστη, για την ενημέρωσή του ότι δίνεται η δυνατότητα λήψης του συγκεκριμένου βίντεο και να διευκολύνουν τη διαδικασία της εκκίνησης μιας λήψης.

5. Αν παρέχεται κάποιο είδος ασφάλειας όσον αφορά στην εφαρμογή και/ή στα ληφθέντα βίντεο. Δηλαδή η εφαρμογή να μπορεί να κλειδώνει για να προστατεύεται η ιδιωτικότητα του χρήστη και/ή να παρέχει κάποιο είδος ασφάλειας μέσω hashing και κρυπτογράφησης βάσει κωδικού, προτύπου ή βιομετρικού συστήματος ταυτοποίησης για την προστασία του χρήστη από κακόβουλες τρίτες οντότητες.

Στον Πίνακα 4 παρατίθενται οι παρατηρήσεις μας πάνω στις εφαρμογές, όσον αφορά στις εξελιγμένες λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά αποθήκευσης, αλληλεπίδρασης και ασφάλειας των εφαρμογών

	Επιλογή ονόματος αποθήκευσης ανά λήψη	Επιλογή καταλόγου αποθήκευσης ανά λήψη	Λήψη βίντεο μέσω κοινοποίησης συνδέσμου	Εντοπισμός συνδέσμου στο clipboard	Ασφάλεια και ιδιωτικότητα
Browser Video Downloader					✓
CM Browser					✓
Download Video Free					✓
InsTube			✓	✓	
KeepVid			✓	✓	
Snaptube	✓	✓	✓	✓	
Video Downloader					
Videoder	✓	✓	✓	✓	

Παρατηρούμε πως όσο προχωράμε σε χαρακτηριστικά που προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία, ασφάλεια και ιδιωτικότητα, το πλήθος των εφαρμογών που τα υποστηρίζουν μειώνεται αρκετά. Μόλις 2 εφαρμογές υποστηρίζουν την ονοματολογία και επιλογή καταλόγου αποθήκευσης ανά λήψη, ενώ μόλις 3 εφαρμογές έχουν βασικά χαρακτηριστικά ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Επιπλέον, ακριβώς οι μισές μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το λειτουργικό σύστημα ή με άλλες εφαρμογές.

4.6 Προτάσεις για βελτιώσεις και νέες δυνατότητες/λειτουργίες

Εφόσον το caching αποτελεί το μέλλον του διαμοιρασμού δημοφιλούς περιεχομένου τύπου βίντεο και εφόσον η προσφορά και η ζήτηση για το τέτοιο περιεχόμενο σίγουρα θα αυξάνεται με το πέρασμα των χρόνων, καλό θα ήταν οι εφαρμογές να εξελιχθούν αναλόγως, υποστηρίζοντας περισσότερες ή ακόμα και όλες τις υπηρεσίες παροχής ροής

βίντεο αν είναι δυνατόν. Επίσης, θα ήταν μια καλή ιδέα να χρησιμοποιούν όλες οι εφαρμογές τεχνικές πολυνηματισμού για την επιτάχυνση της λήψης των βίντεο αλλά και να εισαχθεί η δυνατότητα λήψης μέρους των βίντεο και όχι ολόκληρου, ώστε στο μέλλον να μπορούν να συνεργαστούν όλες οι συσκευές που βρίσκονται στο ίδιο τοπικό δίκτυο, ώστε κάθε μία να παρέχει στις άλλες το δικό της ληφθέν τμήμα και να λαμβάνει τα τμήματα των υπολοίπων προκειμένου να συνθέσουν όλες, κάθε μία ξεχωριστά, το τελικό βίντεο, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και ενέργεια.

Επιπλέον καλό θα ήταν να εισαχθεί κάποια ασφάλεια για την παροχή της ακεραιότητας δεδομένων μέσω κρυπτογράφησης βάσει κωδικού ή προτύπου ή δαχτυλικού αποτυπώματος ή οποιουδήποτε βιομετρικού συστήματος ασφαλείας χρησιμοποιούν οι συσκευές στο μέλλον, ώστε στις εφαρμογές να μην μπορεί να τροποποιηθεί απομακρυσμένα το περιεχόμενο λήψης από κάποιο κακόβουλο χρήστη. Επίσης, για να προστατευτεί το περιεχόμενο των παρόχων ροής βίντεο, καλό θα ήταν ο χρήστης να μην μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση στο τελικό αρχείο βίντεο της συσκευής του, ώστε να μην μπορεί να το αντιγράψει και να το διαμοιράσει χωρίς την έγκριση του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων.

