

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και Ανάλυση Εφαρμογής Τεχνολογίας
Δικτύων Καθορισμένων από Λογισμικό σε Δίκτυα
Πέμπτης Γενιάς»



Του φοιτητή
Τσοτσώνη Αθανάσιου
Αρ. Μητρώου: 113805

Επιβλέπων
Γιακουμής Άγγελος
Λέκτορας

Ημερομηνία

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη και Ανάλυση Εφαρμογής Τεχνολογίας Δικτύων Καθορισμένων από Λογισμικό
σε Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς
Κωδικός Δ.Ε. 21184
Όνοματεπώνυμο φοιτητή Τσοτσώνης Αθανάσιος
Όνοματεπώνυμο εισηγητή Γιακουμής Άγγελος
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 15-03-2021
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. ...

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Τσοτσώνη Αθανάσιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Τώρα που υπάρχει μεγάλη ανάγκη για εύρος ζώνης, κινητικότητα και ταχύτητες σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, αρχίζουν πλέον να γίνονται άχρηστες κάποιες από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Η πλημμύρα που υπάρχει στην αγορά έξυπνων συσκευών, tablet και πολλών άλλων συσκευών δικτύου δημιουργούν μεγαλύτερες απαιτήσεις δικτύου. Το μέγιστο φορτίο δικτύου καταγράφεται ως έχει, φυσική μετάδοση δεδομένων όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας, διαδικτυακά παιχνίδια και μια σειρά από υπηρεσίες που απαιτούν “σερβίρισμα” ακόμα και εν κινήσει. Επίσης ποιότητα και εμπειρία εξυπηρέτησης για τους χρήστες οφείλουν να λειτουργούν πολύ καλά σε πολυσύχναστες περιοχές και σε ώρες αιχμής. Καθώς κατανοούμε ότι η μετάβαση από τα υπάρχοντα δίκτυα σε δίκτυα πέμπτης γενιάς έχει καταστεί απαραίτητη, ερευνητικές ομάδες από διαφορετικά πανεπιστήμια και εταιρείες τηλεπικοινωνιών έχουν αναλάβει αυτό το δύσκολο έργο για την κάλυψη των αναγκών και των στόχων των δικτύων 5G.

Περίληψη

Το 5G ήρθε να εκφράσει την ανθρώπινη ανάγκη για σύνδεση με όλους, με τα πάντα, οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Αυτό δημιουργεί πολλές προκλήσεις όσον αφορά την απαιτούμενη χωρητικότητα, τη χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές κρίσιμες στο χρόνο, τη διαχείριση του τεράστιου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, την ετερογένεια των συστημάτων, τις απαιτούμενες υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων για επαυξημένη πραγματικότητα και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, τη διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων, την ενεργειακή απόδοση, καθώς επίσης και τις ανησυχίες για την ασφάλεια και την ιδιωτική ζωή. Ως εκ τούτου, πρέπει να διερευνηθούν νέοι αρχιτεκτονικοί σχεδιασμοί, καθώς οι τρέχουσες υποδομές κινητής επικοινωνίας και Διαδικτύου δεν είναι σε θέση να χειριστούν αυτές τις αυστηρές απαιτήσεις εξαιτίας της ακαμψίας τους, της εξάρτησης από το υλικό και της στατικής διαμόρφωσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση της αρχιτεκτονικής SDN (Software Defined Networks). Η ανάγκη της νέας αρχιτεκτονικής δικτύων, οι βασικές της αρχές καθώς και τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής είναι μερικά από τα ζητήματα που θα εξετάσουμε. Στο δεύτερο κεφάλαιο συναντάμε τα Δίκτυα 5^{ης} Γενιάς. Παρουσιάζονται τα κίνητρα που μας οδήγησαν στην ανάπτυξη συστημάτων 5^{ης} γενιάς, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται καθώς και σενάρια αρχιτεκτονικής. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην αρχιτεκτονική NFV και τα σενάρια χρήσης της. Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας αναλύουμε τους τρόπους που μπορούν να συνυπάρξουν SDN και δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Εκτενής περιγραφή γίνεται στις διαφορετικές αρχιτεκτονικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε. Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές των δικτύων 5^{ης} γενιάς παρουσιάζονται σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας.

«Study and Analysis of Software Defined Network Application in Fifth Generation Networks»

«Tsotsonis Athanasios»

Abstract

5G has come to cover the need that has been created in humans for uninterrupted connection with everyone. This creates many challenges. Some of these are: the capacity of the network, the delay of data transmission, the management of the very large number of devices connected to the Internet, as well as the energy efficiency. For this reason, new architectures have to be sought to build the new generation of wireless networks, since today's mobile and Internet infrastructure can't cope with stringent requirements due to their rigidity, material dependency and static configuration.

The first chapter provides an analysis of the SDN (Software Defined Networks) architecture. The need for new network architecture, its basic principles as well as the advantages of architecture are some of the issues we will address. In the second chapter we meet the 5th Generation Networks. The motivations that led us to the development of 5th generation systems, the technologies used as well as architectural scenarios are presented. Particular emphasis is given to the NFV architecture and its usage scenarios. In the third chapter of the work we analyze the ways in which SDNs and 5th generation networks can coexist. Extensive description is given to the different architectures that can be used. The fourth chapter analyzes the conclusions we were led to. Challenges and future prospects of 5th generation networks are presented in this last chapter of the paper.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Γιακουμή Άγγελο για την δυνατότητα την οποία μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο σύγχρονο, ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα όπως τα δίκτυα 5ης γενιάς.

Δεν μπορώ να παραλείψω τους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένεια μου και τους φίλους μου, των οποίων η προσφορά όλα αυτά τα χρόνια είναι πιθανότατα και η σημαντικότερη όλων.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----|
| Περίληψη | iv |
| Abstract | v |
| Ευχαριστίες | vi |
| Περιεχόμενα | vii |
| Κατάλογος Σχημάτων | ix |
| Κατάλογος Πινάκων | ix |
| Συντομογραφίες..... | x |
| Κεφάλαιο 1ο: Software Defined Networks | 11 |
| 1.1 Εισαγωγή και Ορισμός | 11 |
| 1.2 Περιορισμοί των Σημερινών Τεχνολογιών Δικτύωσης | 12 |
| 1.3 Η Ανάγκη για μια Νέα Αρχιτεκτονική Δικτύων | 14 |
| 1.4 Αρχιτεκτονική SDN..... | 15 |
| 1.4.1 Βασικές Αρχές Της Αρχιτεκτονικής SDN..... | 16 |
| 1.5 Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας SDN | 17 |
| 1.6 SDN Controllers | 18 |
| 1.7 Ασφάλεια SDN..... | 21 |
| 1.8 Αρχές Ασφάλειας | 22 |
| Κεφάλαιο 2ο: Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G)..... | 24 |
| 2.1 Εισαγωγή | 24 |
| 2.1.1 Κίνητρα ανάπτυξης συστημάτων 5 ^{ης} γενιάς..... | 24 |
| 2.1.2 Απαιτήσεις συστημάτων 5 ^{ης} γενιάς..... | 25 |
| 2.1.3 Η εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογιών 5ης Γενιάς..... | 26 |
| 2.2 Τεχνολογίες συστημάτων 5 ^{ης} γενιάς..... | 28 |
| 2.3 Σενάρια αρχιτεκτονικής..... | 31 |
| 2.3.1 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου (network densification)..... | 32 |
| 2.3.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου | 34 |
| 2.4 Network Function Virtualization (NFV)..... | 34 |
| 2.4.1 Αρχιτεκτονική NFV | 35 |
| 2.4.2 Σενάρια Χρήσης NFV | 38 |
| 2.4.3 Οφέλη και προκλήσεις υιοθέτησης της NFV τεχνολογίας..... | 39 |
| Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση Εφαρμογής SDN Τεχνολογίας Σε Δίκτυα 5G | 40 |
| 3.1 Εισαγωγή | 40 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.2 | OpenRoads | 41 |
| 3.3 | OpenRadio | 42 |
| 3.4 | SoftCell | 43 |
| 3.5 | CellSDN..... | 44 |
| 3.6 | SoftRAN | 46 |
| 3.7 | ADRENALINE | 47 |
| 3.8 | DOCOMO..... | 49 |
| 3.9 | SK-Telecom | 50 |
| 3.10 | CONTENT..... | 51 |
| 3.11 | OpenRAN | 52 |
| Κεφάλαιο 4ο: | Μελλοντικές Προκλήσεις και Προοπτικές..... | 55 |
| 4.1 | Συμπεράσματα | 55 |
| 4.2 | Προοπτικές Δικτύων 5 ^{ης} Γενιάς..... | 55 |
| 4.3 | Προκλήσεις και Προτάσεις Αντιμετώπισης..... | 56 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 58 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1 - α) Παραδοσιακή Αρχιτεκτονική β)SDN Αρχιτεκτονική..... | 12 |
| Σχήμα 2 – Επισκόπηση Αρχιτεκτονικής SDN..... | 15 |
| Σχήμα 3 – Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps..... | 29 |
| Σχήμα 4 – Σύγκριση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του δικτύου 4G και του 5G..... | 29 |
| Σχήμα 5 – Σύγκριση δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη..... | 30 |
| Σχήμα 6 – Γράφημα Radar που απεικονίζει τις δυνατότητες του 5G σε σύγκριση με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G..... | 31 |
| Σχήμα 7 – Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης με χρήση Network Densification..... | 33 |
| Σχήμα 8 – Μοντέλο υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους και αντιστοίχιση τους στην αρχιτεκτονική του NFV | 35 |
| Σχήμα 9 – Περιβάλλον εικονικών δικτύων | 36 |
| Σχήμα 10 – Η αρχιτεκτονική ενός NFV περιβάλλοντος εργασίας | 38 |
| Σχήμα 11 – Παραδείγματα Network Function Virtualization | 39 |
| Σχήμα 12 – W-SDN με το NFV και παράδειγμα ανοιχτής καινοτομίας | 40 |
| Σχήμα 13 – OpenRoads και ασύρματη αρχιτεκτονική OpenFlow | 42 |
| Σχήμα 14 – Στα εσωτερικά του OpenRadio BS με διαφορετικά είδη υπολογιστικών πυρήνων..... | 43 |
| Σχήμα 15 – Αρχιτεκτονική δικτύου SoftCell | 44 |
| Σχήμα 16 – Cellular SDN (CellSDN) | 45 |
| Σχήμα 17 – Αρχιτεκτονική SoftRAN | 46 |
| Σχήμα 18 – Αρχιτεκτονική..... | 48 |
| Σχήμα 19 – Αρχιτεκτονική DOCOMO στο RAN | 49 |
| Σχήμα 20 – Αρχιτεκτονική Phanto-cell με διαχωρισμό C/U επιπέδων..... | 50 |
| Σχήμα 21 – Πλατφόρμα 5G βασισμένη σε λογισμικό από την εταιρεία SK-Telecom..... | 51 |
| Σχήμα 22 – Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική Content | 52 |
| Σχήμα 23 – Επισκόπηση αρχιτεκτονικής του OpenRAN | 53 |
| Σχήμα 24 – Στρατηγική ελέγχου SDN και προγραμματιζόμενο σχέδιο | 54 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1 – Σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών των ελεγκτών SDN ανοιχτού κώδικα | 20 |
|--|----|

Συντομογραφίες

| | |
|-------|------------------------------|
| Δ.Ε. | Διπλωματική Εργασία |
| ΔΙΠΑΕ | Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος |
| Π.Ε. | Πτυχιακή Εργασία |

Κεφάλαιο 1ο: Software Defined Networks

1.1 Εισαγωγή και Ορισμός

Τα δίκτυα υπολογιστών μπορούν να χωριστούν σε τρία επίπεδα λειτουργικότητας:

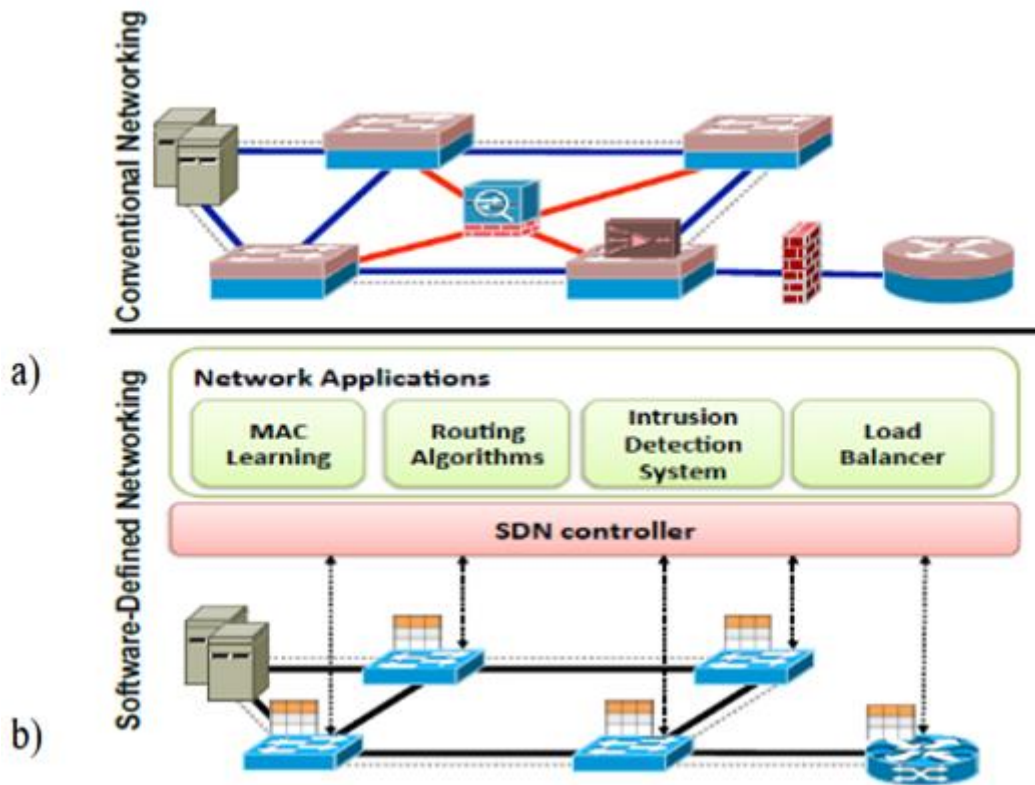
- Το επίπεδο δεδομένων που αντιστοιχεί στις συσκευές δικτύου που είναι υπεύθυνες για την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων.
- Ένα επίπεδο ελέγχου που αντιπροσωπεύει τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση των πινάκων διέλευσης του επιπέδου δεδομένων.
- Ένα σχέδιο διαχείρισης που περιλαμβάνει υπηρεσίες λογισμικού, όπως εργαλεία που βασίζονται σε SNMP, που χρησιμοποιούνται για τον απομακρυσμένο έλεγχο και τη διαμόρφωση λειτουργιών διαχείρισης.

Εν ολίγοις, μια πολιτική δικτύου ορίζεται σε επίπεδο ελέγχου, το επίπεδο ελέγχου καθορίζει την πολιτική και το επίπεδο δεδομένων υλοποιεί την ενέργεια στέλνοντας δεδομένα σε αυτό. Στα παραδοσιακά δίκτυα IP, τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων είναι στενά διασυνδεδεμένα, ενσωματωμένα στον ίδιο τον εξοπλισμό δικτύου και ολόκληρη η δομή είναι αποκεντρωμένη. Αυτό ήταν σημαντικό για το σχεδιασμό του Διαδικτύου στις αρχές, επειδή φαινόταν ο καλύτερος τρόπος προκειμένου να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα του δικτύου, ο οποίος ήταν ένας κρίσιμος σχεδιαστικός στόχος. Στην πραγματικότητα, αυτή η προσέγγιση ήταν πολύ αποτελεσματική όσον αφορά τις επιδόσεις του δικτύου, με μια αρκετά γρήγορη αύξηση του ρυθμού γραμμής και της πυκνότητας των πορτών. Παρόλα αυτά, το αποτέλεσμα είναι μια εξαιρετικά σύνθετη και σχετικά στατική αρχιτεκτονική, και είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο τα παραδοσιακά δίκτυα είναι δύσκολα και πολυσύνθετα στη διαχείριση και τον έλεγχό τους. Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό από το Open Networking Foundation η τεχνολογία Software Defined Networking (SDN) είναι μια φρέσκια και αναδυόμενη αρχιτεκτονική δικτύου, όπου ο έλεγχος είναι διαχωρισμένος από το δίκτυο προώθησης και είναι προγραμματιζόμενος. Αυτός ο διαχωρισμός του ελέγχου, που ήταν προηγουμένως στενά συνδεδεμένος σε συγκεκριμένες συσκευές δικτύου (δρομολογητές, μεταγωγείς), δίνει την ευελιξία σε προσπελάσιμες υπολογιστικές συσκευές την δυνατότητα της αφαίρεσης της υποκείμενης υποδομής για εφαρμογές και υπηρεσίες δικτύου, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπίσουν το δίκτυο ως μία λογική ή εικονική οντότητα. Ο ορισμός ενός δικτύου καθοριζόμενο από λογισμικό αποτελείται από τέσσερις βασικούς πυλώνες:

- a. Τα επίπεδα ελέγχου (control planes) αποσυνδέονται από τα επίπεδα δεδομένων (data planes). Η λειτουργία ελέγχου αφαιρείται από συσκευές δικτύου και μετατρέπεται σε απλά (πακέτα) στοιχεία προώθησης.
- b. Οι αποφάσεις προώθησης βασίζονται στη ροή. Μια ροή ορίζεται από ένα σύνολο τιμών από τα πεδία των πακέτων, που λειτουργούν ως κριτήριο αντιστοίχισης (φίλτρου) και ένα σύνολο ενεργειών (οδηγίες). Στο πλαίσιο SDN / OpenFlow (πρωτόκολλο το οποίο εξηγείται παρακάτω), μια ροή είναι μια ακολουθία πακέτων μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού. Σε όλα τα πακέτα ροής εφαρμόζονται ίδιες πολιτικές εξυπηρέτησης στις συσκευές προώθησης. Η έννοια της ροής επιτρέπει την σύμπτυξη της συμπεριφοράς διαφορετικών τύπων συσκευών δικτύου σε μια κοινή συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένων δρομολογητών, μεταγωγέων, τείχος προστασίας και 2 middleboxes. Ο προγραμματισμός ροής επιτρέπει τεράστια ευελιξία, όπου περιορίζεται μόνο στις δυνατότητες που έχουν οι πίνακες ροής που εφαρμόζονται.
- c. Η λογική ελέγχου υφίσταται σε μια εξωτερικό παράγοντα του δικτύου, τον λεγόμενο SDN ελεγκτή ή το Network Operating System (NOS). Το NOS είναι μια πλατφόρμα λογισμικού η οποία φέρει λογισμικό διακομιστών και διαθέτει τους κύριους πόρους και τις αφαιρέσεις για να γίνει πιο εύκολος ο

προγραμματισμός των συσκευών προώθησης βάσει μιας κεντροποιημένης αφηρημένης προβολής δικτύου. Έτσι ο σκοπός της είναι αν όχι ίδιο παρόμοιος με τον σκοπό ενός παραδοσιακού λειτουργικού συστήματος

- d. Στο δίκτυο ο προγραμματισμός γίνεται μέσω εφαρμογών λογισμικού που εκτελούνται στο επίπεδο εφαρμογής. Αυτό με την σειρά του αλληλεπιδρά με τις υποκείμενες συσκευές επιπέδου δεδομένων, που αποτελεί ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό της SDN τεχνολογίας, που θεωρείται ως η κύρια αξία της



Σχήμα 1 - α) Παραδοσιακή Αρχιτεκτονική β)SDN Αρχιτεκτονική

1.2 Περιορισμοί των Σημερινών Τεχνολογιών Δικτύωσης

Η κάλυψη των σημερινών απαιτήσεων και αναγκών των δικτύων είναι σχεδόν αδύνατη με τις παραδοσιακές υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Αντιμετωπίζοντας τους επίπεδους ή μειωμένους προϋπολογισμούς για εξοπλισμό και υπηρεσίες, τα τμήματα IT των εταιρειών προσπαθούν να εκμεταλλευτούν στο μέγιστο τα δίκτυά τους χρησιμοποιώντας διάφορα εργαλεία διαχείρισης σε επίπεδο συσκευών και μη αυτόματες διαδικασίες. Οι μεταφορές δεδομένων έρχονται αντιμέτωποι με παρόμοιες προκλήσεις, με τη ανάγκη για κινητικότητα και εύρος ζώνης να εκρήγνυται. Τα κέρδη είναι σε δεύτερη μοίρα λόγω της κλιμάκωσης του κόστους εξοπλισμού και των σταθερών ή φθίνων εσόδων. Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων δεν σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να πληρούν τις τεράστιες απαιτήσεις των σημερινών χρηστών και των επιχειρήσεων. Παρακάτω αναλύονται οι περιορισμοί που συναντούν οι σχεδιαστές δικτύων του σήμερα :

- **Πολυπλοκότητα που οδηγεί στον περιορισμό εξέλιξης:** Η τεχνολογία των δικτύων ακόμα και σήμερα αποτελείται από διακεκριμένα σύνολα πρωτοκόλλων που έχουν σχεδιαστεί για να συνδέουν αξιόπιστα τους χρήστες ανεξάρτητα από τις αποστάσεις, τις ταχύτερες συνδέσεων του καθενός και τις τοπολογίες. Προκειμένου να ανταποκριθεί η βιομηχανία των δικτύων στις επιχειρηματικές και τεχνικές ανάγκες που έχει η

τελευταία δεκαετία, έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα δικτύωσης με σκοπό τις υψηλότερες επιδόσεις και την μεγαλύτερη αξιοπιστία, την ακόμα ευρύτερη σύνδεση και την αυστηρότερη ασφάλεια. Όσο εξελίσσονται τα πρωτόκολλα, τείνουν να ορίζονται μεμονωμένα. Ωστόσο, σχεδιάζονται για να επλύουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και χωρίς το πλεονέκτημα δυνατότητας βασικής αφαίρεσης. Αποτέλεσμα αυτού ένας από τους κύριους περιορισμούς των σημερινών δικτύων είναι η πολυπλοκότητα. Ένα σύντομο παράδειγμα, για να προσθέσουμε ή να μετακινήσουμε οποιαδήποτε συσκευή δικτύου, το τμήμα IT οφείλει να διαμορφώσει όλους τους διακόπτες, δρομολογητές, τείχη προστασίας, πύλες ελέγχου ταυτότητας ιστού κλπ. και να ενημερώσει τα ACLs (Access Control Lists), τα VLANs (Virtual Local Area Networks), αλλά και το QoS (Quality of Service). Επιπροσθέτως πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν ότι η τοπολογία του δικτύου, το μοντέλο του κάθε switch και η έκδοση λογισμικού παίζουν ρόλο. Εξ αιτίας λοιπόν αυτής της πολυπλοκότητας τα σημερινά δίκτυα είναι σχετικά στατικά καθώς η τεχνολογία πληροφοριών προσπαθεί να μειώσει αισθητά τον κίνδυνο διακοπής της υπηρεσίας. Η στατικότητα των δικτύων βρίσκεται σε πλήρη αντίθεση με τη δυναμική φύση του περιβάλλοντος διακομιστή. Η εικονικοποίηση των διακομιστών έχει αυξήσει σημαντικά τον αριθμό των χρηστών που απαιτούν συνδεσιμότητα δικτύου και μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα αλλάζοντας τις υποθέσεις που μπορούμε να κάνουμε σχετικά με την φυσική τοποθεσία των χρηστών. Πριν από αυτή την εικονικοποίηση, οι εφαρμογές βρισκόντουσαν σε ένα μόνο διακομιστή. Η ανταλλαγή πληροφοριών κυκλοφορίας γινόταν με επιλεγμένους πελάτες. Σήμερα, όλες οι εφαρμογές διανέμονται σε πολλές εικονικές μηχανές (VMs), που με την σειρά τους ανταλλάσσουν ροές κυκλοφορίας μεταξύ τους. Με τις εικονικών μηχανών βελτιστοποιείται και εξισορροπείται ο φόρτος εργασίας των διακομιστών. Εκτός από την υιοθέτηση τεχνολογιών εικονικοποίησης, οι περισσότερες επιχειρήσεις του σήμερα διαθέτουν ένα δίκτυο IP για φωνή, δεδομένα και βίντεο. Ενώ τα υπάρχοντα δίκτυα παρέχουν διαφοροποιημένα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας για ποικίλες εφαρμογές, η παροχή αυτών των πόρων είναι μη αυτόματη. Το εκάστοτε τμήμα IT πρέπει να ρυθμίσει ξεχωριστά τον εξοπλισμό του κάθε κατασκευαστή και να προσαρμόσει παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης δικτύου και την ποιότητα υπηρεσίας. Είναι και ένας λόγος που δεν προτιμάται η πολυτυπία στην εξοπλισμό δικτύου. Επίσης λόγω της στατικής φύσης του, το δίκτυο δεν μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά στην αλλαγή της κυκλοφορίας των εφαρμογών και των απαιτήσεων των χρηστών.

- **Αντιφατικές πολιτικές:** Για να εφαρμοστεί μια πολιτική σε επίπεδο δικτύου, υπάρχει περίπτωση το τμήμα IT να χρειαστεί να επαναρυθμίσει χιλιάδες συσκευές και μηχανισμούς λειτουργίας και ελέγχου. Για παράδειγμα, κάθε φορά που υλοποιείται και προστίθεται μια νέα εικονική μηχανή, μπορεί να χρειαστούν ώρες ή ακόμη και ημέρες για να μετασηματιστούν εκ νέου οι υπηρεσίες ACLs (Λίστα Ελέγχου Πρόσβασης) σε ολόκληρο το δίκτυο. Η πολυπλοκότητα των σημερινών δικτύων δυσκολεύει αρκετά το IT να εφαρμόζει ένα σταθερό σύνολο πρόσβασης, ασφάλειας, ποιότητας υπηρεσίας και άλλων πολιτικών σε όλο και περισσότερους χρήστες κινητής τηλεφωνίας, γεγονός που αφήνει την επιχείρηση ευάλωτη σε παραβιάσεις της ασφάλειας, μη συμμόρφωση με κανονισμούς και άλλες αρνητικές συνέπειες.
- **Αδυναμία κλιμάκωσης:** Καθώς οι απαιτήσεις στα κέντρα δεδομένων (Data Centers) αυξάνονται γρήγορα, πρέπει και το δίκτυο προκειμένου να καλύψει αυτές τις απαιτήσεις να αναπτυχθεί αντίστοιχα. Ωστόσο, το δίκτυο καθίσταται αρκετά πιο περίπλοκο με την προσθήκη εκατοντάδων ή χιλιάδων συσκευών δικτύου που πρέπει να ρυθμιστούν και να διαχειριστούν.

Οι μεγάλες εταιρείες του χώρου όπως το Google, το Yahoo και το Meta, αντιμετωπίζουν ακόμα πιο δύσκολες προκλήσεις κλιμάκωσης. Οι συγκεκριμένοι πάροχοι υπηρεσιών χρησιμοποιούν αλγόριθμους μεγάλης κλίμακας, παράλληλης επεξεργασίας και συναφή σύνολα δεδομένων σε ολόκληρη την ομάδα υπολογιστών τους. Όσο αυξάνεται το εύρος των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες, ο αριθμός των υπολογιστικών στοιχείων έχει φτάσει σε έναν τεράστιο αριθμό και οι ανταλλαγές δεδομένων μεταξύ των υπολογιστικών κόμβων αγγίζουν ακόμα και τα Petabytes. Αυτές οι εταιρείες κολοσσοί χρειάζονται τα λεγόμενα μεγάλης κλίμακας δίκτυα που παρέχουν υψηλής απόδοσης συνδεσιμότητα έναντι χαμηλού κόστους, μεταξύ εκατοντάδων χιλιάδων, ή και εκατομμυρίων φυσικών εξυπηρετητών. Αυτή η κλιμάκωση δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί με χειροκίνητη διαμόρφωση. Προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικοί οι πάροχοι, πρέπει να διαθέτουν συνεχώς καλύτερες υπηρεσίες στους πελάτες τους. Το γεγονός αυτό περιπλέκει ακόμα περισσότερο τον σκοπό τους, καθώς το δίκτυο πρέπει να εξυπηρετεί ομάδες χρηστών μέσω διαφορετικών εφαρμογών και να καλύπτει διαφορετικές ανάγκες απόδοσης. Οι βασικές λειτουργίες

είναι σχετικά απλές στην υλοποίηση, όπως η καθοδήγηση των ροών κίνησης του χρήστη για την παροχή εξατομικευμένου ελέγχου απόδοσης ή της παράδοσης κατά παραγγελία, είναι πολύ σύνθετες για την υλοποίηση με τα υπάρχοντα δίκτυα. Απαιτούνται επίσης εξειδικευμένες συσκευές, αυξάνοντας τα κεφαλαιουχικά και επιχειρησιακά κόστη καθώς αυξάνεται και το χρονικό διάστημα για την εφαρμογή καινοτόμων υπηρεσιών.

- **Εξάρτηση από τους προμηθευτές υλικολογισμικού :** Οι πάροχοι και οι επιχειρήσεις προσπαθούν να εφαρμόσουν νέες δυνατότητες και υπηρεσίες με γρήγορο ρυθμό στις μεταβαλλόμενες επιχειρηματικές ανάγκες και τις απαιτήσεις των χρηστών. Παρόλα αυτά, η ικανότητά τους να ανταποκρίνονται παρεμποδίζεται από τους κύκλους των προϊόντων εξοπλισμού των προμηθευτών, οι οποίοι κυμαίνονται σε τρία ή περισσότερα χρόνια. Η έλλειψη τυποποιημένων, ανοικτών διεπαφών περιορίζει την ικανότητα των παρόχων να προσαρμόζουν το δίκτυο στα δικά τους περιβάλλοντα.

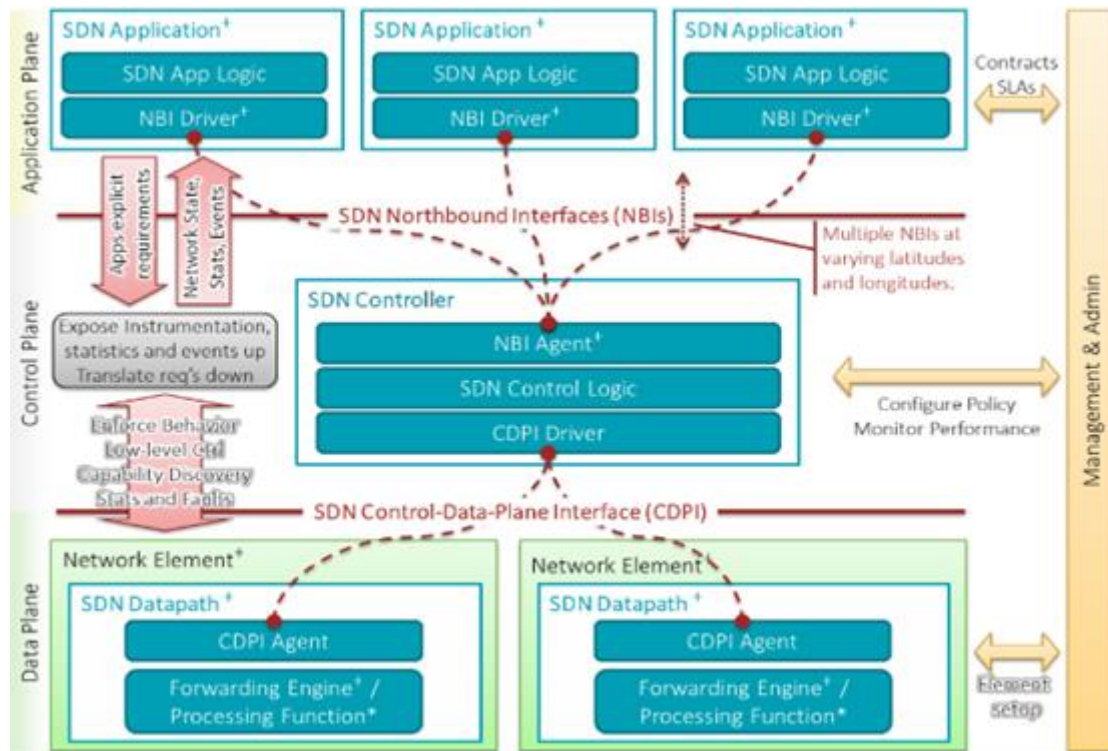
1.3 Η Ανάγκη για μια Νέα Αρχιτεκτονική Δικτύων

Με τον ρυθμό που αυξάνονται οι κινητές συσκευές καθώς και οι εφαρμογές που περιέχουν, η εικονικοποίηση διακομιστών και η εμφάνιση cloud υπηρεσιών συγκαταλέγονται στις τάσεις που οδηγούν τη βιομηχανία δικτύωσης να επανεξετάσει τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων και συχνά πλέον να τις αποφύγει. Πολλά συμβατικά δίκτυα είναι ιεραρχικά, βασισμένα σε επίπεδα αποτελούμενα από switches τοποθετημένα σε δενδρική δομή. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είχε νόημα όταν κυριαρχούσε το μοντέλο πελάτη-διακομιστή, αλλά μια τέτοια στατική αρχιτεκτονική δεν ανταποκρίνεται επαρκώς στη δυναμική υπολογιστική και τις ανάγκες αποθήκευσης των σημερινών επιχειρηματικών κέντρων δεδομένων, πανεπιστημιούπολεων και παρόχων. Ορισμένες από τις βασικές τάσεις υπολογιστικής που οδήγησαν στην ανάγκη για μια νέα αρχιτεκτονική δικτύου είναι:

- **Η άνοδος των υπηρεσιών cloud:** Οι επιχειρήσεις εντυπωσιάστηκαν με τις δημόσιες και ιδιωτικές υπηρεσίες cloud. Αποτέλεσμα αυτού είναι η άνευ προηγουμένου ανάπτυξη αυτών των υπηρεσιών. Τα τιμήματα των εταιρικών επιθυμιών να είναι ελκυστικά όσον αφορά την πρόσβαση τους σε εφαρμογές, υποδομές και άλλους πόρους IT κατόπιν αιτήματος ή και απευθείας. Η εφαρμογή των cloud υπηρεσιών πρέπει να υλοποιείται σε περιβάλλον αυξημένων δυνατοτήτων ασφάλειας, συμμόρφωσης και ελέγχου. Η παροχή υπηρεσιών αυτοεξυπηρέτησης, είτε σε ιδιωτικό είτε σε δημόσιο cloud, απαιτεί ελαστική κλιμάκωση υπολογιστικών, αποθηκευτικών πόρων και πόρων δικτύου, και με μία κοινή σουίτα εργαλείων.
- **Η εμπνευματοποίηση του IT:** Οι χρήστες χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο τις προσωπικές κινητές συσκευές τους, όπως smartphones, tablets και notebooks στο εργασιακό τους περιβάλλον. Έτσι είναι απαραίτητη η πρόσβαση στο εταιρικό δίκτυο. Το τμήμα IT υφίσταται μεγάλη πίεση να φιλοξενήσει αυτές τις προσωπικές συσκευές, προστατεύοντας παράλληλα τα εταιρικά δεδομένα και την πνευματική ιδιοκτησία και εκπληρώντας τις εντολές συμμόρφωσης.
- **Αλλαγή πρότυπων κίνησης:** Στο εσωτερικό του κέντρου δεδομένων των εταιρειών, τα πρότυπα κίνησης έχουν αλλάξει σε μεγάλο βαθμό. Σε αντίθεση με τις εφαρμογές πελάτη-διακομιστή όπου ο κύριος όγκος της επικοινωνίας υπάρχει μεταξύ ενός πελάτη και ενός διακομιστή, οι σημερινές εφαρμογές έχουν πρόσβαση σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων και διακομιστές δημιουργώντας μια κίνηση του τύπου east-west πριν επιστρέψουν τα δεδομένα στον τελικό χρήστη, σε αντίθεση με το κλασικό μοντέλο κίνησης north-south. Ταυτόχρονα, οι χρήστες αλλάζουν τα πρότυπα δικτυακής κίνησης όταν έχουν πρόσβαση σε εταιρικό περιεχόμενο και εταιρικές εφαρμογές από οποιονδήποτε τύπο συσκευής (συμπεριλαμβανομένων των δικών τους). Επίσης, πολλοί διαχειριστές εταιρικών κέντρων δεδομένων επιχειρούν να υλοποιήσουν ένα μοντέλο υπολογιστικής χρησιμότητας, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει ένα ιδιωτικό cloud, ένα δημόσιο cloud ή κάποιο μέγιστο και των δύο, οδηγώντας σε επιπρόσθετη επισκευσιμότητα σε όλο το δίκτυο ευρείας περιοχής.
- **"Big Data" σημαίνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης:** Η διαχείριση των σημερινών δεδομένων big-data προϋποθέτει μαζική παράλληλη επεξεργασία σε χιλιάδες εξυπηρετητές, οι οποίοι μπορούν να χρειάζονται άμεσες συνδέσεις μεταξύ τους. Καθώς υπάρχει άνοδος των μεγάλων συνόλων δεδομένων (big datasets) τροφοδοτείται η συνεχής ζήτηση για πρόσθετη χωρητικότητα στα Data Centers.

1.4 Αρχιτεκτονική SDN

Ο στόχος της αρχιτεκτονικής δικτύου SDN είναι να παρέχει ανοικτές διεπαφές που θα επιτρέπουν την ανάπτυξη λογισμικού που θα μπορεί να ελέγχει, τη συνδεσιμότητα που παρέχεται από ένα σύνολο δικτυακών πόρων και τη ροή της κίνησης του δικτύου μέσω αυτών, καθώς επίσης θα εξετάζει και την πιθανή τροποποίηση της κίνησης που μπορεί να πραγματοποιηθεί στο δίκτυο. Στο Σχήμα 2 παρατηρούμε μια γραφική αναπαράσταση των αρχιτεκτονικών στοιχείων και των αλληλεπιδράσεών τους.