Τέλος, ιδανικά, θα μπορούσε να κατασκευαστεί κάποια εφαρμογή η οποία θα αναλάμβανε αυτόματα τη διαδικασία του caching δημοφιλούς περιεχομένου στις συσκευές των χρηστών όταν αυτοί είναι συνδεδεμένοι σε ασύρματα δίκτυα Wi-Fi, ώστε να υπάρχει διαθέσιμο μέρος ή ολόκληρο το περιεχόμενο στις συσκευές πριν ζητηθεί από το χρήστη. Επίσης, η εφαρμογή αυτή θα μπορούσε, μέσω καλά ορισμένου πρωτοκόλλου, να αναζητά για άλλους χρήστες της εφαρμογής ή για cache server στο ίδιο τοπικό δίκτυο και να διαμοιράζει το ληφθέν περιεχόμενο της κάθε συσκευής στις άλλες και στον cache server, ώστε να μειωθεί το εύρος ζώνης που απαιτείται για τη λήψη του περιεχομένου από τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή και να επιταχυνθεί η διαδικασία λήψης για τους τελικούς χρήστες, ώστε να μειωθεί η αναμονή. Ακόμα, η εφαρμογή αυτή θα μπορούσε στην περίπτωση αναπαραγωγής του ληφθέντος τμήματος περιεχομένου να αναλαμβάνει την άμεση λήψη του τμήματος του περιεχομένου που λείπει από τη συσκευή, είτε τοπικά από άλλες συσκευές ή cache server, είτε από τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή του παρόχου του περιεχομένου έτσι ώστε να μην υπάρχουν καθυστερήσεις στην αναπαραγωγή του βίντεο στη συσκευή του χρήστη, εξασφαλίζοντάς του έτσι μια καλή εμπειρία χρήσης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη βιβλιογραφία και την έρευνα παρατηρούμε ότι λόγω της αύξησης του πλήθους των συσκευών που διαθέτουν τη δυνατότητα ασύρματης συνδεσιμότητας με δίκτυα, είναι επιτακτικό να αυξηθεί κατά πολύ η χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων πρόσβασης. Οπότε, η εγκατάσταση νέου εξοπλισμού που περιλαμβάνει τα Small Cell, mmWave, Massive MIMO, αναμεταδότες και οπτικές ίνες και μέσω του οποίου μπορούν να επιτευχθούν τα επιθυμητά μεγέθη χωρητικότητας είναι μονόδρομος, παρά το όποιο κόστος υπάρχει, αφού εν τέλει τα δίκτυα αποσκοπούν στην καλύτερη εμπειρία χρήσης των τελικών χρηστών των δικτύων.

Η διαχείριση ενέργειας είναι απαραίτητο να βελτιστοποιηθεί τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους αλλά και για τη μείωση του κόστους της λειτουργίας των δικτύων αλλά και για τη μεγαλύτερη διάρκεια των συσκευών των χρηστών οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο φορητές συσκευές με μικρή μπαταρία. Εκτός από τα smartphone υπάρχουν και άλλες συσκευές που συνδέονται σε ασύρματα δίκτυα όπως αισθητήρες, μετρητές, συσκευές παρακολούθησης χώρων και εγκαταστάσεων και συσκευές παρακολούθησης της υγείας ασθενών που ενδεχομένως να πρέπει να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους αλλά και με τα απομακρυσμένα δίκτυα. Οπότε, πρέπει να μπορούν να βελτιστοποιούν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους αφού συνήθως δεν είναι συνδεδεμένες σε κάποια πηγή τροφοδοσίας και μπορεί να περάσουν εβδομάδες και/ή μήνες μέχρι την επόμενη επαναφόρτισή τους.

Συνδυάζοντας τη μικρή κατανάλωση ενέργειας με τεχνικές συγκέντρωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, μπορούν να εγκατασταθούν επιπλέον σταθμοί βάσης σε δυσπρόσιτες περιοχές και αραιοκατοικημένες περιοχές, γεγονός που βοηθάει στη διασύνδεση ολοένα μεγαλύτερου πλήθους χρηστών και συσκευών σε κάθε γωνιά του πλανήτη, ώστε κανένας να μη στερείται την πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Ακόμα, λόγω της τεράστιας αύξησης του μεγέθους και του πλήθους των δεδομένων που μεταφέρονται εντός των δικτύων ανά δευτερόλεπτο, και ειδικά μέσω του ασύρματου δικτύου πρόσβασης λόγω των smartphone, χρειάζεται η βελτίωση της διεκπεραιωτικής ικανότητας των δικτύων ώστε οι τελικοί χρήστες να μην αντιμετωπίζουν προβλήματα που οφείλονται στα δίκτυα και που μειώνουν την εμπειρία χρήσης τους. Η βελτίωση αυτή μπορεί να προέλθει εν μέρει με την εγκατάσταση νέου εξοπλισμού αλλά και με την καλύτερη διαχείριση του εξοπλισμού αυτού ώστε να εκμεταλλευτούμε όσο το δυνατόν περισσότερο τα οφέλη του. Η καλύτερη διαχείριση μπορεί να γίνει και στο φυσικό επίπεδο αλλά και στο επίπεδο δικτύου μέσω της χρήσης λογισμικού.

Είναι επίσης απαραίτητη η εξασφάλιση της συνεχούς και χωρίς διακοπές υποστήριξη των χρηστών των ασύρματων δικτύων ακόμα και αν οι χρήστες βρίσκονται εν κινήσει. Οπότε, είναι απαραίτητο τα δίκτυα να “ακολουθούν” τους χρήστες κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, ακόμα και αν οι συσκευές των χρηστών αυτών συνδέονται σε μια σειρά διαφορετικών σημείων πρόσβασης. Ιδανικά, είναι επιθυμητό κατά την ακολούθηση αυτή να μη γίνεται αντιληπτή η αποσύνδεση και επανασύνδεση των χρηστών από τα σημεία πρόσβασης αλλά να βιώνεται ως μια συνεχής, σταθερή και απροβλημάτιστη σύνδεση στο διαδίκτυο.

Επίσης, με τις κατάλληλες τεχνολογίες cloud μπορεί να αλλάξει εντελώς η μορφή των δικτύων όπως την ξέραμε μέχρι στιγμής, ώστε να μη χρειάζεται να εξαρτόμαστε αποκλειστικά από το υλικό των συσκευών δικτύωσης και των περιορισμών αυτών, αλλά να μπορούμε να προγραμματίζουμε κάθε επίπεδο του δικτύου και κάθε τμήμα του, από τον πυρήνα μέχρι και τα άκρα. Μέσω του προγραμματισμού αυτού απλοποιούμε τη διαχείριση των δικτύων και το χρόνο που αφιερώνεται σε αυτή, βελτιστοποιούμε τον

έλεγχο και τη συμπεριφορά των δικτυακών συσκευών, βοηθάμε στην διαχείριση της τεράστιας ροής δεδομένων εντός των δικτύων και σχεδιάζουμε και προσφέρουμε στοχευμένες υπηρεσίες. Οι τεχνολογίες SDN και NFV αποτελούν τα θεμέλια για τη δημιουργία σύγχρονων τεχνολογιών cloud.

Με την υλοποίηση σύγχρονων συστημάτων cloud εντός των δικτύων πολλές λειτουργίες μπορούν να μετατραπούν σε υπηρεσίες. Η μετατροπή αυτή θα ανεξαρτητοποιήσει τη λειτουργικότητα από το υλικό, καθώς η αποθήκευση και η επεξεργασία δεδομένων γίνεται σε cluster που παρέχουν πολύ μεγάλες δυνατότητες επεξεργασίας και τεράστιους αποθηκευτικούς χώρους, διευκολύνοντας έτσι τις πιο αδύναμες συσκευές, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας των δικτύων και παρέχοντας γρηγορότερη απόκριση και μεταλύτερη διεκπεραιωτική ικανότητα.

Επιπλέον, όσον αφορά στους τελικούς χρήστες που βρίσκονται στο άκρο του δικτύου και οι οποίοι έχουν υπερβολικά υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, εύρος ζώνης και επιθυμούν ελάχιστη ως μηδαμινή καθυστέρησης λόγω των εφαρμογών που τους ενδιαφέρουν, ο μόνος τρόπος να ικανοποιήσουν τις επιθυμίες τους είναι μέσω της εκμετάλλευσης του περιβάλλοντος στα άκρα του δικτύου, αφού το περιβάλλον αυτό παρέχει τις συγκεκριμένες συνθήκες. Παρατηρήσαμε πως ολοένα εντονότερα μελετάται η εφαρμογή του caching δημοφιλούς περιεχομένου που απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως το βίντεο, προκειμένου να προσφέρεται μια πιο ομαλή και καλή εμπειρία στους τελικούς χρήστες των δικτύων και των υπηρεσιών παροχής ψηφιακού περιεχομένου.

Η ανάγκη για έξυπνες τεχνικές caching γίνεται επιτακτική. Εκμεταλλευόμενοι το περιβάλλον στα άκρα του δικτύου που χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μεγάλο εύρος ζώνης και μηδαμινή καθυστέρηση, μπορούμε να δημιουργήσουμε cache servers πάνω στο δικτυακό εξοπλισμό αλλά και ένα δίκτυο caching και ανταλλαγής περιεχομένου από συσκευή σε συσκευή, ώστε να διευκολύνεται ακόμα περισσότερο η διαδικασία μέσω της εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων των συσκευών των τελικών χρηστών.