Σχήμα 2 – Επισκόπηση Αρχιτεκτονικής SDN

Όπως διακρίνουμε από το Σχήμα 2, στην αρχιτεκτονική SDN έχουμε το επίπεδο δεδομένων, ελέγχου και εφαρμογής. Στο κάτω μέρος, το επίπεδο δεδομένων αποτελείται από στοιχεία δικτύου, των οποίων τα SDN Datapaths παρουσιάζουν τις ικανότητές τους μέσω ενός πράκτορα Control-Data-Plane Interface (CDPI Agent). Στην κορυφή, στο επίπεδο εφαρμογής, υπάρχουν οι SDN εφαρμογές (SDN Applications) και γνωστοποιούν τις απαιτήσεις τους μέσω των NorthBound Interface οδηγών (NBI Drivers). Στη μέση όπου βρίσκεται το επίπεδο ελέγχου, υπάρχει ο SDN ελεγκτής (SDN Controller) που ο ρόλος του είναι να αναλύει αυτές τις απαιτήσεις και να ασκεί έλεγχο χαμηλού επιπέδου στα δεδομένα SDN Datapaths, παρέχοντας παράλληλα σχετικές πληροφορίες έως τις SDN εφαρμογές. Το επίπεδο διαχείρισης και διαχειριστή στα δεξιά, είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση των στοιχείων του δικτύου, την ανάθεση του SDN Datapath στον SDN ελεγκτή και τη διαμόρφωση πολιτικών που ορίζουν το πεδίο ελέγχου του δικτύου και παρέχονται στον SDN ελεγκτή ή στην SDN εφαρμογή. Αυτή η αρχιτεκτονική δικτύου μπορεί να συνυπάρχει με ένα δίκτυο εκτός SDN, ειδικά για το σκοπό της μετάβασης σε ένα πλήρως ενεργοποιημένο SDN. Η λίστα που ακολουθεί, περιλαμβάνει τον ορισμό και την επεξήγηση των αρχιτεκτονικών στοιχείων του Σχήματος 2.

- **SDN Application (SDN App):** Οι SDN εφαρμογές είναι προγράμματα τα οποία επικοινωνούν ρητά, άμεσα και προγραμματιστικά με τις απαιτήσεις του δικτύου και ορίζουν μια επιθυμητή συμπεριφορά δικτύου στον SDN

ελεγκτή μέσω των NBIs. Μια SDN εφαρμογή αποτελείται από μία λογική SDN εφαρμογή και από έναν ή περισσότερους πράκτορες NBI (NBI Agents). Οι εφαρμογές αυτές έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν οι ίδιες ένα στρώμα (layer) εξαντλημένου ελέγχου δικτύου, προσφέροντας ένα ή περισσότερα NBI(s) υψηλότερου επιπέδου μέσω των αντίστοιχων NBI πρακτόρων.

- **SDN Controller:** Ο SDN ελεγκτής είναι μια λογικά κεντροποιημένη οντότητα και είναι υπεύθυνος για :
 - i. τη μετάφραση και ανάλυση των απαιτήσεων από το στρώμα SDN εφαρμογής μέχρι τα SDN Datapaths
 - ii. την παροχή διάφορων εφαρμογών SDN με μια αφηρημένη άποψη του δικτύου (που μπορεί να περιλαμβάνει στατιστικά στοιχεία και γεγονότα). Ένας SDN ελεγκτής αποτελείται από έναν ή περισσότερους πράκτορες NBI, τη λογική ελέγχου SDN (SDN Control Logic) και τον οδηγό CDPI (CDPI Driver).
- **SDN Datapath:** Το SDN Datapath είναι μια λογική συσκευή δικτύου, η οποία εκθέτει την ορατότητα και τον απρόσκοπτο έλεγχο των δυνατοτήτων επεξεργασίας δεδομένων και την προώθησή τους. Η αναπαράσταση αυτή μπορεί να περιλαμβάνει το σύνολο ή ένα υποσύνολο των φυσικών πόρων του υποστρώματος. Ένα SDN Datapath αποτελείται από έναν πράκτορα CDPI και ένα σύνολο από μηχανές προώθησης κίνησης και μηδενικές ή περισσότερες λειτουργίες επεξεργασίας κίνησης. Αυτές οι μηχανές και λειτουργίες μπορεί να περιλαμβάνουν, απλή προώθηση μεταξύ των εξωτερικών διαπαφών του datapath ή των εσωτερικών λειτουργικών επεξεργασίας ή τερματισμού της κίνησης. Ένα ή περισσότερα δεδομένα των SDN Datapaths μπορεί να περιέχονται σε ένα ενιαίο (φυσικό) στοιχείο δικτύου. Ένας ολοκληρωμένος φυσικός συνδυασμός πόρων επικοινωνίας ο οποίος διαχειρίζεται σαν μονάδα. Ένα SDN Datapath επίσης ορίζεται ως ένα σύνολο από φυσικά στοιχεία δικτύου. Αυτός ο λογικός ορισμός ούτε προδιαγράφει ούτε αποκλείει λεπτομέρειες της εφαρμογής όπως είναι η λογική προς φυσική χαρτογράφηση, η διαχείριση των κοινών φυσικών πόρων, η εικονικοποίηση του SDN Datapath, η λειτουργικότητα με τη μη SDN δικτύωση ή η λειτουργικότητα επεξεργασίας δεδομένων.
- **SDN Control to Data-Plane Interface (CDPI):** Το SDN CDPI είναι η διαπαφή που ορίζεται μεταξύ ενός SDN ελεγκτή και ενός SDN Datapath, που παρέχει τις παρακάτω δυνατότητες : (i) προγραμματιστικό έλεγχο όλων των λειτουργιών προώθησης (ii) έκθεση δυνατοτήτων, (iii) αναφορά στατιστικών στοιχείων και (iv) ειδοποίηση για τα συμβάντα.
- **SDN Northbound Interfaces (NBI):** Τα SDN NBIs είναι διασυνδέσεις μεταξύ SDN εφαρμογών και SDN ελεγκτών και συνήθως παρέχουν αφηρημένες προβολές δικτύου και επιτρέπουν την άμεση έκφραση της συμπεριφοράς και των απαιτήσεων του δικτύου. Αυτό μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε επίπεδο αφαίρεσης (γεωγραφικό πλάτος) και σε διαφορετικά σύνολα λειτουργικότητας (γεωγραφικό μήκος).
- **Interface Drivers και Agents:** Κάθε διαπαφή υλοποιείται από ένα ζευγάρι οδηγών-πρακτόρων, όπου ο πράκτορας αντιπροσωπεύει την "southern" πλευρά, την πλευρά του πυθμένα ή της υποδομής και ο οδηγός αντιπροσωπεύει την "northern" πλευρά, την πλευρά της κορυφής ή της εφαρμογής.
- **Management και Admin:** Το επίπεδο διαχείρισης καλύπτει τις στατικές εργασίες οι οποίες μπορούν να χειριστούν καλύτερα εκτός του επιπέδου εφαρμογών, το επίπεδο ελέγχου και δεδομένων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την διαχείριση επιχειρηματικών σχέσεων μεταξύ παρόχου και πελάτη, την ανάθεση των πόρων σε πελάτες, την ρύθμιση του φυσικού εξοπλισμού, τον συντονισμό προσβασιμότητας και διαπιστευτηρίων μεταξύ λογικών και φυσικών προσώπων, και την ρύθμιση παραμέτρων bootstrapping. Κάθε επιχειρηματική οντότητα έχει τις δικές της μοναδικές οντότητες διαχείρισης. Η επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων διαχείρισης υπερβαίνει το πεδίο αυτής της αρχιτεκτονικής SDN. Ένας στόχος του SDN είναι να αναλάβει πολλά καθήκοντα διαχείρισης γνωστά από το παλαιό δίκτυο εφαρμόζοντάς τα στο CDPI.

1.4.1 Βασικές Αρχές Της Αρχιτεκτονικής SDN

Οι βασικές αρχές αυτής της αρχιτεκτονικής SDN είναι:

- Αποσύνδεση του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων. Αυτή η βασική αρχή απαιτεί χωριστά τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων. Ωστόσο, είναι αυτονόητο ότι ο έλεγχος πρέπει να πραγματοποιείται μέσα στο επίπεδο δεδομένων. Ο οδηγός CDPI μεταξύ του ελεγκτή SDN και του στοιχείου δικτύου (Network Element) ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο SDN ελεγκτής να μπορεί να μεταβιβάσει σημαντική λειτουργικότητα στο στοιχείο δικτύου, διατηρώντας ταυτόχρονα επίγνωση της κατάστασης του στοιχείου δικτύου.
- Λογικά κεντροποιημένος έλεγχος. Σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο, ένας κεντροποιημένος ελεγκτής έχει μια ευρύτερη προοπτική των πόρων που βρίσκονται υπό τον έλεγχό του και εξ αιτίας αυτού μπορεί να πάρει καλύτερες αποφάσεις για τον τρόπο με τον οποίο θα τις χρησιμοποιήσει. Αυτό δεν σημαίνει ότι ο ελεγκτής είναι

φυσικά κεντρικοποιημένος. Για λόγους απόδοσης, κλιμάκωσης και /ή αξιοπιστίας, ο λογικά κεντρικοποιημένος SDN ελεγκτής μπορεί να διανεμηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε σε αρκετές περιπτώσεις φυσικός ελεγκτής και κεντρικοποιημένος ελεγκτής συνεργάζονται για τον έλεγχο του δικτύου και την εξυπηρέτηση των εφαρμογών.

- Έκθεση αφηρημένων πόρων και κατάστασης σε εξωτερικές εφαρμογές δικτύου. Οι εφαρμογές μπορούν να υπάρχουν σε οποιοδήποτε επίπεδο αφαίρεσης ή λεπτομερούς χαρακτήρα, με χαρακτηριστικά που συχνά περιγράφονται ως διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη, με την ιδέα ότι ο βορράς σημαίνει και μεγαλύτερο βαθμό αφαίρεσης. Επειδή μια διεπαφή που εκθέτει τους πόρους και την κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί διεπαφή ελεγκτή, η διάκριση μεταξύ εφαρμογής και ελέγχου δεν είναι ακριβής. Όπως οι ελεγκτές έτσι και οι εφαρμογές ενδέχεται να συσχετίζονται με άλλες εφαρμογές ως ομότιμες ή ως πελάτες και διακομιστές. Με την αρχιτεκτονική SDN, οι εφαρμογές αντιδρούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου, προσφέροντας δυναμική διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσιών χωρίς υποστήριξη δικτύου, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα στα οποία το δίκτυο και οι υπηρεσίες του, (όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο, η ροή πολυμέσων) δεν προσφέρουν έναν (δυναμικό) τρόπο έκφρασης του πλήρους φάσματος απαιτήσεων των χρηστών, όπως για παράδειγμα η απόδοση, η καθυστέρηση και η παραλλαγή καθυστέρησης ή η διαθεσιμότητα. Οι κεφαλίδες πακέτων μπορούν να κωδικοποιήσουν αιτήματα προτεραιότητας, αλλά οι πάροχοι δικτύου συνήθως δεν εμπιστεύονται τις σημάνσεις επισκαμμότητας των χρηστών. Επομένως, ορισμένα δίκτυα προσπαθούν να συμπεράνουν τις απαιτήσεις των χρηστών από μόνο τους (πχ. μέσω ανάλυσης της κυκλοφορίας η οποία ενδέχεται να συνεπάγεται πρόσθετο κόστος και μερικές φορές οδηγεί σε εσφαλμένη ταξινόμηση). Το SDN προσφέρει τη δυνατότητα για τον χρήστη να καθορίζει πλήρως τις ανάγκες του στο πλαίσιο μιας αξιόπιστης σχέσης που μπορεί να αποκτηθεί. Επίσης τα παραδοσιακά δίκτυα δεν εκθέτουν πληροφορίες και κατάσταση του δικτύου στις εφαρμογές που τις χρησιμοποιούν. Χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση SDN, οι SDN εφαρμογές μπορούν να παρακολουθήσουν την κατάσταση δικτύου και να προσαρμοστούν ανάλογα.

1.5 Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας SDN

Το μεγαλύτερο στοιχείο που καλείται να κερδίσει η δικτύωση που καθορίζεται από το λογισμικό (SDN) είναι ότι θα συγκεντρώσει και θα απλοποιήσει τον έλεγχο της διαχείρισης του δικτύου των επιχειρήσεων. Αλλά η ερώτηση που τίθεται είναι η εξής: ποια είναι τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα των SDN δικτύων; Διάφοροι πωλητές ισχυρίζονται διαφορετικές απόψεις, αλλά τα πιο συχνά αναφερόμενα πλεονεκτήματα των SDN είναι η προγραμματισσιμότητα της κυκλοφορίας δεδομένων, η μεγαλύτερη ευελιξία, η δυνατότητα δημιουργίας πολιτικής εποπτείας δικτύου και η εφαρμογή αυτοματοποίησης δικτύου. Η υπόσχεση του SDN είναι η δυνατότητα να επιτρέπεται στα δίκτυα να συμβαδίζουν με την ταχύτητα της εξέλιξης. Ακολουθεί μια λίστα με ορισμένα από τα ειδικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας SDN:

- **Κεντρική τροφοδοσία δικτύου.** Τα δίκτυα SDN παρέχουν μια κεντρική προβολή ολόκληρου του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ευκολότερη η συγκέντρωση της διαχείρισης και της παροχής υπηρεσιών. Για παράδειγμα, περισσότερα VLANs γίνονται μέρος των φυσικών LANs, δημιουργώντας ένα ισχυρό δεσμό μεταξύ συνδέσεων και εξαρτήσεων. Απελευθερώνοντας τα επίπεδα ελέγχου από τα επίπεδα δεδομένων, το SDN μπορεί να επιταχύνει την παροχή υπηρεσιών και να παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στην παροχή τόσο των εικονικών όσο και των φυσικών συσκευών δικτύου από μια κεντρική τοποθεσία.
- **Ολιστική διαχείριση επιχειρήσεων.** Τα εταιρικά δίκτυα πρέπει να δημιουργήσουν νέες εφαρμογές και εικονικές μηχανές κατόπιν αιτήματος για να ικανοποιήσουν νέες αιτήσεις επεξεργασίας, όπως αυτές για big data. Το SDN επιτρέπει στους διαχειριστές IT να πειραματιστούν με τη διαμόρφωση του δικτύου χωρίς να επηρεάζουν το δίκτυο. Το SDN υποστηρίζει επίσης τη διαχείριση των φυσικών και των εικονικών switches και των συσκευών δικτύου από έναν κεντρικό ελεγκτή, κάτι που δεν μπορεί να γίνει με το SNMP. Το SDN παρέχει ένα ενιαίο σύνολο διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (Application programming interfaces- APIs) για τη δημιουργία μιας ενιαίας κονσόλας διαχείρισης για φυσικές και εικονικές συσκευές.
- **Αύξηση της Ασφάλειας.** Ένα από τα πλεονεκτήματα της ασφάλειας των SDN που απευθύνεται περισσότερο στους διαχειριστές IT είναι η κεντρικοποιημένη ασφάλεια. Η εικονικοποίηση έχει κάνει τη διαχείριση του δικτύου πιο δύσκολη. Με τις εικονικές μηχανές που πηγαioέργονται ως μέρος των φυσικών συστημάτων, είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστούν με συνέπεια οι πολιτικές του τείχους προστασίας και φιλτραρίσματος περιεχομένου. Όταν προστίθενται πολυπλοκότητες όπως η εξασφάλιση συσκευών BYOD (Bring Your Own Device), το πρόβλημα ασφαλείας είναι διογκωμένο. Ο SDN ελεγκτής παρέχει ένα κεντρικό σημείο ελέγχου για

τη συνεπή διανομή των πληροφοριών ασφάλειας και πολιτικής σε ολόκληρη την εταιρεία. Ο κεντρικός έλεγχος ασφάλειας σε μια οντότητα, όπως ο SDN ελεγκτής, έχει το μειονέκτημα να δημιουργεί ένα κεντρικό σημείο επίθεσης. Το SDN παρόλα αυτά, μπορεί αποτελεσματικά να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση της ασφάλειας σε ολόκληρη την επιχείρηση, εάν εφαρμοστεί με σωστό και ασφαλή τρόπο.

- Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Η διοικητική αποτελεσματικότητα, οι βελτιώσεις στη χρήση του δικτύου, ο καλύτερος έλεγχος της εικονικοποίησης και άλλα οφέλη θα πρέπει να έχουν ως αποτέλεσμα εξοικονομήσεις σε ζητήματα λειτουργιών. Είναι ακόμη νωρίς να αποδειχθεί η πραγματική απόδειξη εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους, το SDN θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να μειώσει το συνολικό λειτουργικό κόστος και να οδηγήσει σε εξοικονόμηση πόρων, καθώς αρκετά από τα θέματα ρουτίνας της διαχείρισης του δικτύου μπορούν να συγκεντρωθούν και να αυτοματοποιηθούν.
- Εξοικονόμηση υλικού και μειωμένες κεφαλαιουχικές δαπάνες. Η υιοθέτηση του SDN δίνει νέα ζωή σε υπάρχουσες συσκευές δικτύου. Το SDN διευκολύνει τη βελτιστοποίηση του εμπορεύσιμου υλικού. Το υπάρχον υλικό μπορεί να επαναποθετηθεί χρησιμοποιώντας τις οδηγίες από τον SDN ελεγκτή και το λιγότερο δαπανηρό υλικό μπορεί να αναπτυχθεί σε μεγαλύτερο βαθμό, καθώς οι νέες συσκευές ουσιαστικά γίνονται *white box switches* με όλη την ευφυΐα να βρίσκεται στο επίκεντρο του ελεγκτή.
- Αφαίρεση cloud. Το Cloud computing είναι εδώ για να παραμείνει. Εξελίσσεται διαρκώς σε μια ενοποιημένη υποδομή. Αν αφαιρεθούν οι cloud πόροι χρησιμοποιώντας τη τεχνολογία SDN, είναι ευκολότερο να ενοποιηθούν μεταξύ τους. Τα στοιχεία δικτύωσης που αποτελούν μαζικές πλατφόρμες κέντρου δεδομένων μπορούν να διαχειρίζονται από τον SDN ελεγκτή.
- Εγγυημένη παράδοση περιεχομένου. Η δυνατότητα διαμόρφωσης και ελέγχου της κίνησης δεδομένων είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας SDN. Η ικανότητά του SDN να κατευθύνει και να αυτοματοποιεί την κυκλοφορία δεδομένων καθιστά ευκολότερη την εφαρμογή της ποιότητας των υπηρεσιών (QoS) για τις μεταδόσεις VoIP και των πολυμέσων. Η ροή βίντεο υψηλής ποιότητας είναι ευκολότερη, επειδή το SDN βελτιώνει την ανταπόκριση του δικτύου για να εξασφαλίσει μια άψογη εμπειρία χρήστη. Τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα των SDN διαφέρουν από δίκτυο σε δίκτυο, αλλά υπάρχουν οφέλη από την αφαίρεση δικτύου και την ευελξία που προσφέρουν στην διαχείριση του δικτύου και την αυτοματοποίηση. Ο καλύτερος τρόπος για να αξιολογηθεί στο έπαικρο το SDN είναι η αξιολόγηση των συστατικών στοιχείων του δικτύου και της υποδομής, για να διαπιστωθεί εάν το SDN μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση θεμάτων όπως η διαθεσιμότητα πόρων, η εικονικοποίηση και η ασφάλεια του δικτύου. Το SDN δεν είναι η σωστή προσέγγιση για κάθε περιβάλλον δικτύου, αλλά όταν υπάρχουν σαφή οφέλη, το SDN μπορεί να είναι η μόνη λύση που χρειάζεται για να βελτιστοποιηθεί το κέντρο δεδομένων του δικτύου.