Τέλος, όσον αφορά στις συσκευές των τελικών χρηστών, η δημιουργία εφαρμογών που να πραγματοποιούν το caching με γρήγορο και έξυπνο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς των συσκευών αυτών και του δικτύου είναι απαραίτητη, προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της μεταφοράς δεδομένων από συσκευή σε συσκευή μέσω της άμεσης επικοινωνίας των συσκευών. Όπως είδαμε υπάρχουν ήδη κάποιες λύσεις, αλλά αυτές είναι ανεπίσημες και δεν παρέχονται με τη συμφωνία των παρόχων υπηρεσιών διανομής ψηφιακού περιεχομένου και με κάποια εγγύηση σωστής λειτουργίας. Αυτό πρέπει να αλλάξει καθώς όλες οι οντότητες που σχετίζονται με το ψηφιακό περιεχόμενο και τη διανομή του έχουν ένα κοινό στόχο που είναι η παροχή του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα μια καλή εμπειρία χρήσης κατά την κατανάλωση του περιεχομένου αυτού. Οπότε πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος που να εξυπηρετεί ταυτόχρονα τους τελικούς χρήστες, τους παρόχους ψηφιακού περιεχομένου, τους φορείς εκμετάλλευσης του ασύρματου δικτύου, τους φορείς των δικτύων παροχής περιεχομένου, και τους κατόχους της πνευματικής ιδιοκτησίας που συνδέεται με το περιεχόμενο αυτό.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος Όρος	Ελληνικός Όρος
Wireless Connectivity	Ασύρματη Συνδεσιμότητα
Smart Device	Έξυπνη Συσκευή
Smartphone	Έξυπνο Τηλέφωνο
Tablet	Υπολογιστής Ταμπλέτα
Smart TV	Έξυπνη Τηλεόραση
Smart Speaker	Έξυπνο Ηχείο
Smartwatch	Έξυπνο Ρολόι
Smart Wearables	Έξυπνες Φορετές Συσκευές
Internet of Things	Διαδίκτυο Των Πραγμάτων
Closed-Circuit Television	Συστήματα Κλειστού Κυκλώματος Παρακολούθησης
Internet of Things Devices	Συσκευές Του Διαδικτύου Των Πραγμάτων
Cellular Network	Κυψελωτό Δίκτυο
Mobile Data Traffic	Κίνηση Δεδομένων Σε Φορητές Συσκευές
IP Traffic	Κίνηση Δεδομένων IP
Wi-Fi Hotspot	Ασύρματο Σημείο Πρόσβασης Wi-Fi
Cell	Κυψέλη
5th Generation Wireless Systems	Ασύρματα Συστήματα Πέμπτης Γενιάς
Quality of Experience	Εμπειρία Χρήσης
Radio Access Network	Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης
Base Station	Σταθμός Βάσης
Small Cell	Κυψέλη Μικρού Μεγέθους
Popular Multimedia Content	Δημοφιλές Περιεχόμενο Πολυμέσων
Video Streaming	Ροή Βίντεο
Display Resolution	Ανάλυση Εικόνας
Frames Per Second	Καρέ Ανά Δευτερόλεπτο
Virtual Reality	Εικονική Πραγματικότητα
Database	Βάση Δεδομένων
Server	Εξυπηρετητής
Digital Content Provider	Πάροχος Ψηφιακού Περιεχομένου
Bandwidth	Εύρος Ζώνης
Heterogeneous Network	Ετερογενές Δίκτυο
Virtualization	Εικονικοποίηση
Real-Time Application	Εφαρμογή Πραγματικού Χρόνου
Augmented Reality	Επαυξημένη Πραγματικότητα
Live Video Streaming	Ζωντανή Ροή Βίντεο
Service Provider	Πάροχος Υπηρεσιών
Video Conferencing	Βιντεοσυνδιάσκεψη
Cloud Computing	Υπολογισμοί Μέσω Νέφους
Information Technology	Τεχνολογία Πληροφοριών
Device-to-Device Communication	Επικοινωνία Μεταξύ Συσκευών
Machine-Type Communication	Επικοινωνία Μεταξύ Μηχανημάτων
Smart Living	Έξυπνα Σπίτια
Smart City	Έξυπνη Πόλη
Smart Electrical Grid	Έξυπνο Δίκτυο Ηλεκτροδότησης
Smart Highway/Road	Έξυπνο Οδικό Δίκτυο
Cloud	Νέφος

Network Service Providers	Πάροχος Υπηρεσιών Δικτύου
Caching	Προσωρινή αποθήκευση
Cache Server	Εξυπηρετητής Προσωρινής Αποθήκευσης
Macrocell	Μακροκυψέλη
Aggregate Data Rate	Συνολικός Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων
Edge Rate	Ακραίος Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων
Peak Rate	Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων Αιχμής
Turnaround Latency	Καθυστέρηση Μεθ' Επιστροφής
Machine-Type Device	Συσκευή Τύπου Μηχανής
Signal-to-Noise Ratio	Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο
Millimeter Waveband	Ζώνη Συχνοτήτων Του Χιλιοστομετρικού Μήκους Κύματος
Antenna Array	Στοιχειοκεραία
Spatial Multiplexing	Πολυπλεξία Χώρου
Channel State Information	Πληροφορίες Για Την Κατάσταση Των Καναλιών
Uplink	Άνω Ζεύξη
Downlink	Κάτω Ζεύξη
Pilot Signal	Σήμα Πιλότος
Pilot Contamination	Μόλυνση Πιλότου
Time Division Duplexing	Αμφίδρομη Επικοινωνία Διαίρεσης Χρόνου
Access Point	Σημείο Πρόσβασης
Active Antenna	Ενεργή Κεραία
Radio Frequency Chain	Αλυσίδα Ραδιοσυχνοτήτων
Analog-to-Digital Converter	Μετατροπέας Από Αναλογικό Σε Ψηφιακό
Digital-to-Analog Converter	Μετατροπέας Από Ψηφιακό Σε Αναλογικό
Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων
Software Defined Networking	Δικτύωση Βασισμένη Στο Λογισμικό
Radio Access Network as a Service	Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης Ως Υπηρεσία
Anything as a Service	Παροχή Όλων Των Λειτουργιών Ως Υπηρεσίες
Router	Δρομολογητής
Switch	Μεταγωγέας
Architectural Framework	Αρχιτεκτονικό Πλαίσιο
Logically Centralized Controller	Λογικά Κεντριοποιημένος Ελεγκτής
Network Operating System	Λειτουργικό Σύστημα Δικτύου
Application Programming Interface	Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών
Firewall	Τοίχος Προστασίας
Southbound Interface	Νότια Διεπαφή
Instruction Set	Σύνολο Εντολών
Southbound API	Νότια Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών
Device Driver Layer	Επίπεδο Οδηγών Συσκευών
Protocol Plug-in	Άρθρωμα Πρωτοκόλλων
Backwards Compatibility	Προς Τα Πίσω Συμβατότητα
Northbound Interface	Βόρεια Διεπαφή
Multithreading	Πολυνημάτωση
Centralized Cluster	Κεντρική Συστάδα
Data Center	Κέντρο Δεδομένων
Wide Area Network	Δίκτυο Ευρείας Περιοχής

Eastbound Interface	Ανατολική Διεπαφή
Westbound Interface	Δυτική Διεπαφή
Virtual Network Functions	Εικονική Λειτουργία Δικτύου
Baseband Processing Unit	Μονάδα Επεξεργασίας Βασικής Ζώνης
Forwarding Graph Of Connected Network Functions	Προωθητικό Γράφημα Συνδεδεμένων Λειτουργιών Του Δικτύου
Non-Access Stratum	Επίπεδο Μη-Πρόσβασης
Evolved Packet Core	Κεντρικό Δίκτυο Πακέτων
Mobility Management Entity	Μονάδα Διαχείρισης Φορητότητας
Serving Gateway	Πύλη Εξυπηρέτησης
Packet Data Network Gateway	Πύλη Πακέτων Δεδομένων Δικτύου
Medium Access Control	Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου
Radio Link Control	Έλεγχος Ασύρματης Ζεύξης
Radio Resource Control	Έλεγχος Ασύρματων Πόρων
Virtual Machine	Εικονική Μηχανή
Network Overlay	Επικάλυψη Δικτύου
Network Virtualization Edge	Άκρο Εικονικοποίησης Δικτύου
Cloud Radio Access Network	Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης Νέφους
Centralized Radio Access Network	Κεντροκοποιημένο Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης
Radio Access Point	Ασύρματο Σημείο Πρόσβασης
Radio Resource Management	Διαχείριση Ασύρματων Πόρων
Federated Cloud	Ομοσπονδιακό Νέφος
Cloud Federation	Ομοσπονδία Νεφών
Follow-Me Cloud	Νέφος Ακολούθησης
Federated Networked Cloud	Ομοσπονδιακό Νέφος Δικτύωσης
Instance	Στιγμιότυπο
Virtual Network Infrastructure	Υποδομή Εικονικού Δικτύου
Packet Gateway	Πύλη Πακέτων Δεδομένων
Serving Gateway	Πύλη Εξυπηρέτησης
Mobile Content Delivery Network as a Service	Ασύρματο Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου Ως Υπηρεσία
Service Instance	Στιγμιότυπο Υπηρεσίας
Content Delivery Network	Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου
Traffic Offload as a Service	Χειρισμός Της Κίνησης Ως Υπηρεσία
Local Gateway	Τοπική Πύλη
Mobile Network Operator	Φορέας Δικτύου Κινητής Τηλεφωνίας
Service Orchestrator	Ενορχηστρωτής Υπηρεσίας
Service Instance Graph	Γράφημα Στιγμιότυπου Υπηρεσιών
Domain Name System	Σύστημα Ονομάτων Τομεών
Service Instance Component	Συστατικό Στιγμιότυπου Υπηρεσίας
Virtual Infrastructure Manager	Διαχειριστής Της Εικονικής Υποδομής
User Equipment	Εξοπλισμό Του Χρήστη
Graphics Rendering	Σύνθεση Γραφικών
Gaming as a Service	Παίγνια Ως Υπηρεσία
Carrier Aggregation	Συνάθροιση Φερόντων
Internet Service Provider	Πάροχος Υπηρεσιών Ίντερνετ
Free And Open Source Software	Ελεύθερο Λογισμικό / Λογισμικό Ανοιχτού Κώδικα
Proprietary Software	Ιδιόκτητο Λογισμικό
Web Browser	Περιηγητής Ιστού

Context Switching	Εναλλαγή Πλαισίων
-------------------	-------------------

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΕΚΠΑ	ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
GAIN	Green, Adaptive and Intelligent Networking Group
CCTV	Closed-Circuit Television
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
5G	5th Generation Wireless Systems
QoE	Quality of Experience
RAN	Radio Access Network
BS	Base Station
FPS	Frames Per Second
VR	Virtual Reality
IT	Information Technology
D2D	Device-to-Device Communication
4G	Fourth Generation of Broadband Cellular Network Technology
LTE	Long-Term Evolution
mmWave	Millimeter Waveband
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
SU-MIMO	Single User MIMO
MU-MIMO	Multi User MIMO
SDMA	Space-division Multiple Access
FD-MIMO	Full Dimension MIMO
CoMP	Coordinated MultiPoint
SDN	Software Defined Networking
API	Application Programming Interface
NFV	Network Functions Virtualization
VNF	Virtual Network Function
BBU	Baseband Processing Unit
EPC	Evolved Packet Core
SGW	Serving Gateway
PGW	Packet Data Network Gateway
MAC	Medium Access Control
VM	Virtual Machine
NVE	Network Virtualization Edge
C-RAN	Centralized RAN
RANaaS	Radio Access Network as a Service
RAP	Radio Access Point
3GPP	Third Generation Partnership Project
FNC	Federated Networked Cloud
VNI	Virtual Network Infrastructure
ANYaaS	Anything as a Service
CDNaaS	Content Delivery Network as a Service
SI	Service Instance
TOFaaS	Traffic Offload as a Service
L-GW	Local Gateway
MNO	Mobile Network Operator
SIG	Service Instance Graph
SIC	Service Instance Component
VIM	Virtual Infrastructure Manager

eNodeB	Evolved Node B
eNB	Evolved Node B
MEC	Multi-access Edge Computing
GaaS	Gaming as a Service
ISP	Internet Service Provider
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
HTML	Hypertext Markup Language
DASH	Dynamic Adaptive Streaming over HTTP
FOSS	Free and Open Source Software