1.6 SDN Controllers

Ένας SDN ελεγκτής, είναι μια πλατφόρμα λογισμικού όπου αναπτύσσονται όλες οι εφαρμογές ελέγχου δικτύου. Οι SDN ελεγκτές περιέχουν συνήθως ένα σύνολο μονάδων που παρέχουν διαφορετικές υπηρεσίες δικτύου για τις αναπτυγμένες εφαρμογές, όπως δρομολόγηση, πολυδιάστατη μετάδοση, ασφάλεια, έλεγχο πρόσβασης, διαχείριση εύρους ζώνης, ποιότητα υπηρεσιών, βελτιστοποίηση επεξεργαστή και αποθήκευσης, διαχείριση της πολιτικής. Υπάρχει ένα σύνολο από SDN controllers που έχουν αναπτυχθεί με διαφορετικούς σκοπούς και οι πιο διαδεδομένοι είναι οι εξής:

- **NOX Controller** : Ο NOX ελεγκτής είναι μέρος της πρώτης γενιάς ελεγκτών OpenFlow, που αναπτύσσονται ταυτόχρονα μαζί με το πρότυπο OpenFlow. Καθώς είναι ο παλαιότερος OpenFlow ελεγκτής, θεωρείται πολύ σταθερός από τη βιομηχανία και την κοινότητα ανοιχτού κώδικα και εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό σε περιβάλλον παραγωγής και εκπαίδευσης. Ο ελεγκτής NOX έχει δύο εκδόσεις. Η πρώτη είναι, το NOX-Classic, το οποίο υλοποιήθηκε σε C++ και Python και υποστηρίζει την ανάπτυξη εφαρμογής ελέγχου δικτύου χρησιμοποιώντας και τις δύο γλώσσες. Αυτός ο δηλωσιακός σχεδιασμός αποδείχθηκε αργότερα λιγότερο αποδοτικός σε σχέση με τα σχέδια που βασίζονται σε μία μόνο γλώσσα, καθώς κατέληξε σε κάποια ασυνέπεια όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τις διεπαφές. Ενδεχομένως λόγω αυτών των ζητημάτων, το NOX-Classic δεν υποστηρίζεται πλέον και αντικαταστάθηκε από τη δεύτερη έκδοση, που ονομάζεται σκέτο NOX ή "new NOX". Η δεύτερη αυτή έκδοση του NOX υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C++, υποστηρίζοντας υπηρεσίες δικτύου εφαρμογών που αναπτύχθηκαν με την ίδια γλώσσα χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προγραμματισμού. Ο κώδικας NOX αναδιοργανώθηκε επίσης για να παρέχει καλύτερη απόδοση

και προγραμματισμό σε σύγκριση με το NOX-Classic, εισάγοντας υποστήριξη για τις εκδόσεις 1.0 και 1.3 του πρωτοκόλλου OpenFlow. Ένας σύγχρονος SDN ελεγκτής NOX, συνιστάται όταν οι χρήστες :

- i. γνωρίζουν τη γλώσσα προγραμματισμού C++
 - ii. είναι πρόθυμοι να χρησιμοποιήσουν εγκαταστάσεις και σημασιολογίες χαμηλού επιπέδου του πρωτοκόλλου OpenFlow
 - iii. χρειάζονται απόδοση επιπέδου παραγωγής
- **POX Controller :** Το POX είναι μια εφαρμογή Python του ελεγκτή NOX, που δημιουργήθηκε για να είναι μια πλατφόρμα για την ταχεία ανάπτυξη και τη δημιουργία πρωτοτύπων του λογισμικού ελέγχου δικτύου. Αξιοποιώντας την ευελξία της Python, το POX χρησιμοποιήθηκε ως βάση για πολλά έργα SDN, εφαρμόζοντας πρωτότυπα και αποσφαλμάτωση εφαρμογών SDN, υλοποιώντας εικονικοποίηση δικτύου και σχεδιάζοντας νέα μοντέλα ελέγχου και προγραμματισμού. Ο POX ελεγκτής έχει επίσης επίσημη υποστήριξη από την κοινότητα NOX. Το POX υποστηρίζει μόνο την έκδοση 1.0 του πρωτοκόλλου OpenFlow και παρέχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις εφαρμογές Python που αναπτύσσονται στο NOX-Classic. Ωστόσο, δεδομένου ότι η Python είναι μια ερμηνευμένη αντί της μεταγλωττισμένης γλώσσας, το POX δεν παρέχει απόδοση σε επίπεδο παραγωγής όπως κάνει ο ελεγκτής NOX. Επομένως, ένας SDN ελεγκτής POX συνιστάται όταν οι χρήστες :
 - i. γνωρίζουν τη γλώσσα προγραμματισμού Python
 - ii. δεν ενδιαφέρονται πολύ για την απόδοση του ελεγκτή
 - iii. χρειάζονται μια ταχεία πλατφόρμα SDN για πρωτότυπα και πειραματισμούς, π.χ. για σκοπούς έρευνας, πειραματισμού ή επίδειξης
 - iv. αναζητούν έναν εύκολο τρόπο να μάθουν για τις πλατφόρμες ελέγχου SDN (π.χ. για εκπαιδευτικούς σκοπούς).
 - **Floodlight Controller :** Ο ελεγκτής SDN Open Floodlight είναι ένας ελεγκτής OpenFlow βασισμένος σε Java που υποστηρίζεται από μια κοινότητα προγραμματιστών ανοικτού κώδικα που περιλαμβάνει έναν αριθμό μηχανικών από τα Big Switch Networks. Το Floodlight αποτελεί τον πυρήνα των εμπορικών προϊόντων SDN Big Switch Networks και δοκιμάζεται και βελτιώνεται ενεργά από τη βιομηχανία και την κοινότητα προγραμματιστών. Το Floodlight δημιουργήθηκε ως απόρροια από τον ελεγκτή Beacon Java OpenFlow, ο πρώτος ελεγκτής που βασίζεται στην Java, για να εφαρμόσει πλήρεις λειτουργίες πολυμορφίας και διαλειτουργικότητας χρόνου εκτέλεσης. Παρόλο που διαθέτει αρκετά εκτεταμένη τεκμηρίωση, το Floodlight έχει μια δυσκολία στην εκμάθησή του, λόγω της μεγάλης σειράς λειτουργιών που υλοποιήθηκαν. Ο ελεγκτής Floodlight συνιστάται όταν οι χρήστες
 - i. γνωρίζουν τη γλώσσα προγραμματισμού Java
 - ii. χρειάζονται απόδοση επιπέδου παραγωγής και επιθυμούν να έχουν υποστήριξη από τη βιομηχανία
 - iii. σκοπεύουν να αναπτύξουν τον SDN ελεγκτή σε ένα κέντρο δεδομένων cloud που χρησιμοποιεί το σύστημα OpenStack.
 - **OpenDaylight (ODL) Controller :** Το OpenDaylight είναι SDN ελεγκτής βασισμένο σε Java που έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα προγραμματισμού δικτύου για το SDN. Δημιουργήθηκε ως έργο συνεργασίας του ιδρύματος Linux το 2013 και σκοπεύει να δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την καινοτομία στο περιβάλλον SDN. Το έργο OpenDaylight υποστηρίζεται από μια κοινοπραξία εταιρειών δικτύου όπως η Cisco, η Ericsson, η IBM, η Brocade και η VMware. Το OpenDaylight βασίζεται επίσης στον ελεγκτή Beacon Java OpenFlow και παρέχει απόδοση επιπέδου παραγωγής με υποστήριξη για διαφορετικά southbound πρωτόκολλα, όπως το OpenFlow 1.0 και 1.3, το OVSDB και το NETCONF. Παρέχει επίσης ενοποίηση με το σύστημα διαχείρισης του cloud OpenStack. Ο ελεγκτής OpenDaylight προτείνει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο, καθορίζοντας σαφώς τα southbound και northbound APIs και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με τις εξωτερικές επιχειρηματικές εφαρμογές και τις εσωτερικές υπηρεσίες δικτύου. Ένα μειονέκτημα του OpenDaylight είναι η αρκετή δυσκολία εκμάθησής λόγω της αρχιτεκτονικής του πολυπλοκότητας και του μεγάλου συνόλου υπηρεσιών που είναι ενσωματωμένες στον ελεγκτή. Συνιστάται, ωστόσο, όταν οι χρήστες :
 - i. γνωρίζουν τη γλώσσα προγραμματισμού Java
 - ii. χρειάζονται απόδοση επιπέδου παραγωγής και επιθυμούν να έχουν υποστήριξη από τη βιομηχανία
 - iii. σκοπεύουν να αναπτύξουν τον ελεγκτή SDN σε ένα κέντρο δεδομένων cloud που χρησιμοποιεί το σύστημα OpenStack όπου οι εφαρμογές προορισμού απαιτούν σπονδυλωτή υλοποίηση μέσω ενός αρχιτεκτονικού

σχεδιασμού και πρέπει να ενσωματωθούν σε επιχειρηματικές εφαρμογές τρίτων, καθώς και σε ετερογενείς υποκείμενες υποδομές δικτύου.

- **Ryu Framework :** Το Ryu είναι ένα SDN πλαίσιο που βασίζεται σε Python και παρέχει ένα μεγάλο σύνολο υπηρεσιών δικτύου μέσω ενός σαφώς καθορισμένου API, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη νέων εφαρμογών διαχείρισης και ελέγχου δικτύων για πολλαπλές συσκευές δικτύου.

Διαφορετικά από τους SDN ελεγκτές NOX και POX, οι οποίοι υποστηρίζουν μόνο πρωτόκολλα OpenFlow στο southbound API τους, το Ryu υποστηρίζει διάφορα πρωτόκολλα για τη διαχείριση συσκευών δικτύου, όπως το OpenFlow (εκδόσεις 1.0 και 1.2 -1.4), το Netconf και το OF-config. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του πλαισίου Ryu είναι η ενσωμάτωση με το σύστημα διαχείρισης OpenStack cloud, επιτρέποντας μεγάλες αναπτύξεις σε κέντρα δεδομένων cloud. Παρόλο που το Ryu εφαρμόστηκε με τη χρήση της Python, η εκμάθησή του είναι μέτριας δυσκολίας, καθώς παρέχει ένα μεγάλο σύνολο στοιχείων και διεπαφών υπηρεσιών που πρέπει να κατανοηθούν πριν να ενσωματωθούν σε νέες εφαρμογές. Ως αποτέλεσμα, το πλαίσιο Ryu SDN συνιστάται όταν οι χρήστες

- γνωρίζουν τη γλώσσα προγραμματισμού Python
- δεν ενδιαφέρονται πολύ για την απόδοση του ελεγκτή και οι εφαρμογές ελέγχου απαιτούν τις εκδόσεις 1.3 ή 1.4 του πρωτοκόλλου OpenFlow ή μερικά από τα άλλα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα και
- σκοπεύουν να αναπτύξουν τον SDN ελεγκτή σε ένα κέντρο δεδομένων cloud που χρησιμοποιεί το σύστημα OpenStack.

| | NOX | POX | Ryu | FloodLight | ODL |
|----------------------------|----------|--------|--------------|------------|----------|
| Language | C++ | Python | Python | Java | Java |
| Performance | High | Low | Low | High | High |
| Distributed | No | No | Yes | No | Yes |
| OpenFlow | 1.0 | 1.0 | 1.0, 1.2-1.4 | 1.0, 1.3 | 1.0, 1.3 |
| Multi-tenant Cloud | No | No | Yes | Yes | Yes |
| Learning Difficulty | Moderate | Easy | Moderate | Steep | Steep |

Πίνακας 1 – Σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών των ελεγκτών SDN ανοιχτού κώδικα

1.7 Ασφάλεια SDN

Παρόλο που η τεχνολογία SDN επιτρέπει νέες εφαρμογές δικτύου, η ασφάλεια έχει γίνει μια σημαντική ανησυχία καθώς δεν είναι ακόμη ενσωματωμένη στην αρχιτεκτονική SDN. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι διάφορες επιθέσεις ασφαλείας μπορούν να γίνουν κατά των SDN μέσω διαφόρων στοιχείων των δικτύων αυτών. Καθώς η φιλοσοφία SDN βασίζεται στο λογισμικό, τα τρωτά σημεία του κώδικα έχουν επίσης σημαντικό αντίκτυπο στην ασφάλεια των SDN. Επιπλέον, το SDN προσφέρει άφθονες δυνατότητες για την εφαρμογή των ελέγχων ασφαλείας μέσω των εφαρμογών ενός SDN ελεγκτή. Τέτοιες λύσεις λογισμικού μπορούν να επιτρέψουν πιο ευέλικτους ελέγχους ασφαλείας σε δυναμικά και εικονικά περιβάλλοντα δικτύου με αποτέλεσμα να παρέχουν ένα πιο πρακτικό μέσο για τον έλεγχο της ασφαλείας του λογισμικού. Κάθε ένα από τα συστατικά της αρχιτεκτονικής ενός SDN είναι δυνατόν να περιλαμβάνει πιθανές ευπάθειες, με αποτέλεσμα κάποιος επιτιθέμενος να μπορεί να το εκμεταλλευτεί και να προκαλέσει κακό στο δίκτυο αυτό. Προκειμένου να γίνει μία συστηματική αναγνώριση του μοντέλου απειλών που επηρεάζουν το SDN, κάθε απειλή χωρίζεται σε τρία στοιχεία:

1. **Πηγή απειλής:** Μία πηγή η οποία προκαλεί την ευπάθεια.
2. **Πηγή ευπάθειας:** Ένα στοιχείο SDN όπου δημιουργείται το θέμα ευπάθειας.
3. **Δράση απειλής:** Μία ενέργεια με την οποία πραγματοποιείται η απειλή. Με την σειρά τους, οι πηγές των απειλών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:
 - Ένα μη-SDN στοιχείο: Σύστημα που δεν αποτελεί μέρος της αρχιτεκτονικής SDN.
 - Ένα παραπλανητικό SDN στοιχείο: Μη εξουσιοδοτημένο σύστημα SDN μέσα σε ένα δίκτυο SDN που ασχολείται με μη εξουσιοδοτημένες δραστηριότητες.
 - Μία κακόβουλη SDN εφαρμογή: Μία εφαρμογή που έχει τεθεί σε κίνδυνο ή ένας χρήστης ο οποίος ασχολείται με κακόβουλες δραστηριότητες χρησιμοποιώντας την εφαρμογή.
 - Ένας κακόβουλος ελεγκτής: Ελεγχόμενος ελεγκτής ή ένας χρήστης ο οποίος ασχολείται με κακόβουλες δραστηριότητες στον ελεγκτή.
 - Ένα κακόβουλο στοιχείο δικτύου: Παραβιασμένο στοιχείο δικτύου ή ένας χρήστης ο οποίος ασχολείται με κακόβουλες δραστηριότητες χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο στοιχείο δικτύου.
 - Μία κακόβουλη κονσόλα διαχείρισης: Μία κονσόλα διαχείρισης που έχει τεθεί σε κίνδυνο ή ένας χρήστης ο οποίος ασχολείται με κακόβουλες δραστηριότητες χρησιμοποιώντας την κονσόλα αυτή. Οποιοδήποτε από τα παρακάτω αρχιτεκτονικά συστατικά του SDN μπορεί να αντιστοιχεί σε πηγές ευπάθειας.

–Μία εφαρμογή

–Ένας ελεγκτής

–Ένα στοιχείο δικτύου

–Μία κονσόλα διαχείρισης

–Η northbound διεπαφή

–Η east/westbound διεπαφή

–Η southbound διεπαφή

–Η διεπαφή διαχείρισης

Οι νέες λειτουργίες δικτύου μπορούν να εισάγουν σφάλματα και κινδύνους που “ανοίγουν την πόρτα” σε απειλές που δεν υπήρχαν προηγουμένως ή είναι πιο σοβαρές από πριν. Εκτός από τους παραδοσιακούς φορείς επίθεσης για ροές κυκλοφορίας, μεταγωγείς, διαχειριστικούς σταθμούς,

ανάκτηση και διάγνωση σφαλμάτων, οι ελεγκτές και οι επικοινωνίες που σχετίζονται με το επίπεδο του ελεγκτή καταλήγουν σε νέα ζητήματα ασφάλειας που είναι ειδικά για το SDN.

- **Κεντροποιημένος έλεγχος :** Ο κεντροποιημένος έλεγχος (δηλαδή η κατακεντρωμένη αλλά συντονισμένη λειτουργία ελέγχου) εκθέτει ένα μεγάλο πλεονέκτημα στους επιτιθέμενους. Οι επιτιθέμενοι ενδέχεται να επιχειρήσουν να χειραγωγήσουν τις κοινές λειτουργίες δικτύου καθώς όλες ελέγχονται από έναν κεντρικό ελεγκτή, με αποτέλεσμα να έχουν τον έλεγχο ολόκληρου του δικτύου και την δυνατότητα να εξαπατήσουν ή να θέσουν σε κίνδυνο τον ελεγκτή.
- **Προγραμματισμός :** Νέοι τύποι απειλών προκύπτουν λόγω της πρόσβασης στον προγραμματισμό που προσφέρει το SDN σε πελάτες που είναι συνήθως ξεχωριστές οργανωτικές ή επιχειρηματικές οντότητες. Αυτό το νέο επιχειρησιακό μοντέλο παρουσιάζει απαιτήσεις που δεν υπάρχουν σε κλειστούς διοικητικούς τομείς όσον αφορά την προστασία της ακεραιότητας του συστήματος των δεδομένων από “τρίτους” και των ανοικτών διεπαφών.
- ❖ **Απομόνωση κυκλοφορίας και πόρων :** Οι φορείς πρέπει να διασφαλίζουν ότι η διαχείριση των επιχειρήσεων και οι πληροφορίες ελέγχου μιας οντότητας σε πραγματικό χρόνο, είναι πλήρως απομονωμένες από αυτές όλων των άλλων. Το στοιχείο αυτό επαρκεί στο υφιστάμενο ζήτημα ασφάλειας της κυκλοφορίας και στην απομόνωση πόρων, προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή και η κακή χρήση. Λόγω του νέου επιχειρησιακού μοντέλου για το SDN, ενδέχεται να υπάρξουν πρόσθετες δυναμικές αλληλεπιδράσεις που θα εισάγουν περαιτέρω απαιτήσεις για απομόνωση, προκειμένου να ικανοποιηθούν διαφορετικά 25 SLA, θέματα ιδιωτικής διεθνοδοδότησης κλπ.
- ❖ **Εμπιστοσύνη μεταξύ εφαρμογών από “τρίτους” και του ελεγκτή :** Η δυνατότητα προγραμματισμού είναι ένα δίκυπο μαχαίρι, καθώς από την μία προσφέρει ευελξία για την υλοποίηση νέων καινοτόμων εφαρμογών που βασίζονται στην αγορά, από την άλλη όμως ανοίγει την πόρτα σε κακόβουλες και εύλωτες εφαρμογές. Ο έλεγχος ταυτότητας και τα διαφορετικά επίπεδα εξουσιοδότησης πρέπει να εφαρμόζονται στο σημείο καταχώρησης της αίτησης στον ελεγκτή, προκειμένου να περιοριστεί η έκθεση του ελεγκτή.
- ❖ **Προστασία ασφάλειας διασύνδεσης στο A-CPI :** Πέρα από την επικοινωνία με εφαρμογές μέσω A-CPI, ένας ελεγκτής μπορεί να ελέγχεται είτε από έναν ελεγκτή ανώτερου στρώματος είτε μπορεί να λειτουργεί σε συνδυασμό με έναν άλλο ελεγκτή στο ίδιο ιεραρχικό επίπεδο. Η έλλειψη προστασίας σε αυτές τις διεπαφές μπορεί να οδηγήσει σε κακόβουλες επιθέσεις κατά του SDN. Επομένως, τα χαρακτηριστικά ασφαλείας και τα σημεία ελέγχου λειτουργίας πρέπει να καθοριστούν για τη διασφάλιση των A-CPIs.
- **Ενσωμάτωση παραδοσιακών πρωτοκόλλων :** Οι διεπαφές και τα πρωτόκολλα του SDN αναπτύσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιμετωπίζουν τεχνικά και διαδικαστικά ζητήματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε προβλήματα ασφαλείας. Ωστόσο, η εμπειρία έχει αποδείξει τη δυσκολία της μετεγκατάστασης των δυνατοτήτων ασφαλείας σε υπάρχουσες τεχνολογίες (π.χ. Domain Name Server (DNS)). Είναι σημαντικό να ελέγχεται η συμβατότητα πριν την εφαρμογή παραδοσιακών πρωτοκόλλων στο SDN, όπως επίσης είναι βασικό οι αδυναμίες που έχουν παρουσιαστεί στο παρελθόν στις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές να μην επαναληφθούν ή ενσωματωθούν κατά την δημιουργία του SDN πλαισίου.
- **Διασύνδεση μεταξύ τομέων :** Μια πρόσθετη απαίτηση της υλοποίησης SDN είναι η διασύνδεση των υποδομών διαφορετικών τομέων. Αυτό μπορεί να επαυχθεί εφόσον ληφθούν υπόψη οι μηχανισμοί για την καθιέρωση σχέσεων εμπιστοσύνης η ασφαλής ρύθμιση καναλιών και ο καθορισμός του επιπέδου αδειοδότησης προκειμένου να αποφευχθεί η κατάχρησή.

1.8 Αρχές Ασφάλειας

Σύμφωνα με τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό ONF (Open Networking Foundation) οι 8 αρχές ασφαλείας που περιγράφονται στην συνέχεια εφαρμόζονται σε όλα τα πρωτόκολλα, τα στοιχεία και τις διεπαφές της αρχιτεκτονικής SDN.

1. **Ορισμός των εξαρτήσεων ασφαλείας και των ορίων εμπιστοσύνης.** Κατά τον καθορισμό ενός μηχανισμού ασφαλείας για τα δίκτυα SDN, πρέπει να διακρινίζονται οι εξαρτήσεις ασφαλείας μεταξύ των διάφορων συστατικών. Ο σαφής ορισμός των ορίων εμπιστοσύνης επιτρέπει τη στοχοθετημένη ανάλυση κινδύνου και την αξιολόγηση του ελέγχου ασφαλείας. Τα όρια εμπιστοσύνης θα πρέπει να ορίζονται βάσει των τομέων αλλαγής δικαιωμάτων, της ροής πληροφοριών μεταξύ τομέων (π.χ. εισόδου και εξόδου) και της εξάρτησης των δεδομένων όπου δεν μπορεί να επαληθευτεί η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα. Οποιαδήποτε εξωτερική εξάρτηση θα πρέπει να αποτελεί ένα όριο εμπιστοσύνης, καθώς οι επιθέσεις μπορεί να προκύψουν

από εξωτερικά συστήματα. Επομένως, η διεπαφή για τα εξωτερικά περιβάλλοντα θα πρέπει να παρέχουν επαρκή λειτουργικότητα ασφάλειας για την πρόληψη ή τον μετριασμό εξωτερικών επιθέσεων. Τα εξωτερικά συστήματα θα πρέπει να έχουν περιορισμένη πρόσβαση με ελάχιστα δικαιώματα για τη μείωση του κινδύνου για το σύστημα. Επιπλέον, θα πρέπει να εξετάζεται η διαχείριση ή ο περιορισμός των επιθέσεων στο εσωτερικό του συστήματος, ώστε να αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον.

2. Διασφάλιση ισχυρής ταυτότητας : Η βάση για την αποτελεσματική ασφάλεια είναι η δυνατότητα μοναδικού εντοπισμού όλων των στοιχείων και χρηστών ενός συστήματος και η επαλήθευση των ταυτοτήτων τους με μια αξιόπιστη πηγή. Χωρίς ισχυρό πλαίσιο ταυτότητας, η δυνατότητα δημιουργίας αποτελεσματικών εφαρμογών ελέγχου ταυτότητας και εξουσιοδότησης θα είναι περιορισμένη. Μια ισχυρή ταυτότητα θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:
 - Ικανότητα να διακρίνει τον ιδιοκτήτη του από άλλες οντότητες εντός ενός προκαθορισμένου πεδίου.
 - Δυνατότητα να δημιουργείται, να ενημερώνεται και να ανακαλείται.
 - Πρόληψη της πλαστοπροσωπίας, κατά προτίμηση μέσω ισχυρών κρυπτογραφικών μηχανισμών. Με γνώμονα την αρχιτεκτονική SDN εξακριβώνεται ότι, ακόμη και από τα στοιχεία που βρίσκονται εντός των ορίων εμπιστοσύνης του συστήματος μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο ο κεντροποιημένος έλεγχος. Συνεπώς, η αυθεντικοποίηση που βασίζεται στην επαβεβαίωση ταυτότητας, αποτελεί ισχυρό παράγοντα για την ασφάλεια του συστήματος.
3. Δημιουργία ασφάλειας βάσει ανοικτών προτύπων : Η χρήση ανοικτών προτύπων μπορεί να αποφέρει οφέλη τόσο στη φορητότητα όσο και στη διαλειτουργικότητα. Όπου είναι δυνατόν, θα πρέπει να εφαρμοστούν αποδεδειγμένα πρωτόκολλα και μεθοδολογίες υπέρ της ανάπτυξης ή του σχεδιασμού νέων. Νέα πρωτόκολλα και αλγόριθμοι δημιουργούνται ως έσχατη λύση όταν δεν μπορούν να ικανοποιηθούν οι υπάρχουσες απαιτήσεις. Για παράδειγμα, για τη διασφάλιση του OpenFlow καναλιού επικοινωνίας τόσο της κεφαλίδας κυκλοφορίας του πρωτοκόλλου (TCP) όσο και για το ωφέλιμο φορτίο, απαιτείται προστασία του επιπέδου μεταφοράς. Συνεπώς, συνιστάται η υιοθέτηση μιας τέτοιας υφιστάμενης τεχνικής και όχι η ανάπτυξη μιας νέας λύσης για το επίπεδο μεταφοράς. Η έννοια της επαναχρησιμοποίησης πρωτοκόλλου / αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση λειτουργιών ασφαλείας όπως η κρυπτογράφηση, η πιστοποίηση ταυτότητας και η ακεραιότητα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, καλό είναι να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση πρωτοκόλλων ή αλγορίθμων παλαιού τύπου (π.χ. MD5, Transport Layer Security (TLS)) που έχουν αποδειχθεί ανασφαλείς και δεν συνιστώνται πλέον από οργανισμούς προτύπων.
4. Προστασία CIA τριάδας (Confidentiality, Integrity, Availability) : Αν και οι έλεγχοι ασφαλείας από τη φύση τους θα πρέπει να αυξάνουν την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και τη διαθεσιμότητα (CIA) ενός συστήματος, η στάση ασφαλείας του ελέγχου πρέπει να αξιολογείται ως προς τον αντίκτυπό του στη συνολική αρχιτεκτονική. Οποιαδήποτε μείωση της αποτελεσματικότητας των βασικών πλώνων (CIA) θα πρέπει να εντοπιστεί και να μετριαστεί. Επιπλέον, οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην μειώνουν άσκοπα την απόδοση του συστήματος ή να επιβάλλουν πρόσθετη πολυπλοκότητα στο σύστημα η οποία πιθανώς θα επιφέρει νέα ευπάθειες ασφαλείας. Στην πράξη, η τελική λύση ενός ελέγχου ασφαλείας επηρεάζεται συνθετικά από τις απαιτήσεις ασφαλείας, το κόστος και τη δυνατότητα διαχείρισης.
5. Προστασία δεδομένων αναφοράς : Η αποτελεσματικότητα ενός ελέγχου ασφαλείας επηρεάζεται άμεσα από την ακεραιότητα των δεδομένων αναφοράς (π.χ. διαπιστευτήρια και αριθμούς ακολουθιών), η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων. Οι εσφαλμένες πληροφορίες μπορούν να οδηγήσουν σε απροσδόκητη συμπεριφορά του συστήματος με αποτέλεσμα να υπάρξει απώλεια εμπιστευτικότητας, ακεραιότητας ή / και διαθεσιμότητας. Επιπλέον, η διαρροή ορισμένων ευαίσθητων δεδομένων αναφοράς, όπως τα κρυπτογραφικά κλειδιά, θα προκαλέσει πιθανές παραβιάσεις του ελέγχου ασφαλείας. Τα επιχειρησιακά δεδομένα αναφοράς για όλους τους ελέγχους ασφαλείας πρέπει να ορίζονται σαφώς και να προστατεύονται συνεχώς σύμφωνα με την πολιτική ασφαλείας και τις παραδοχές της αρχιτεκτονικής ασφαλείας. Τα δεδομένα αναφοράς πρέπει να δημιουργούνται, να επεξεργάζονται, να συντηρούνται και να μεταφέρονται με ασφάλεια στις αναμενόμενες και μεταβατικές επιχειρησιακές καταστάσεις, για όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος.
6. Δημιουργία ασφαλών συστημάτων χωρίς περαιτέρω τακτηριότητα : Οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να παρέχουν πολλαπλά επίπεδα ασφαλείας για την ικανοποίηση των απαιτήσεων όλων των πιθανών περιπτώσεων χρήσης του συστήματος. Αυτά τα επίπεδα μπορεί να διαφέρουν από μια κατάσταση στην οποία ένας έλεγχος είναι απενεργοποιημένος, σε μια άλλη κατάσταση που μπορεί να ικανοποιήσει τις πιο αυστηρές απαιτήσεις ασφαλείας (π.χ., απόρριψη από προεπιλογή). Ανεξάρτητα από την περίπτωση, το σύστημα θα πρέπει να ορίσει ένα ελάχιστο επίπεδο στο οποίο θα ενεργοποιείται από προεπιλογή η πλειοψηφία των κύριων στοιχείων ασφαλείας. Εκτός από την ενεργοποίησή τους, αυτά τα στοιχεία ελέγχου θα πρέπει να

διαμορφώνονται έτσι ώστε να πληρούν τα ελάχιστα κριτήρια ώστε να διασφαλίζεται η αποτελεσματικότητα του ελέγχου. Οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα επαναρύθμισης ή ακόμα και απενεργοποίησης με συνειδητή απόφαση του ιδιοκτήτη/διαχειριστή του συστήματος.

7. Παροχή λογοδοσίας και αντισταθμιστικότητας : Όλοι οι έλεγχοι ασφαλείας πρέπει να ελέγχονται για την κατάσταση και τις ενέργειες που είναι κρίσιμες για την ασφάλεια του συστήματος. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα θα πρέπει να περιέχουν επαρκείς πληροφορίες για σκοπούς ελέγχου. Με βάση τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί, ο ελεγκτής πρέπει να είναι σε θέση όχι μόνο να προσδιορίσει με μοναδικό τρόπο την οντότητα της οποίας για λογαριασμό της έχει πραγματοποιηθεί μια ενέργεια, αλλά επίσης να ανακαλύψει τη σχετική ακολουθία της ενέργειας. Η διασφάλιση ισχυρής ταυτότητας (αρχή 2) βοηθά στην αντίχρευση των ενεργειών σε συγκεκριμένες οντότητες. Είναι επίσης σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα ελεγχόμενα δεδομένα δεν θα πρέπει να περιέχουν περιττές πληροφορίες και οι ενέργειες ελέγχου δεν θα οδηγήσουν σε παραβίαση της πολιτικής ασφαλείας. Βασικά, τα δεδομένα πρέπει να προστατεύονται από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και τροποποιήσεις.
8. Ιδιότητες διαχειρίσιμων ελέγχων ασφαλείας : Όταν εισάγονται νέοι έλεγχοι ασφαλείας σε μια αρχιτεκτονική ή ένα πρότυπο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες ιδιότητες του ελέγχου:
 - Πριν από τον σχεδιασμό ή την εισαγωγή ενός ελέγχου ασφαλείας, πρέπει να διευκρινιστούν οι στόχοι και οι υποθέσεις ασφαλείας.
 - Οι έλεγχοι ασφαλείας πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να υποστηρίζουν τις εγκαταστάσεις από το μικρότερο σύστημα αναφοράς έως τη μεγαλύτερη ανάπτυξη, χωρίς να προκαλείται αδικαιολόγητη πολυπλοκότητα.
 - Κατά την εισαγωγή νέων ελέγχων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο αντίκτυπος της υλοποίησης της λύσης και της διαχείρισης του κύκλου ζωής. Μια καλή εφαρμογή θα πρέπει να είναι επεκτάσιμη, ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο μέλλον πρόσθετες λειτουργίες ελέγχου ασφαλείας.
 - Οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να είναι εύκολοι στο να εφαρμοστούν, να διατηρηθούν και να λειτουργούν.
 - Οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να είναι συμβατοί με παλαιότερες εκδόσεις.
 - Οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να είναι καλά τεκμηριωμένοι και να βασίζονται σε σαφώς καθορισμένα πρότυπα.
 - Πρέπει πάντα να είναι δυνατή η ανάκληση και η τροποποίηση των διαπιστευτηρίων ασφαλείας ως μέρος του κύκλου ζωής ενός συστήματος.
 - Όπου είναι δυνατό, όλοι οι έλεγχοι ασφαλείας θα πρέπει να υποστηρίζουν την αυτοματοποίηση, ώστε να διασφαλίζεται η σωστή εφαρμογή των ελέγχων. Σε πολλές περιπτώσεις, οι χειροκίνητες διαδικασίες μπορεί να οδηγήσουν σε ακατάλληλη διαμόρφωση, γεγονός που μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα ενός ελέγχου.
 - Η δυνατότητα παρακολούθησης εντοπισμού σφαλμάτων και αντιμετώπισης προβλημάτων σε οποιοδήποτε σύστημα είναι θεμελιώδης σημασίας για έναν επιτυχημένο έλεγχο ασφαλείας.

Κεφάλαιο 2ο: Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G)

2.1 Εισαγωγή

2.1.1 Κίνητρα ανάπτυξης συστημάτων 5^{ης} γενιάς

Το LTE (Long Term Evolution) που ενσωματώνει τα συστήματα 4^{ης} γενιάς (4G) έχει αναπτυχθεί και φθάνει στην ωρίμανσή του. Εφόσον πλέον ελάχιστες βελτιώσεις και μικρές ποσότητες νέου φάσματος μπορούν να εκχωρηθούν, είναι φυσικό για την ερευνητική κοινότητα να αναλογιστεί τι θα γίνει στο άμεσο μέλλον. Σε μεγάλο βαθμό τα “έξυπνα” τηλέφωνα (smartphones), οι ταμπλέτες (tablets) και οι ροές βίντεο (video streaming) έχουν κατακλύσει τα δίκτυα και οι προβλέψεις που είχαν γίνει για το 2020 που αφορούσαν τις απαιτήσεις δικτύου έχουν ξεπεραστεί κατά πολύ. Σε μόλις μια δεκαετία η ποσότητα των IP δεδομένων που χειρίστηκαν τα ασύρματα δίκτυα έχει αυξηθεί κατά πολύ πάνω από 100 φορές από την αναμενόμενη. Με όγκο δεδομένων κάτω από 3 Exabytes το 2010 και πάνω από 190 Exabytes το 2018, αυτός ο αριθμός ανεβαίνει όλο και πιο πολύ που το 2020 εκτιμήθηκε ότι θα

υπερβαίνει τα 500 Exabytes, όπως και συνέβη. Αυτή η πληθώρα κίνησης των δεδομένων, η οποία δημιουργείται κυρίως από βίντεο μέχρι στιγμής αλλά και από νέες εφαρμογές, έχει δημιουργήσει έξτρα κίνηση. Εκτός από τον όγκο δεδομένων, ο αριθμός των συσκευών και κατ' επέκταση και νέων δεδομένων θα συνεχίσει να αυξάνεται εκθετικά. Επίσης στις προηγούμενες 4 γενιές της κυβελωτής τεχνολογίας που εφαρμόζεται στις κινητές συσκευές, η κάθε νέα τεχνολογία δεν ήταν συμβατή με την προηγούμενή της, με αποτέλεσμα να χρειάζεται σχεδόν πλήρης αντικατάσταση των υποδομών και της τεχνολογίας που χρησιμοποιούνταν από τους παρόχους. Οι πάροχοι επιδιώκοντας τουλάχιστον την απόσβεση και το κέρδος από την ήδη υπάρχουσα τεχνολογική υποδομή αναζήτησαν από τις ερευνητικές κοινότητες μια πιο μακροπρόθεσμη και με διάρκεια εξοπλιστική υποδομή. Έτσι, ξεκινώντας από το LTE με το 4G, συνεχίζεται ακόμα πιο ολοκληρωμένα αυτή η απαίτηση με το 5G.

2.1.2 Απαιτήσεις συστημάτων 5^{ης} γενιάς

Το 5G θα πρέπει να περιέχει πολύ υψηλές συχνότητες με τεράστιο εύρος ζώνης, πολλούς σταθμούς βάσης, ανοχή στην πυκνότητα συσκευών και έναν πρωτοφανή για τα μέχρι τώρα δεδομένα αριθμό κεραιών. Επίσης σε αντίθεση με τις προηγούμενες 4 γενιές, το 5G οφείλει να είναι πολύ πιο ολοκληρωμένο, καθώς θα συνδέει κάθε διεπαφή και το φάσμα από κοινού μεταξύ LTE και WiFi προκειμένου να παρέχει καθολική κάλυψη υψηλού επιπέδου. Για να υλοποιηθούν όμως όλα αυτά, θα πρέπει να πληρούνται πολλές απαιτήσεις οι οποίες αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις σε πολλά επίπεδα και θα πρέπει να υλοποιούνται ταυτόχρονα, καθώς διαφορετικές εφαρμογές (applications) θα απαιτούν διαφορετικές επιδόσεις από το δίκτυο με ορισμένες από αυτές, ακόμα και αν το δίκτυο είναι στην αιχμή του, να χρειάζεται να δεσμεύουν ακόμα περισσότερους πόρους. Παρακάτω θα εξετάσουμε αυτές τις απαιτήσεις.