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Brandon Butler, “AT&T hitches its Internet of Things network to Amazon’s cloud”, Oct. 2016; www.networkworld.com/article/3128846/cloud-computing/atandt-hitches-its-internet-of-things-network-to-amazon-s-cloud.html. [Προσπελάστηκε 06/2018]
- [2] IHS Markit, “IoT platforms: enabling the Internet of Things”, Mar. 2016; technology.ihs.com/576272/iot-platforms-enabling-the-internet-of-things. [Προσπελάστηκε 06/2018]
- [3] “Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021”, White Paper, Cisco, Mar. 2017.
- [4] S. Chen, J. Zhao “The requirements, challenges and technologies for 5G of the Terrestrial Mobile Telecommunication”, IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, May 2014, pp. 36-43.
- [5] J. G. Andrews *et al.*, “What Will 5G Be?”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, June 2014, pp. 1065-1082.
- [6] A. Gupta, R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies”, IEEE Access, vol. 3, July 2015, pp. 1206-1232.
- [7] R. C. Marquez, “How evolution of 5G networks”, TryUpdates, Mar. 2018; www.tryupdates.com/how-evolution-of-5g-networks. [Προσπελάστηκε 06/2018]
- [8] Qorvo, “5G RF for Dummies”, Qorvo E-books, June 2017; www.qorvo.com/design-hub/ebooks/5g-rf-for-dummies. [Προσπελάστηκε 06/2018]
- [9] “Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile”, White Paper, GSMA Intelligence, Jan. 2015.
- [10] I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. I. Sarwat, H. Dai, “A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, May 2018.
- [11] Qorvo, “Getting to 5G: Comparing 4G and 5G System Requirements”, Qorvo Blog, Sep. 2017; www.qorvo.com/design-hub/blog/getting-to-5g-comparing-4g-and-5g-system-requirements. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [12] F. Grijpink, A. Ménard, H. Sigurdsson, N. Vucevic, “The road to 5G: The inevitable growth of infrastructure cost”, McKinsey&Company, Feb. 2018; www.mckinsey.com/industries/telecommunications/our-insights/the-road-to-5g-the-inevitable-growth-of-infrastructure-cost. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [13] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, A. Gatherer, “Femtocell networks: A survey”, IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, Sep. 2008, pp. 59-67.
- [14] Qorvo, “Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1)”, May 2017; www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [15] V. Jungnickel *et al.*, “The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G”, IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, May 2014, pp. 44-51.
- [16] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, Li Su, A. V. Vasilakos, “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges”, Springer Wireless Networks, vol. 21, no. 8, Nov. 2015, pp. 2657-2676
- [17] R. J. Weiler *et al.*, “Enabling 5G backhaul and access with millimeter-waves”, IEEE 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Bologna, Italy, June 2014, pp. 1-5
- [18] Michael Dargue, “5G New Radio – Emerging Spectrum Bands”, Cartesian, May 2017; blog.cartesian.com/5g-new-radio-emerging-spectrum-bands. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [19] F. R. Farrokhi, A. Lozano, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, “Spectral efficiency of FDMA/TDMA wireless systems with transmit and receive antenna arrays”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, Jan. 2002, pp. 591–599.
- [20] A. Lozano, A. M. Tulino, “Capacity of multiple-transmit multiple-receive antenna architectures”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 48, no. 12, Dec. 2002, pp. 3117–3128.
- [21] J. Lee, “Why Your Next Wi-Fi Router Must Have MU-MIMO”, Technology Explained, MakeUseOf, June 2017; www.makeuseof.com/tag/wireless-router-mu-mimo. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [22] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, Sep. 2010, pp. 3590-3600.
- [23] Comba Telecom, “Comba 5G Massive MIMO Antenna & 3D Beamforming”, YouTube, Feb. 2018; www.youtube.com/watch?v=nBnRMNAej0. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [24] J. Nam, J.-Y. Ahn, A. Adhikary, and G. Caire, “Joint spatial division and multiplexing: Realizing massive MIMO gains with limited channel state information”, IEEE 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Mar. 2012, pp. 1-6.
- [25] CPqD, “Channel Models for Massive MIMO”, SlideShare, Dec. 2014; www.slideshare.net/cpqd/channel-models-for-massive-mimo. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [26] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems”, IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, Feb. 2014, pp. 189-195.

- [27] P. Newson, H. Parekh, H. Matharu, "Realizing 5G New Radio massive MIMO systems", 5G Waves EDN Network Blog, Jan. 2018; www.edn.com/electronics-blogs/5g-waves/4459761/Realizing-5G-New-Radio-massive-MIMO-systems. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [28] Mitsubishi Electric, "Mitsubishi Electric's New Multibeam Multiplexing 5G Technology Achieves 20Gbps Throughput", Jan. 2016.
- [29] E. Castañeda, "Perspectives on: Recent Physical Layer features for LTE Release 13, 4Q 2015", Wireless Communication Trends Blog, Oct. 2015; www.wctrends.blogspot.com/2015/10/perspectives-on-recent-physical-layer.html. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [30] Gary Xu *et al.*, "Full Dimension MIMO (FD-MIMO): Demonstrating Commercial Feasibility", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 8, June 2017, pp. 1876-1886.
- [31] Mitsubishi Electric, "Mitsubishi Electric's view on 5G (Massive MIMO for Ultra-Large Capacity)", Apr. 2016.
- [32] F. Rusek *et al.*, "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 1, Jan. 2013, pp. 40-60.
- [33] G.-K. Chang, L. Cheng, "The Benefits of Convergence Through Fiber-Wireless Integration and Networking", Springer Optical Networks, Jan. 2017.
- [34] T. Benson, A. Akella, D. Maltz, "Unraveling the complexity of network management", in Proceedings of the 6th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, ser. NSDI '09, Berkeley, CA, USA, 2009, pp. 335-348.
- [35] B. Raghavan *et al.*, "Software-defined Internet architecture: Decoupling architecture from infrastructure", in Proceedings of the 11th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, ser. HotNets-XI, New York, NY, USA: ACM, Oct 2012, pp. 43-48.
- [36] A. Ghodsi *et al.*, "Intelligent design enables architectural evolution", in Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, ser. HotNets-X. New York, NY, USA: ACM, Nov. 2011, pp. 3:1-3:6.
- [37] R. Barrett, S. Haar, and R. Whitestone, "Routing snafu causes Internet outage", Interactive Week, Apr. 1997.
- [38] K. Butler, T. Farley, P. McDaniel, J. Rexford, "A survey of BGP security issues and solutions", in Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 1, Jan. 2010, pp. 100-122.
- [39] H. Kim, N. Feamster, "Improving network management with software defined networking", Communications Magazine, IEEE, vol. 51, no. 2, Feb 2013, pp. 114-119.
- [40] D. Dungay, "Software Defined Networking (SDN) Explained", Insight Network Services/Service Providers, CommsBusiness magazine, May 2016; www.commsbusiness.co.uk. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [41] "How SDN works" www.networkurge.com/2017/06/how-sdn-works.html.
- [42] T. Koponen *et al.*, "Onix: a distributed control platform for large-scale production networks", in Proceedings of the 9th USENIX conference on Operating systems design and implementation, ser. OSDI'10, Berkeley, CA, USA: USENIX Association, Oct. 2010, pp. 1-6.
- [43] S. Jain, "B4: experience with a globally-deployed software defined wan", in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM, ser. SIGCOMM '13, New York, NY, USA: ACM, Aug. 2013, pp. 3-14.
- [44] D. Kreutz *et al.*, "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey", in Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 1, Dec. 2014, pp. 14-76.
- [45] Fujitsu Ltd., "Fujitsu Develops Cluster-Based Distributed Controller Technology to Implement Failure-Tolerant Wide-Area Software-Defined Networking", Fujitsu Laboratories Press Releases, June 2014; www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2014/0605-01.html. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [46] W. Stallings, "Software-defined networks and OpenFlow", The Internet Protocol Journal, vol. 16, no. 1, Mar. 2013.
- [47] ONF, "SDN architecture", no. 1, June 2014.
- [48] M. Jarschel *et al.*, "Interfaces, attributes, and use cases: A compass for SDN", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 6, June 2014, pp. 210-217.
- [49] W. Stallings, "Foundations of Modern Networking: Background and Motivation of Software-Defined Networks (SDN)", Addison-Wesley Professional, Oct. 2015
- [50] HueverTech, "Software Defined Network (SDN)"; www.huevertch.com/cloud/sdn.asp. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [51] ETSI GS NFV, "Network Functions Virtualisation (NFV): Architectural Framework", 002: V1.1.1, Oct. 2013.
- [52] S. Abdelwahab, B. Hamdaoui, M. Guizani, T. Znati, "Network Function Virtualization in 5G", in IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 4, April 2016, pp. 84-91.
- [53] A. Checko *et al.*, "Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 1, Sep. 2014, pp. 405-426.