1. **Ρυθμός δεδομένων (Data rates):** Η ανάγκη για την υποστήριξη τεράστιων ρυθμών δεδομένων είναι αναμφισβήτητη η κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη του 5G. Ο ρυθμός δεδομένων μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους και σε διάφορα σημεία του δικτύου όπου θα πρέπει ο καθένας από αυτούς να υλοποιεί τους στόχους του 5G :
 - e. **Συνολικός ρυθμός δεδομένων (Aggregate data rate):** Αναφέρεται στη συνολική ποσότητα των δεδομένων του δικτύου που μπορούν να εξυπηρετηθούν και μετρείται σε μονάδες των bits/s/area.
 - f. **Ακραίος ρυθμός δεδομένων (Edge rate, or 5% rate):** είναι ο χαρτότερος ρυθμός δεδομένων που ο χρήστης λογικά αναμένει να λάβει, όταν βρίσκεται εντός της εμβέλειας του δικτύου και γι' αυτόν τον λόγο είναι σημαντική παράμετρος
 - g. **Ρυθμός αιχμής-Μέγιστος ρυθμός (Peakrate):** είναι η καλύτερη περίπτωση ρυθμού δεδομένων, κατά την οποία ο χρήστης μπορεί να ελπίζει ότι θα έχει υπό οποιαδήποτε διαμόρφωση του δικτύου. Ο ρυθμός αυτός είναι περισσότερο εμπειρικός παρ' ότι σημαίνει πολλά για τους μηχανικούς. Όμως σε κάθε περίπτωση, κατά πάσα πιθανότητα θα είναι στην περιοχή των δεκάδων Gbps.
2. **Χρόνος Καθυστερήσης (Latency) :** Άλλη μια πρόκληση που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι οι χρονικές καθυστερήσεις. Οι τρέχουσες χρονικές καθυστερήσεις απόκρισης του 4G είναι της τάξεως των 15 ms και βασίζονται στο χρονικό πλαίσιο του 1 ms για την δέσμευση πόρων και την πρόσβαση. Παρ' όλο που αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι επαρκής για τις περισσότερες τρέχουσες υπηρεσίες, προβλέπεται ότι για το 5G θα απαιτείται μικρότερος χρόνος καθυστέρησης της τάξεως του 1 ms, καθώς οι διάφορες εφαρμογές θα έχουν περισσότερες απαιτήσεις.
3. **Ενέργεια και κόστος:** Καθώς κινούμαστε προς το 5G, το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας, ιδανικά, θα πρέπει να μειώνεται ή τουλάχιστον δεν θα πρέπει να αυξάνεται ανά σύνδεση. Δεδομένου ότι οι ρυθμοί δεδομένων ανά σύνδεση που προσφέρονται θα αυξάνονται περίπου x100 φορές, σημαίνει ότι και τα Joules ανά bit θα χρειαστεί να μειωθούν τουλάχιστον x100 φορές.
4. **Συμβατότητα:** Μια μακροκύβηλη θα κληθεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα μικρούς αλλά και μεγάλους ρυθμούς δεδομένων, γεγονός που απαιτεί αλλαγές στο κέντρο και το υπάρχον πλάνο διαχείρισης του δικτύου. Επίσης ο ερχομός της καινούργιας γενιάς δικτύων δεν σηματοδοτεί την παύση της χρήσης των προηγούμενων. Τα συστήματα της καινούργιας γενιάς θα συνεργάζονται αρμονικά και με εκείνα των προηγούμενων γενεών (3G, LTE) ενσωματώνοντας και την τεχνολογία του WiFi. Το δίκτυο επιπλέον θα κληθεί να

εξυπηρετήσει διάφορων ειδών συσκευές ενώ περιμένουμε επίσης και την ανάπτυξη των απευθείας επικοινωνιών μεταξύ μηχανών (D2D Communications).

5. **Εύρος ζώνης (Bandwidth) και χωρητικότητα δικτύου (Network capacity):** Ο χώρος των συχνοτήτων που μπορούν σήμερα να χρησιμοποιηθούν στις επικοινωνίες είναι πολύ περιορισμένος. Εξετάζονται λοιπόν τεχνολογίες στην πέμπτη γενιά δικτύων, όπου θα χρησιμοποιούνται και άλλες συχνοτήτες πέρα από τις υπάρχουσες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το φάσμα που χρησιμοποιείται και κατ'επέκταση, το εύρος ζώνης και την ικανότητα του δικτύου να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες μια δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης επί τάπητος έχει τεθεί το ζήτημα της αναθεώρησης της τοπολογίας των υποδομών του δικτύου και δημιουργίας μικρότερων σε έκταση αλλά περισσότερων σε αριθμό κυψελών. Πιο συγκεκριμένα στόχος των δικτύων πέμπτης γενιάς είναι οι σταθμοί βάσης να απέχουν λιγότερο από 100m σχηματίζοντας μικροκυψέλες (picocells) ή να βρίσκονται ακόμα πιο κοντά, σε απόσταση τέτοια ώστε να μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας WIFI, σχηματίζοντας φεμτοκυψέλες (femtocells). Έτσι αυξάνεται και ο αριθμός που μπορούν να εξυπηρετήσουν μια δεδομένη χρονική στιγμή. Τα συστήματα 5ης γενιάς (5G) θα πρέπει να υποστηρίζουν τουλάχιστον κάποιες δεκάδες Tbps/km² σε πυκνότητα όγκου δεδομένων και εκατομμύρια συνδέσεις ανά km² ταυτόχρονα για να είναι αποτελεσματική η πρόσβαση και να εξυπηρετεί τις απαιτήσεις των συσκευών τόσο στο mobile internet, όσο και στο Δικτύο των πραγμάτων (Internet of Things). Γενικά τα συστήματα 5ης γενιάς θα πρέπει να επιτύχουν 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα συστήματος από τον προκατόχο του, 10 φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση, 10 φορές μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων και 10 φορές μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση (δηλαδή, η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων να αγγίζει τα 10 Gbps/s για χαμηλή κινητικότητα και μέγιστη ταχύτητα δεδομένων το 1 Gbps/s για υψηλή κινητικότητα). Επίσης, ο μέσος όρος της αποδοτικότητας της κυψέλης θα πρέπει να είναι 25 φορές μεγαλύτερος.

2.1.3 Η εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογιών 5ης Γενιάς

Η καινοτόμος τεχνολογία 5G είναι πολύ σημαντική για την παγκόσμια υπολογιστική, αφού μία σειρά έργων έχει ανακοινωθεί για την έρευνα και τη δημιουργία των κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς. Το 2008 δημιουργήθηκε το πρόγραμμα «5G συστήματα κινητών επικοινωνιών με βάση δέσμης πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση» σε συνεργασία με την ομάδα E&A της Νότιας Κορέας. Στην Ευρώπη, το 2008 ο Neelie Kroes, επίτροπος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, διέταξε την δημιουργία κονδυλίου € 50.000.000 για την έρευνα της σύγχρονης τεχνολογίας, με σκοπό να παραδοθούν κινητά δίκτυα τεχνολογίας 5G το 2020. Ειδικότερα, το πρόγραμμα Metis 2020 δημιουργήθηκε από μία εταιρεία κατασκευής αυτοκινήτων και πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιών και στοχεύει να επιτευχθεί παγκόσμια συναίνεση σχετικά με το μέλλον στο παγκόσμιο σύστημα κινητών και ασύρματων επικοινωνιών. Στη Metis, ο βασικός στόχος είναι να παραχθεί ένα ενιαίο σύστημα, που υποστηρίζει ακόμα και χίλιες φορές υψηλότερη φασματική απόδοση των κινητών επικοινωνιών σε σύγκριση με τις τρέχουσες υλοποιήσεις LTE, ενώ αντικειμενικός στόχος παραμένει η εξασφάλιση της έγκαιρης παγκόσμιας συναίνεσης σχετικά με αυτά τα συστήματα. Με άλλα λόγια, αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη συναίνεση μεταξύ όλων των ενδιαφερόμενων μερών, αρκετά πριν από τις παγκόσμιες δραστηριότητες τυποποίησης του προτύπου. Τον Οκτώβριο του 2012, το Πανεπιστήμιο του Ηνωμένου Βασιλείου του Surrey εξασφάλισε 35 εκατομμύρια λίρες, για το νέο ερευνητικό κέντρο 5G, η κοινή χρηματοδότηση πραγματοποιήθηκε μεταξύ του ταμείου της βρετανικής κυβέρνησης Επενδύσεων (UKRPIF) και μιας κοινοπραξίας των βασικών διεθνών φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και παρόχων συμπεριλαμβανομένης των υποδομών των Huawei, Samsung, Telefonica Europe, Fujitsu Laboratories Europe, Rohde & Schwarz και Aircom International. Έτσι, θα προσφερθούν εγκαταστάσεις δοκιμών σε φορείς εκμετάλλευσης κινητών, οι οποίοι θα είναι πρόθυμοι να αναπτύξουν πρότυπο κινητών επικοινωνιών, που θα χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια και μικρότερο ραδιοφάσμα ενώ παράλληλα θα παρέχει ταχύτητα μεγαλύτερη από τις σημερινές ταχύτητες 4G. Αυτό το έργο αναμένεται να ολοκληρωθεί μέσα στην επόμενη δεκαετία. Επιπλέον, το 2013 ξεκίνησε ένα άλλο σημαντικό έργο, που ονομάζεται 5GrEEn και το οποίο συνδέεται άρρηκτα με αυτό της Metis. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο νέο δίκτυο, το οποίο θα σχεδιαστεί να είναι πράσινο. Το τελευταίο

επιδιώκει να αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές, έτσι ώστε η σύγχρονη τεχνολογία να στηρίζεται στις αρχές της ενεργειακής απόδοσης, της βιωσιμότητας και της οικονομίας. Ακόμα, το Φεβρουάριο του 2013, η ITU -R Ομάδα 5D (5D WP) ξεκίνησε μελέτη για το IMT, όσον αφορά το 2020 και έπειτα, και σχετικά με τις μελλοντικές τάσεις της τεχνολογίας για επίγεια συστήματα IMT. Και οι δύο τομείς μελέτης στοχεύουν, στο να παρέχουν μια καλύτερη κατανόηση των μελλοντικών τεχνικών πτυχών των κινητών επικοινωνιών προς τον ορισμό της επόμενης γενιάς κινητών. Επίσης, τον Μάιο του 2013, η Samsung Electronics δήλωσε ότι έχει αναπτύξει το πρώτο 5G σύστημα στον κόσμο. Η βασική τεχνολογία έχει μέγιστη ταχύτητα δεκάδων Gbps. Κατά τη δοκιμή, η μεταφορά ταχυτήτων για το 5G δίκτυο στέλνει δεδομένα 1.056 Gbps σε μια απόσταση μέχρι 2 χιλιόμετρα με τη χρήση ενός 8*8 MIMO (Multiple Input and Multiple Output) συστήματος. Επιπροσθέτως, τον Ιούλιο του 2013, η Ινδία και το Ισραήλ συμφώνησαν να εργαστούν από κοινού για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G). Τον Νοέμβριο του 2013, η Huawei ανακοίνωσε τα σχέδιά της να επενδύσει τουλάχιστον 600 εκατομμύρια δολάρια για την επόμενη γενιά δικτύων 5G ικανή να αναπτύξει ταχύτητα 100 φορές πιο γρήγορη από ό, τι τα σύγχρονα δίκτυα LTE. Ένα από τα σημαντικότερα, αφού κατέχει πρωταρχικό ρόλο στην έρευνα για την πέμπτη γενιά είναι το PPP (Public-Private Partnership). Η αρχή της συζήτησης για τα νέα δίκτυα επικοινωνιών, με προσανατολισμό στο PPP έγινε τον Ιούλιο του 2012. Τότε, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή κάλεσε την ευρωπαϊκή βιομηχανία σε μια συζήτηση με θέμα τον προσανατολισμό προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση αυτής της νέας πρωτοβουλίας. Διοργανώθηκε Εβδομάδα Ανταγωνιστικότητας από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Σεπτέμβριο του 2012. Αυτό το γεγονός υπήρξε ένα σημαντικό ορόσημο για τη συζήτηση των ερευνητικών προτεραιοτήτων για την Ευρώπη στο πλαίσιο της H2020 (Horizon2020 –EU projects). Η ουσιαστική ανάπτυξη της επίσημης πρότασης, όμως, ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2013. Η πρόκληση, που τέθηκε για τη μελέτη και τη δημιουργία του 5G, ήταν η αφετηρία για μια ομάδα των εταιρειών του κλάδου και των σημαντικότερων κέντρων της ευρωπαϊκής Έρευνας και Ανάπτυξης (E&A) για την ανάπτυξη μιας πρότασης για την υποδομή της τεχνολογίας δικτύων πέμπτης γενιάς, τονίζοντας σαφώς ότι το πρόγραμμα καλύπτει πολλά περισσότερα θέματα από μια νέα γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Η πρόταση για τις 5G υποδομές, που εκπονήθηκε κατά το πρώτο εξάμηνο του 2013 και υποβλήθηκε προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Ιούνιο του 2013, ακολούθησε με μια βελτιωμένη έκδοση, τον Σεπτέμβριο του 2013. Τα βασικά τμήματα, τα οποία διακρίνονται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι τα εξής:

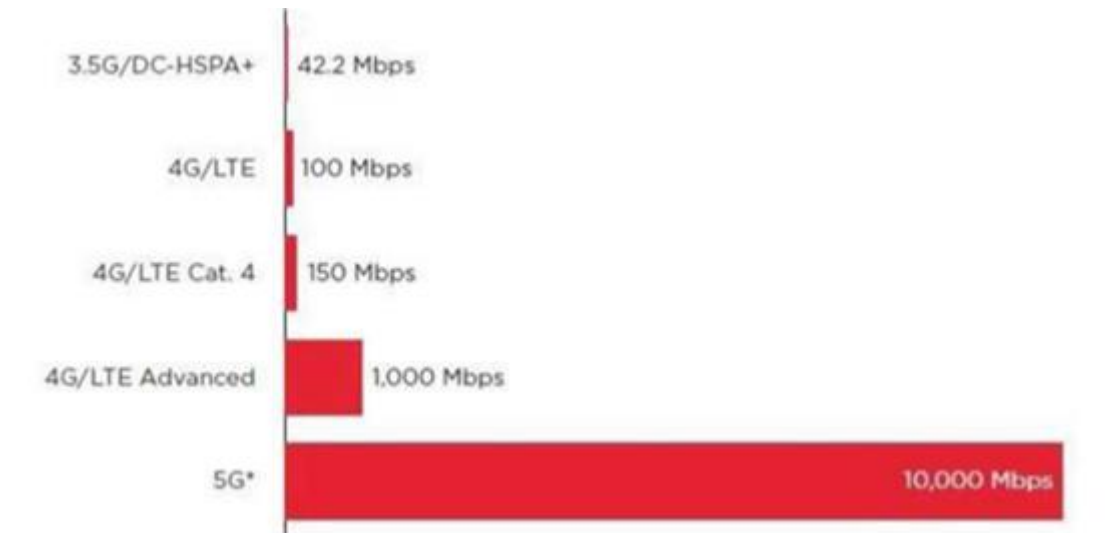
- i. Συνολικά μακροπρόθεσμο όραμα των στρατηγικών και των ειδικών στόχων του PPP (τμήμα 1),**
- ii. Η έρευνα και η καινοτομία της στρατηγικής ιδίως στο πεδίο εφαρμογής της E&A και της καινοτομίας προκλήσεων (τμήμα 2)**
- iii. Αναμενόμενες επιπτώσεις (τμήμα 3),**
- iv. Η διακυβέρνηση του προγράμματος (τμήμα 4).**

Το πρόγραμμα αναμένεται να προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για την διεθνή 5G υποδομή επικοινωνιών της επόμενης δεκαετίας. Οι βασικές προκλήσεις υψηλού επιπέδου θα πρέπει να παρέχονται από το πρότυπο και περιλαμβάνουν ικανότητα παροχής 1000 φορές μεγαλύτερη της ασύρματης περιοχής και πιο ποικίλες δυνατότητες των υπηρεσιών, σε σύγκριση με το 2010. Εξοικονόμηση έως και 90 % της ενέργειας, ανά παρεχόμενη υπηρεσία. Η κύρια έμφαση πρέπει να δοθεί στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, όπου κυριαρχεί η κατανάλωση ενέργειας, η οποία προέρχεται από το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Μείωση του μέσου όρου του χρονικού κύκλου της υπηρεσίας μεταβάλλεται από 90 ώρες σε 90 λεπτά. Δημιουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου Internet για την παροχή κάθε είδους υπηρεσιών. Διευκόλυνση πολύ πυκνών αναπτύξεων ασύρματων ζεύξεων επικοινωνίας, για τη σύνδεση πάνω από 7 τρισεκατομμύρια ασύρματες συσκευές, που είναι

δυνατό να εξυπηρετήσουν πάνω από 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους. Ενεργοποίηση προηγμένου ελέγχου για την προστασία της ιδιωτικής ζωής. Τον Δεκέμβριο του 2013, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπέγραψε τη σύμβαση ρύθμισης για το PPP με τους εκπροσώπους της ένωσης υποδομών για το 5G, η οποία περιγράφει την αμοιβαία δέσμευση των δύο μερών για την εταιρική σχέση όσον αφορά τις φιλοδοξίες υψηλού επιπέδου, τους βασικούς δείκτες απόδοσης και τον προβλεπόμενο και προσυπολογιζόμενο κονδύλιο για την οικονομική περίοδο 2014 έως 2020. Εφόσον λοιπόν η πρόταση είχε υποβληθεί και εγκριθεί μέσα στο έτος 2013, αναμενόταν ότι θα ξεκινήσει η ανάπτυξη και η μελέτη μέσα στο 2014, έτσι ώστε να υπάρξει συνέπεια μεταξύ των δεσμεύσεων για τη νέα μορφή κινητής επικοινωνίας, που προέβλεπε ότι θα είναι σε κυκλοφορία και ευρεία χρήση το 2020. Από την άλλη μεριά, για την Ευρώπη θεωρείται εξίσου σημαντικό να κερδίσει το χαμένο έδαφος, που άλλες χώρες έχουν πραγματοποιήσει και καταφέρει με τις προηγούμενες γενιές τηλεπικοινωνιών. Η απάντηση αν θα επιτευχθεί ο ευρωπαϊκός στόχος θα έρθει μέσα στα επόμενα χρόνια. Η εταιρία Samsung έχει δημιουργήσει 5G δίκτυα τα οποία τα οποία ολοκληρώθηκαν το 2017. Μετά την ολοκλήρωσή τους χρειάστηκε να δοκιμαστούν για περίπου τρία χρόνια και έπειτα ήταν έτοιμα για ευρεία χρήση και διατέθηκαν στο εμπόριο. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο η κυβέρνηση της Νότιας Κορέας αποφάσισε να διαθέσει 1,2 δισεκατομμύρια ευρώ για την δημιουργία των δικτύων αυτών. Στην εμπορική έκθεση CeBIT η οποία πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία και συγκεκριμένα στο Ανόβερο επικυρώθηκε η συμφωνία μεταξύ Γερμανίας και Μεγάλης Βρετανίας για την μελέτη και την δημιουργία 5G δικτύου. Ο David Cameron, ανακοίνωσε την χρηματοδότηση της έρευνας με 73 εκατομμύρια λίρες. Για την έρευνα και την υλοποίηση του δικτύου συνεργάζονται το πανεπιστήμιο της Δρέσδης, το πανεπιστήμιο King's College του Λονδίνου και το πανεπιστήμιο του Surrey.

2.2 Τεχνολογίες συστημάτων 5^{ης} γενιάς

Το 5G-PPP αποτελεί μια συντονισμένη ευρωπαϊκή προσπάθεια της ICT (Information and Communication Technology) βιομηχανίας για να συνεισφέρει στην έρευνα για τη νέα εποχή των ICT υποδομών, προκειμένου να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην παγκόσμια αγορά. Σύμφωνα λοιπόν με το 5G-PPP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς οι στόχοι των 5G δικτύων αναμένεται να είναι η αύξηση του όγκου των δεδομένων που διακινούνται μέσω των κινητών δικτύων ανά γεωγραφική περιοχή. Εκτιμάται ότι το ποσό αυτό θα είναι της τάξης του 10TB/s/km². Επίσης θα υπάρχει μεγάλη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο. Υπολογίζεται ότι θα έχουμε 1.000.000 συνδεδεμένα τερματικά ανά km². Αλλά και αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, πάνοντας ταχύτητες από 1-10 Gb/s. Στο Σχήμα 3, παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των προηγούμενων τεχνολογιών σε σχέση με το 5G.



Σχήμα 3 – Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps

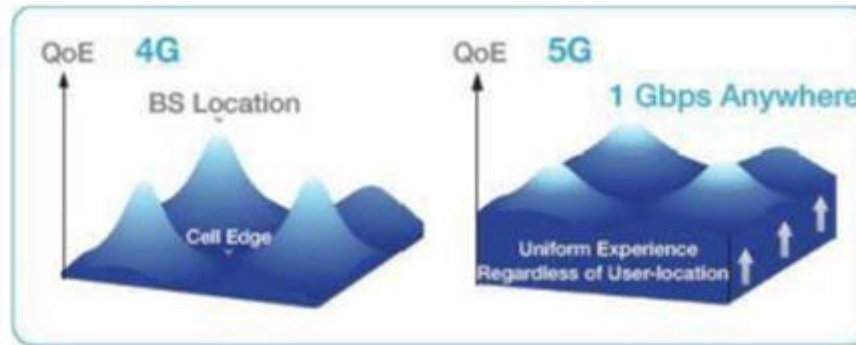
Επίσης προβλέπεται 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε σχέση με το 2010, 80% μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX) και σημαντική μείωση του χρόνου καθυστέρησης στις End to End συνδέσεις αλλά και στις καθυστερήσεις μέσω αέρα σε τιμές <5ms και <1ms αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4 – Σύγκριση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του δικτύου 4G και του 5G

Τέλος εκτιμάται ότι θα μπορούμε να δημιουργήσουμε εξ' αρχής μια υπηρεσία και να την παραδώσουμε σε λειτουργική μορφή σε λιγότερο από 90 λεπτά. Η πραγματοποίηση των παραπάνω στόχων μεταφράζεται σε προκλήσεις και ανάγκη για αλλαγές στα σημερινά δίκτυα, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι λεγόμενοι δείκτες απόδοσης KPIs (Key Performance Indicators) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Προκειμένου να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα κρίνεται απαραίτητο να ικανοποιούνται κάποιες βασικές κατευθύνσεις. Η ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Services–QoS) θα αλλάξει προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η εμπειρία του χρήστη, ενώ το δίκτυο πρέπει να προσφέρει τις δυνατότητες του (υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρό χρόνο καθυστέρησης κλπ.) ανεξαρτήτως της γεωγραφικής θέσης που βρίσκεται ο χρήστης. Στα σημερινά δίκτυα, υπάρχουν περιπτώσεις που η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται σε ένα χρήστη, εξαρτάται από το πόσο κοντά

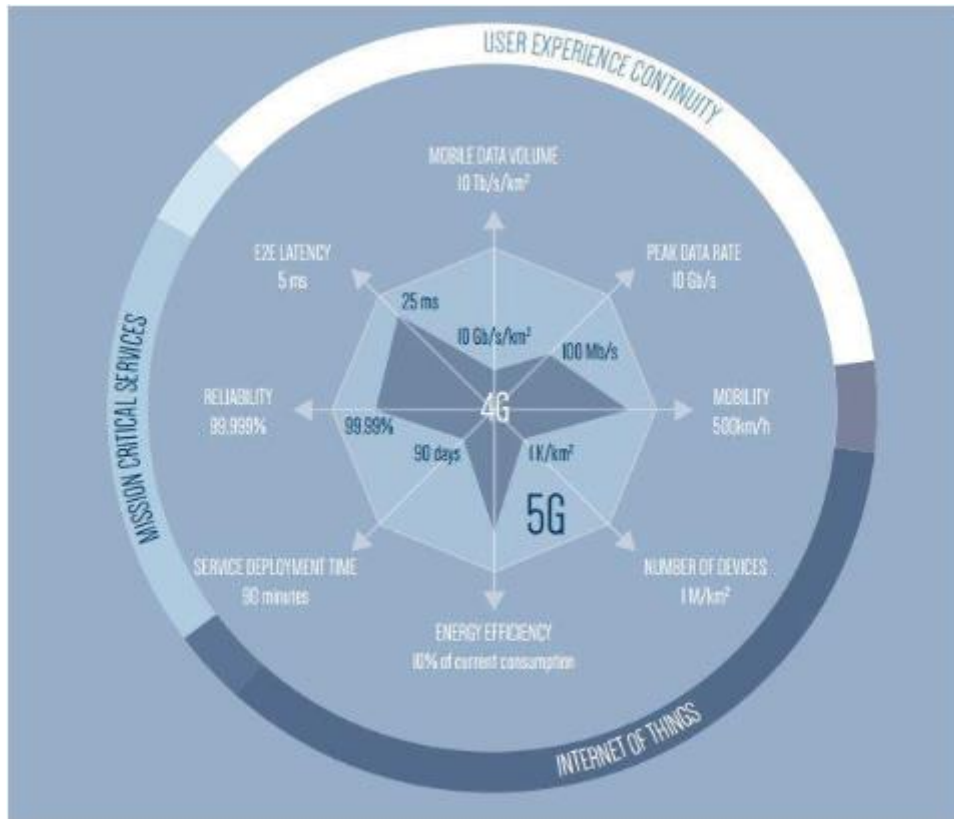
βρίσκεται στο σταθμό βάσης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5. Αυτό όμως απαιτεί, το δίκτυο να έχει ανθεκτικότητα, διαθεσιμότητα και καλή κάλυψη έχοντας πάντα ως γνώμονα το TCO να μην είναι απαγορευτικά μεγάλο.



Σχήμα 5 – Σύγκριση δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη

Θα υπάρχει δυνατότητα Πολλαπλής Μίσθωσης (Multi-tenancy). Τα 5G δίκτυα πρέπει να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους σε όλες τις φυσικές υποδομές ανεξαρτήτως αν ανήκουν σε έναν ή περισσότερους παρόχους και να μπορούν να εκμεταλλεύονται αποδοτικά τα ήδη υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα περιορίζοντας τις μεταξύ τους παρεμβολές. Η πυκνότητα (Density) χρησιμοποίησης του δικτύου θα μεγιστοποιηθεί αφού οι απαιτήσεις των 5G δικτύων για μεγαλύτερη χωρητικότητα το καθιστούν απαραίτητο. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κυψελών, παρατηρείται το φαινόμενο των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών (inter-cell interference) γεγονός που μειώνει την απόδοση του συστήματος, ειδικά όσο πλησιάζουμε στα όρια της κυψέλης. Ο έλεγχος αυτών των παρεμβολών, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση CoMP (Coordinated Multi Point), είτε με συντονισμένη κωδικοποίηση πριν την αποστολή ή με άλλους αλγορίθμους συντονισμού των κυψελών που έχουν προταθεί. Στο σχεδιασμό του δικτύου πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές οι οποίες θα εξασφαλίζουν τον απομακρυσμένο συντονισμό των λειτουργιών του δικτύου και θα απαιτούν τη λιγότερο δυνατή συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα. Αυτό, πέρα από την ευκολία της κεντρικής διαχείρισης (Manage ability), μας δίνει και τη δυνατότητα να μειώσουμε το λειτουργικό κόστος του δικτύου. Επιπλέον αναλόγως την υπηρεσία (network, data κλπ.) και αναλόγως την περίπτωση κάθε φορά (π.χ. σε περίπτωση αυξημένης κίνησης) η δυναμική διαχείριση πόρων (Resource management) είναι απαραίτητη στα 5G δίκτυα, έτσι ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα και έλεγχο για τον βέλτιστο διαμορισμό των πόρων. Να υπάρχουν δυνατότητες εξέλιξης αφού θα πρέπει να έχουμε προνοήσει για την εύκολη εγκατάσταση και δημιουργία νέων υπηρεσιών, απαγκιστρώνοντας τους παρόχους από τις μεγάλες επενδύσεις σε συγκεκριμένους παρόχους υλικού υπολογιστή (hardware) και ευνοώντας τις ανοιχτού λογισμικού (open-source) λύσεις δημιουργώντας έτσι ευκαιρία για να εισέλθουν νέοι παίκτες στην αγορά, αλλά και να μειώσουμε το κεφαλαιακό μας κόστος (CAPEX). Οι ετερογενείς συσκευές, υπηρεσίες και τα ετερογενή δίκτυα πρόσβασης που πρέπει το 5G να υποστηρίζει, αναμφισβήτητα θα οδηγήσουν σε δραστικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Προκειμένου να μπορέσουμε να ανταπεξέλθουμε σε αυτές τις ετερογένειες, η ευελιξία του δικτύου θα είναι σημείο κλειδί για τα δίκτυα της 5ης γενιάς. Η ευελιξία του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί κατά το σχεδιασμό του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες όπως το SDN, το NFV (Network Function Virtualization) και το υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing). Τέλος είναι απαραίτητη η υποστήριξη των προηγούμενων γενεών δικτύων (backward-compatibility). Το 5G θα αθροίζει τις νέες τεχνολογίες κινητών δικτύων και ασύρματης πρόσβασης με τα δίκτυα προηγούμενων γενεών, προκειμένου να

επιτυγχάνει την εκ νέου εκμετάλλευσή τους. Η συμβατότητα (Legacy Support), ανέκαθεν ήταν πρόβλημα όταν θέλαμε να εγκαταστήσουμε μια νέα τεχνολογία. Όλα αυτά τα συστήματα πρέπει να συνεργάζονται και να εξασφαλίζουν αδιάκοπη διαλειτουργικότητα. Στα 5G δίκτυα αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία Εικονικών Δικτύων (Network Virtualization), καθώς νεότερες και προηγούμενες εκδόσεις μπορούν να συνυπάρξουν, βλέποντας τις προηγούμενες εκδόσεις ως ιδεατά δίκτυα μέσα στο δίκτυο αυτό. Στο Σχήμα 6 φαίνονται οι θεωρητικές δυνατότητες του 5G σε σχέση με τις υπάρχουσες δυνατότητες του 4G.



Σχήμα 6 – Γράφημα Radar που απεικονίζει τις δυνατότητες του 5G σε σύγκριση με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G

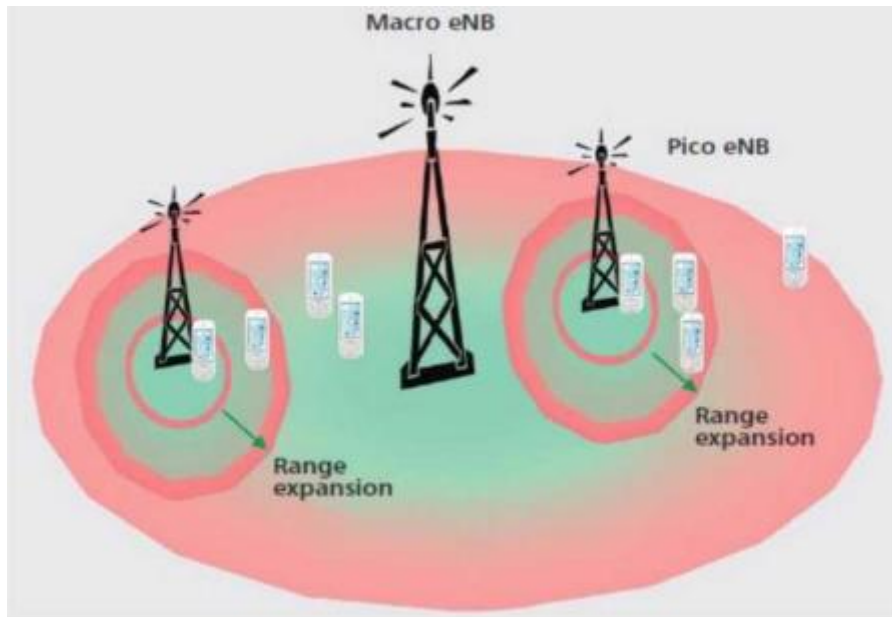
2.3 Σενάρια αρχιτεκτονικής

Το 5G σύστημα αποτελείται από το τερματικό 5G (που κατέχει τον κύριο ρόλο στην αρχιτεκτονική) και από ένα πλήθος ανεξάρτητων, αυτόνομων και διαφορετικών ραδιοτεχνολογιών RAT (Radio Access Technologies), όπου με τη σειρά τους μπορούν να είναι συνδεδεμένες με διάφορους διακομιστές (servers) ή στο ευρύτερο διαδίκτυο. Το τερματικό και κάθε RAT έχει δική του IP σύνδεση για τους ευρύτερους χρήστες του διαδικτύου. Κάθε RAT έχει τη δική του διεπαφή για το τερματικό. Για παράδειγμα για να υπάρχει πρόσβαση σε τέσσερα διαφορετικά RATs, χρειάζονται να δημιουργηθούν τέσσερις διαφορετικές διεπαφές στο τερματικό. Είναι γνωστό πως για να επικοινωνήσει ένας χρήστης με έναν διακομιστή χρησιμοποιώντας το IP πρωτόκολλο, πρέπει να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ των δύο. Σε έναν κινητό χρήστη, ο οποίος αλλάζει RATs, χρειάζεται για κάθε αλλαγή να δημιουργείται και μια καινούργια σύνδεση. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι ευέλικτη για τα 5G συστήματα και εφαρμόζεται στη τωρινή αρχιτεκτονική συστημάτων, για την

πρόσβασή τους στο διαδίκτυο. Για να βελτιωθεί αυτή η περίπλοκη λειτουργία προτείνεται η δημιουργία ενός καινούργιου επιπέδου δικτύου, το οποίο θα διαχειρίζεται τα σημεία πρόσβασης δικτύου από τα διάφορα RATs και θα τα μεταφέρει σε ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου (Network Level of Abstraction). Η επινόηση του καινούργιου αυτού επιπέδου θεωρείται ουσιαστικό και κρίσιμο στην αρχιτεκτονική των 5G δικτύων. Για την ολοκλήρωση της παραπάνω αρχιτεκτονικής χρησιμοποιείται και μια μονάδα ελέγχου όπου συνεργάζεται με το τερματικό, διαχειρίζεται τις διεργασίες -εφαρμογές, δρομολογεί πακέτα και όλα αυτά κάτω από συγκεκριμένες πολιτικές (policies). Την ίδια στιγμή η μονάδα αποτελεί τη βασική αρχή που καθορίζει το QoS σε κάθε μετάδοση. Βρίσκεται μεταξύ χρήστη και διαδικτύου και αντιπροσωπεύει ένα ιδανικό σύστημα όπου εξετάζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των διαφόρων RATs. Είναι σε θέση να προβάλλει μια ρεαλιστική εικόνα ποιότητας που αντιστοιχεί σε κάθε εφαρμογή χρήστη που απευθύνεται σε κάποιον διακομιστή. Το νέο αυτό αφηρημένο επίπεδο δικτύου παρέχεται με τη δημιουργία IP tunnel με βάση τις διασυνδέσεις (interfaces) των IP για κάθε RAT. Στη πράξη σε μια σύνδεση μεταξύ χρήστη και τερματικού, θα δημιουργούνται tunnels μεταξύ τερματικού και της μονάδας ελέγχου, τον επονομαζόμενο δρομολογητή πολιτικών (Policy Router), ο οποίος αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των πακέτων κάτω από συγκεκριμένες πολιτικές, που καθορίζει το πρωτόκολλο. Ο χρήστης θα θέτει μία IP διεύθυνση από τη μεριά του και θα δημιουργούνται τόσα tunnels, όσες είναι και οι RATs που συνδέεται. Από εκεί και πέρα θα αναλαμβάνει το πρωτόκολλο για τα περαιτέρω. Έτσι επιτυγχάνεται και η αφαίρεση του δικτύου, μεταξύ σύνδεσης χρήστη και τερματικού.

2.3.1 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου (network densification)

Ακολουθώντας την τακτική πυκνοποίησης του δικτύου (network densification) θα δημιουργήσουμε πολύ πυκνές κυψέλες εγκαθιστώντας πολλούς σταθμούς βάσης επιτυγχάνοντας υψηλό εύρος ζώνης, μικρό χρόνο καθυστέρησης κ.α. Η πυκνή τοποθέτηση κυψελών έχει ήδη αποφέρει πολλά κέρδη στις συχνότητες κάτω από τα 6 Hz. Οι πάροχοι αποφασίζουν πού θα εγκαταστήσουν τις νέες κυψέλες με γνώμονα το κόστος προετοιμασίας της περιοχής που θα εγκατασταθεί να σταθμίζεται με το όφελος που θα δημιουργείται από την κάλυψη που θα παρέχει στη γεωγραφική περιοχή η κυψέλη αυτή. Η τεχνική πυκνοποίησης του δικτύου περιλαμβάνει τη χωρική πυκνότητα (densification over space) όπου εγκαθιστούμε σε μεγάλη πυκνότητα νέες μικρές κυψέλες (SmallCells) και τη συχνοτική πυκνότητα (densification over frequency) όπου χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες περιοχές του ραδιοφάσματος σε διαφορετικές συχνότητες. Στο Σχήμα 7 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επεκτείνουμε την κάλυψη μιας κυψέλης με τη χρήση της τεχνολογίας πυκνοποίησης του δικτύου. Κατά την χωρική πυκνωση αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών ανά κόμβο, αυξάνουμε την πυκνότητα των εγκατεστημένων σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή και προσπαθούμε να διανέμουμε ομοιόμορφα τους χρήστες στους σταθμούς βάσης. Κατά την συχνοτική πυκνωση χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τα 500 MHz ως τις υπερχαμηλές συχνότητες (30-300Mhz).



Σχήμα 7 – Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης με χρήση Network Densification

Η αύξηση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων εξαρτιόταν ανέκαθεν από τους εξής τρεις παράγοντες:

- i** Αύξηση του αριθμού των ασύρματων κόμβων του δικτύου.
- ii** Βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος
- iii** Βελτίωση της αποδοτικότητας των συνδέσεων.

Το εύρος ζώνης κάθε σταθμού βάσης, μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας επιπλέον φάσμα το οποίο οδηγεί σε γραμμική αύξηση της χωρητικότητας. Όσο αφορά την κίνηση που δέχεται κάθε κόμβος, μπορούμε να την μειώσουμε εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και φροντίζοντας να διαμοιράζεται το φορτίο του δικτύου όσο καλύτερα γίνεται σε κάθε κόμβο. Τα UDN (Ultra Dense Network) θεωρούνται προαπαιτούμενα για την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας μεταξύ των σταθμών βάσης αλλά και για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Τα UDNs αντιμετωπίζουν την υψηλή κίνηση στη μετάδοση δεδομένων μέσω της πυκνωσης της υποδομής. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα, να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των ραδιοσυνδέσεων και να υπάρξει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Τα UDNs γίνονται και θα γίνονται όλο και πυκνότερα, γεγονός το οποίο θα αυξήσει τις μεταξύ τους παρεμβολές αλλά και το κόστος για κάθε κόμβο πρόσβασης. Εφαρμόζοντας την κλασική τεχνική της πυκνοποίησης του δικτύου, μπορούμε να λύσουμε το θέμα της αυξημένης κίνησης στη μετάδοση δεδομένων, όμως αυτό θα σήμαινε πολύ μεγάλο κόστος για την επένδυση σε υποδομές. Ακόμη, οι επιπλέον σταθμοί βάσης θα συνεπάγονταν και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, η οποία αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του λειτουργικού κόστους του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου είναι ανάλογη του αριθμού των εγκατεστημένων σταθμών βάσης. Ένα ακόμα πρόβλημα που παρουσιάζεται με την τεχνική αυτή, είναι το γεγονός ότι η μεγάλη εύρους μετάδοση των μακροκυψελών (Macrocells), συρρικνώνει σημαντικά την κάλυψη των μικροκυψελών οδηγώντας σε μη-βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων τους. Ακόμα και αν οι μικροκυψέλες έχουν τοποθετηθεί μέσα στο δίκτυο με το βέλτιστο τρόπο, είναι πιθανό να μην χρησιμοποιούνται, αντίστοιχα, με το βέλτιστο τρόπο λόγω διακυμάνσεων στην κίνηση των δεδομένων. Επομένως εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και πυκνώνοντας ακόμα περισσότερο τις υπάρχουσες κυψέλες αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση, οι εκπομπές CO₂ και το συνολικό κόστος επενδύσεων πράγμα το οποίο αντιτίθεται στους στόχους του 5G. Αυτός ο διαμοιρασμός πόρων

που περιγράφουμε πιο πάνω απαιτεί ένα μηχανισμό συγχρονισμού και σηματοδότησης ελέγχου μεταξύ των σταθμών, πράγμα το οποίο θα μας οδηγήσει αργότερα να εισάγουμε «νοημοσύνη» στο δίκτυο μας.