- [54] E. Hernandez-Valencia, S. Izzo, B. Polonsky, "How Will NFV/SDN Transform Service Provider OPEX?", IEEE Network, vol. 29, no. 3, June 2015, pp. 60-67.
- [55] S. Noble, "Network Function Virtualization or NFV Explained", Wikibon, Apr. 2015; www.wikibon.org/wiki/v/Network_Function_Virtualization_or_NFV_Explained. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [56] NGMN, "Suggestions on Potential Solutions to C-RAN by NGMN Alliance", Jan. 2013.
- [57] P. Mell, T. Grance, "The NIST Definition of Cloud Computing", NIST, Sept. 2011.
- [58] P. Rost *et al.*, "Cloud technologies for flexible 5G radio access networks", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, Sep. 2014, pp. 68-76.
- [59] It Management Definitions on WhatIs.com; www.whatis.techtarget.com/definition/federated-cloud-cloud-federation. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [60] T. Taleb, A. Ksentini, "Follow Me Cloud: Interworking Distributed Clouds & Distributed Mobile Networks", IEEE Network, Sep. 2013, pp. 12-19.
- [61] M. Satyanarayanan, "Fundamental challenges in mobile computing", in Proceedings of the 15th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, Philadelphia, PA, USA, May 1996, pp. 1-7.
- [62] M. Satyanarayanan, P. Bahl, R. Caceres, N. Davies, "The case for VM-based cloudlets in mobile computing", IEEE Pervasive Computing, vol. 8, no. 4, Oct./Dec. 2009, pp. 14-23.
- [63] Federated Networked Cloud, Ericsson Research Blog; www.ericsson.com/research-blog/federated-networked-cloud. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [64] T. Taleb, A. Ksentini, A. Kobbane, "Lightweight Mobile Core Networks for Machine Type Communications", IEEE Access, vol. 2, special section on 5G Wireless Technologies, Sep. 2014, pp. 1128-1137.
- [65] ETSI, "Multi-access Edge Computing"; www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [66] T. Taleb, A. Ksentini, R. Jantti, "Anything as a Service for 5G Mobile Systems", IEEE Network, Oct. 2016, pp. 84-91.
- [67] S. Spagne *et al.*, "Design principles of an operator-owned highly distributed content delivery network", IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 4, Apr. 2013, pp. 132-140.
- [68] "Mobile edge computing: A key technology towards 5G", White Paper, ETSI, Sophia Antipolis, France, Sep. 2015.
- [69] M. T. Beck *et al.*, "ME-volte: Network functions for energy-efficient video transcoding at the mobile edge", in Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Intelligent Next Generation Networks (ICIN), Paris, France, Feb. 2015, pp. 38-44.
- [70] H. Chang, A. Hari, S. Mukherjee, T. V. Lakshman, "Bringing the cloud to the edge", in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Toronto, ON, Canada, May 2014, pp. 346-351.
- [71] M. A. Hoque, M. Siekkinen, J. K. Nurminen, "Energy efficient multimedia streaming to mobile devices - A survey", IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 1, 1st Quart., 2014, pp. 579-597.
- [72] P. G. Lopez *et al.*, "Edge-centric computing: Vision and challenges", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 45, no. 5, Oct. 2015, pp. 37-42.
- [73] M. Jang *et al.*, "Personal clouds: Sharing and integrating networked resources to enhance end user experiences", in Proceedings of the IEEE INFOCOM, Toronto, ON, Canada, Apr. 2014, pp. 2220-2228.
- [74] S. Davy *et al.*, "Challenges to support edge-as-a-service", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 1, Jan. 2014, pp. 132-139.
- [75] Sujata T., "The 5G Network Transformation", Intel; software.intel.com/en-us/articles/the-5g-network-transformation. [Προσπελάστηκε 07/2018]
- [76] X. Wang *et al.*, "A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges", ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET), vol. 17, no. 1, Feb. 2012, pp. 4-20.
- [77] J. Ertman *et al.*, "To Cache or Not to Cache - The 3G Case," IEEE Internet Computing, vol. 15, no. 2, Mar. 2011, pp. 27-34.
- [78] S. Woo *et al.*, "Comparison of Caching Strategies in Modern Cellular Backhaul Networks," ACM MobiSys, June 2013.
- [79] B. A. Ramanan *et al.*, "Cacheability Analysis of HTTP traffic in an Operational LTE Network," Wireless Telecommunications Symposium, Apr. 2013.
- [80] X. Wang *et al.*, "Content Dissemination by Pushing and Sharing in Mobile Cellular Networks: An Analytical Study," IEEE MASS, Las Vegas, NV, Oct. 2012.
- [81] X. Wang *et al.*, "Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, Feb. 2014, pp. 131-139.
- [82] "Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021", White Paper, Cisco, Sep. 2017.
- [83] "Growth of Online Video: The Future is Mobile", Digital Trends, NeoMobile, Sep. 2015; www.neomobile-blog.com/growth-mobile-video-2015. [Προσπελάστηκε 07/2018]

- [84] https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lambda.fb_video
- [85] <https://play.google.com/store/apps/details?id=instaplus.app.lee>
- [86] <https://play.google.com/store/apps/details?id=lc insta.save.insta.download>
- [87] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.popularapp.videodownloaderforinstagram>
- [88] <https://play.google.com/store/apps/details?id=fb.video.downloader>
- [89] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.giannz.videodownloader>
- [90] <https://play.google.com/store/apps/details?id=facebookvideodownloader.videodownloaderforfacebook>
- [91] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.studio1467.videodownloader.fast>
- [92] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.softin.studio.videoandphotodownloader>
- [93] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cb.mvideod>
- [94] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.znstudio.insta.download>
- [95] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.smartapps.videodownloaderforfacebook>
- [96] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.getfilefrom.browserdownloader>
- [97] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ksmobile.cb>
- [98] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.fvd>
- [99] <https://play.google.com/store/apps/details?id=video.downloader.videodownloader>
- [100] <https://do-tube-video-audio-youtube.en.uptodown.com/android>
- [101] <https://youtube-dl.en.uptodown.com/android>
- [102] <https://arktube.en.aptoide.com/>
- [103] <https://dentex-youtube-downloader.en.aptoide.com/>
- [104] <https://www.getjar.com/categories/tool-apps/tubemate-youtube-video-download-940738>
- [105] <https://f-droid.org/packages/org.schabi.newpipe>
- [106] <https://videoder.en.uptodown.com/android>
- [107] <https://keepvid.en.uptodown.com/android>
- [108] <https://instube-youtube-downloader.en.aptoide.com/>
- [109] <https://snaptube.en.aptoide.com/>