2.3.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου

Οι παραδοσιακές φυσικές υποδομές, περιορίζονται από τον αριθμό των πόρων που μπορούν να αξιοποιήσουν, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να αποτελέσει περιορισμό για το 5G. Επιπλέον, το κόστος των υπολογιστικών συσκευών καθώς και των διαθέσιμων πόρων τους (αποθηκευτικός χώρος, CPU κλπ.) επιβάλλει την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στο σχεδιασμό του δικτυακού μοντέλου. Ακόμη, είναι αναγκαίο στα υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα, να υπάρχει συντονισμένη συνεργασία για την παροχή των πόρων κατά την ανάπτυξη υπηρεσιών. Η υλοποίηση των υπηρεσιών στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, πραγματοποιείται παραδοσιακά από τους παρόχους με την εγκατάσταση φυσικών συσκευών και φυσικού εξοπλισμού οι οποίοι υλοποιούν κάποια συνάρτηση για την λειτουργία κάποιας υπηρεσίας. Οι υπηρεσίες αυτές που περιγράφουμε, απαιτούν συνεργασία μεταξύ των συναρτήσεων που τις υλοποιούν, πράγμα το οποίο πρέπει να αντικατοπτρίζεται και στην τοπολογία του δικτύου και στον εντοπισμό των συσκευών που υλοποιούν τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Αυτοί οι περιορισμοί σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις του 5G για υψηλή ποιότητα και σταθερότητα, οδηγούν σε μεγάλους κύκλους ανάπτυξης προϊόντων (product-cycles), σε πολύ χαμηλή ταχύτητα δημιουργίας νέων υπηρεσιών καθώς και άμεση εξάρτηση από εξειδικευμένο -άρα και ακριβό- υλικό υπολογιστή. Οι λόγοι αυτοί, μας επιβάλλουν να πραγματοποιήσουμε το επόμενο βήμα στο σχεδιασμό των δικτύων. Τα δίκτυα, εξελίσσονται προς ένα πολύ δυναμικό και ευέλικτο περιβάλλον που θα αποτελούνται από εικονικούς πόρους (virtual resources), οι οποίοι θα μπορούν να δημιουργούνται στιγμιαία και να παρέχονται κατ' απαίτηση του πελάτη προκειμένου να αναπτύξει τις υπηρεσίες του ή κατ' απαίτηση του παρόχου προκειμένου να μπορέσει να εκτελέσει τις εσωτερικές του λειτουργίες. Αυτές οι εικονικές λειτουργίες (virtual functions) είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους προκειμένου να μπορούν να αλληλοεπιδρούν και να συνεργάζονται, με εικονικές συνδέσεις (virtual links) τα οποία επίσης μπορούν να δημιουργηθούν δυναμικά για να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη τα ετερογενή δίκτυα, τα οποία θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των 5G δικτύων και το γεγονός ότι οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές των δικτύων θα πρέπει να συνυπάρχουν, να μοιράζονται πόρους και να συνεργάζονται στο περιβάλλον του δικτύου, κατανοούμε ότι θα πρέπει να υπάρχει μια ενιαία διαχείριση.

2.4 Network Function Virtualization (NFV)

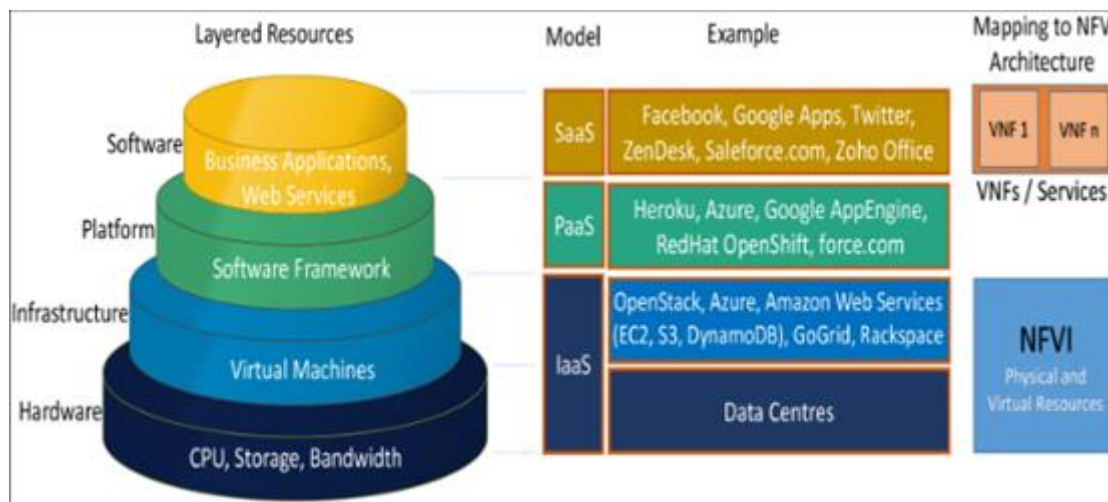
Η Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (Network Function Virtualization) προσφέρει μεγαλύτερη δυνατότητα διαχείρισης, προωθεί την ετερογένεια του δικτύου και αυξάνει την ευκολία εγκατάστασης νέων τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα, μας δίνεται η δυνατότητα μέσω της χρήσης της παραπάνω τεχνολογίας να υλοποιούμε και να τρέχουμε διαφορετικά στιγμιότυπα εικονικών λειτουργιών και υπηρεσιών χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή «γενικού σκοπού», ο οποίος διαμοιράζεται μεταξύ διάφορων χρηστών. Αυτό είναι και το πρώτο βήμα για τη συνεργασία του τομέα των δικτύων και της πληροφορικής και εκ προοιμίου παρατηρούνται μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως:

- i) **σημαντική μείωση του κεφαλαιακού κόστους και του λειτουργικού κόστους, αφού ένας υπολογιστής γενικού σκοπού είναι φθηνότερος από τη χρήση εξειδικευμένων συσκευών**
- ii) **επίσης μειωμένος θα είναι και ο λεγόμενος χρόνος διάθεσης προς την αγορά (time-to-market), δηλαδή ο χρόνος να δημιουργήσουμε μια υπηρεσία και να είναι έτοιμη για εμπορική χρήση**
- iii) **και μεγαλύτερη ευκολία όσο αφορά την αναβάθμιση των υπαρχουσών υπηρεσιών**

Επιπλέον, μια άλλη προοπτική που μας παρέχει η τεχνολογία NFV, είναι η δημιουργία εικονικών δικτύων, δηλαδή δικτύων τα οποία είναι ανεξάρτητα από το υπάρχον υλικό του υπολογιστή. Ακόμη, μπορούμε να πάμε ένα βήμα πιο πέρα, συγχωνεύοντας εικονικούς κόμβους, εικονικές συνδέσεις ή ακόμα και ολόκληρα εικονικά δίκτυα και εγκαθιδρύοντας ενιαία διαχείριση. Παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα για δημιουργία νέων δικτυακών υπηρεσιών και εφαρμογών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις διαφορετικών πελατών.

2.4.1 Αρχιτεκτονική NFV

Η τεχνολογία NFV εξαλείφει την εξάρτηση μεταξύ μιας δικτυακής λειτουργίας (Network Function) με τον απαραίτητο εξειδικευμένο υπολογιστή για την υλοποίηση της-όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά φυσικά δίκτυα, δημιουργώντας ένα περιβάλλον εκτέλεσης και διαχείρισης των διασυνδέσεων για τις εικονικές δικτυακές λειτουργίες (virtual network functions). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαμοιρασμό του υλικού του υπολογιστή από διαφορετικές VNFs (virtual network functions) με την μορφή των VMs (Virtual Machines). Επιπλέον, η συγκέντρωση του συνολικού υλικού του υπολογιστή ευνοεί τον μαζικό και εύκολο διαμοιρασμό της NFV υποδομής, σχηματίζοντας τους πόρους NFVI (Network Function Virtualization Infrastructure), φαινόμενο που παρατηρείται και στο υπολογιστικό νέφος όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8 που ακολουθεί. Όπως και με τις υπηρεσίες του υπολογιστικού νέφους, η τεχνολογία NFV δημιουργεί επιχειρηματικά μοντέλα και ευκαιρίες αντίστοιχα των IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Platform as a Service) και SaaS (Software as a Service) του νέφους. Για παράδειγμα, ο πάροχος μιας VNF δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιοκτήτης της VNF υποδομής που απαιτείται για την υλοποίηση και τη λειτουργία της VNF.



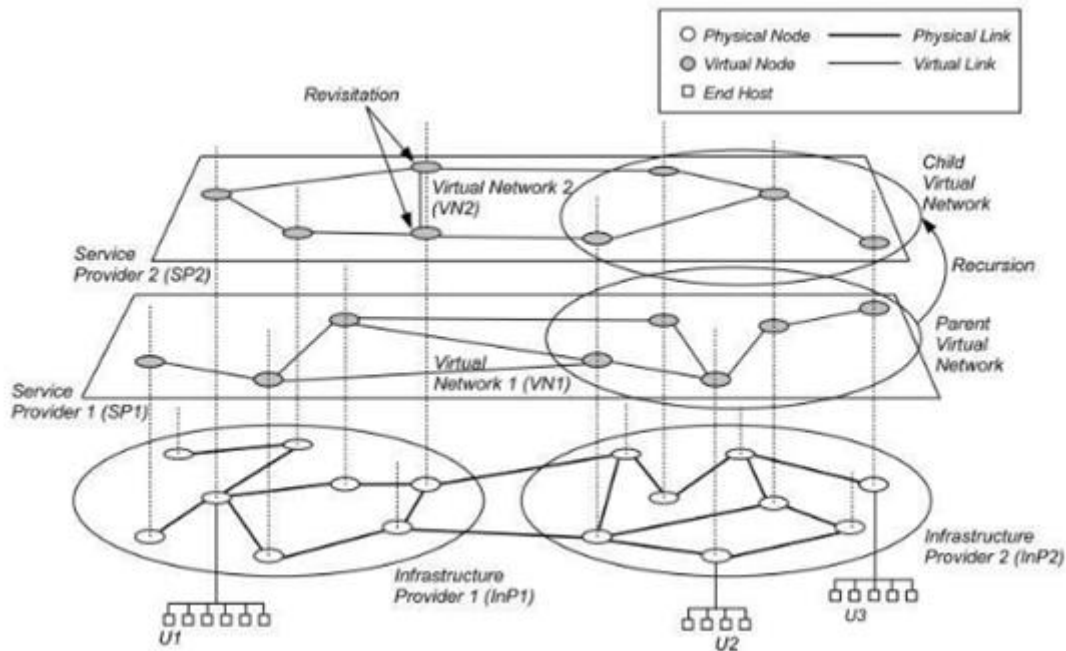
Σχήμα 8 – Μοντέλο υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους και αντιστοίχιση τους στην αρχιτεκτονική του NFV

Με την τεχνολογία Εικονικών Δικτύων, διαχωρίζεται ο ρόλος των παραδοσιακών παρόχων ίντερνετ (Internet Service Providers) και δημιουργούνται δύο νέα επιχειρηματικά πεδία ανεξάρτητα μεταξύ τους:

- i. οι InPs (Infrastructure Providers), οι οποίοι διαχειρίζονται τη φυσική υποδομή του δικτύου και οι
- ii. SPs (Service Providers), οι οποίοι δημιουργούν εικονικά δίκτυα συναθροίζοντας πόρους από διαφορετικούς InPs και προσφέροντας ολοκληρωμένες υπηρεσίες

Πιο συγκεκριμένα, οι InPs εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου, με τη μορφή κέντρων δεδομένων (data centers) και φυσικών δικτύων. Πάνω σε αυτούς τους πόρους,

υλοποιούνται οι εικονικοί πόροι οι οποίοι προσφέρονται σε διαφορετικούς SPs μέσω μιας προγραμματιζόμενης διασύνδεσης. Επίσης οι InPs, μπορούν να αποφασίσουν με ποιο τρόπο θα διατεθούν οι διαθέσιμοι διαμοιραζόμενοι πόροι στους SPs. Ένας InP μπορεί να χρησιμοποιεί δημόσια κέντρα δεδομένων ή ιδιωτικούς διακομιστές όπως διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι. Αν ένας InP δεν είναι ικανός να προσφέρει τους απαραίτητους πόρους σε έναν SP για να υλοποιήσει την υπηρεσία του, μπορούν να γίνουν συμφωνίες έτσι ο SP να λαμβάνει πόρους από 2 διαφορετικούς InPs προκειμένου να συμπληρώσει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων. Οι SPs νοικιάζουν πόρους από πολλαπλούς InPs προκειμένου να δημιουργήσουν και να εγκαταστήσουν εικονικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας τους διαμοιραζόμενους πόρους που τους δόθηκαν για να προσφέρουν στους πελάτες τους ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Κάθε εικονικό δίκτυο αποτελείται από εικονικούς κόμβους οι οποίοι συνδέονται με εικονικές συνδέσεις. Ένας εικονικός κόμβος είναι ένα στοιχείο λογισμικού που εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης. Μια εικονική σύνδεση είναι μια λογική σύνδεση μεταξύ 2 εικονικών κόμβων, η οποία διαθέτει δυνατότητα να αλλάζει με δυναμικό τρόπο τις ιδιότητες της. Κάθε εικονικός κόμβος φιλοξενείται σε ένα φυσικό κόμβο ενώ κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα εικονικά δίκτυα, διαμοιράζοντας τους πόρους τους σε άλλους SPs δίνοντας τους την εικόνα ότι πρόκειται για έναν εικονικό InP. Ένας SP μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε άλλους SPs. Ακόμη οι πάροχοι υπηρεσιών προσφέρουν υλοποιήσεις λογισμικού για NFs (Network Functions). Στο Σχήμα 9, μπορούμε να δούμε ένα περιβάλλον Εικονικών Δικτύων, που περιλαμβάνει τόσο φυσικούς όσο και εικονικούς παρόχους καθώς και τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους.

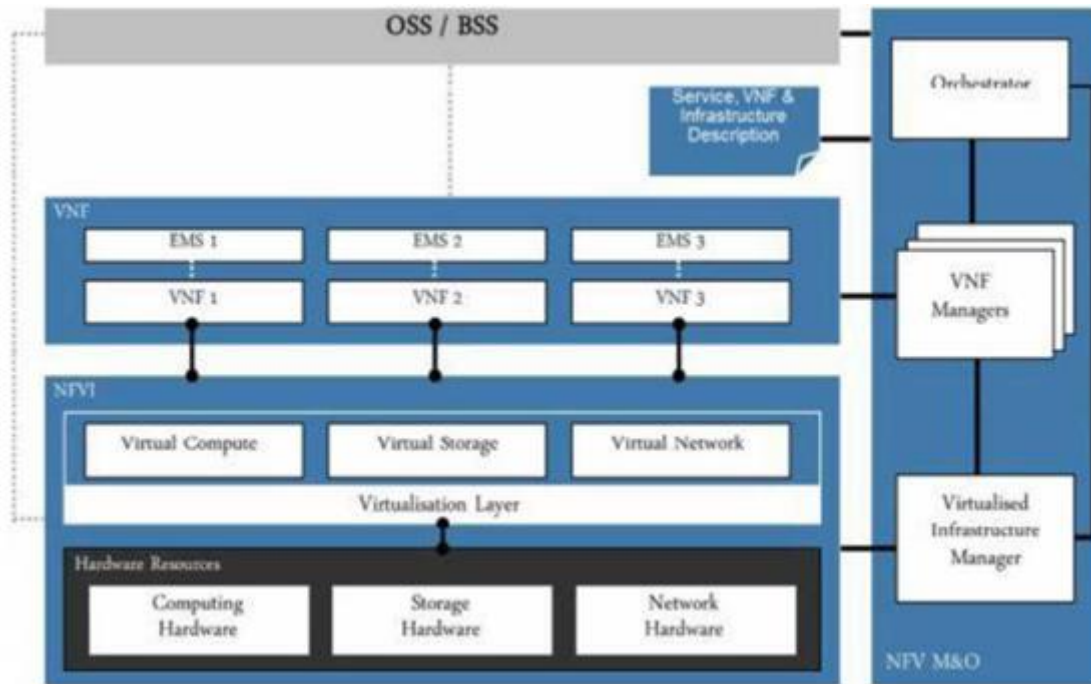


Σχήμα 9 – Περιβάλλον εικονικών δικτύων

Επιπροσθέτως, η δυνατότητα να εγκαθιστούμε και να τρέχουμε εξ' αποστάσεως VNFs χρησιμοποιώντας τις NFV υποδομές που προσφέρονται από διαφορετικούς SPs, επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών σε παγκόσμιο επίπεδο αφού δεν υπάρχουν χωροταξικοί περιορισμοί. Σύμφωνα με το ινστιτούτο ETSI (European Telecommunication Standards Institute), η αρχιτεκτονική του NFV αποτελείται από 3 επίπεδα:

- a) **NFVI,**
- b) **VNFs και**
- c) **NFV MANO (Management and Orchestration).**

Ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των επιπέδων της αρχιτεκτονικής του NFV. Το NFVI αποτελείται από πόρους είτε υπό τη μορφή λογισμικού είτε υπό τη μορφή υλικού του υπολογιστή, οι οποίοι συγκεντρώνονται προκειμένου να σχηματίσουν το περιβάλλον στο οποίο θα εγκατασταθούν οι VNFs. Οι φυσικοί πόροι περιλαμβάνουν COTS (Commercial off the Shelf) υλικό υπολογιστή, αποθηκευτικούς χώρους και δικτυακά στοιχεία, τα οποία συγκεντρώνονται προκειμένου να προσφέρουν υπολογιστική ισχύ, συνδεσιμότητα και αποθηκευτικό χώρο στις VNFs. Οι εικονικοί πόροι δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ένα στρώμα εικονοποίησης (Virtualization Layer), το οποίο βασίζεται σε έναν επόπτη (hypervisor) ο οποίος υλοποιεί τους εικονικούς πόρους χρησιμοποιώντας την υποδομή φυσικών πόρων του από κάτω επιπέδου. Σε ένα κέντρο δεδομένων, οι πόροι αναπαρίστανται με τη μορφή μιας ή περισσοτέρων VMs, ενώ τα εικονικά δίκτυα αποτελούνται από εικονικούς κόμβους και συνδέσεις. Η VNF είναι υλοποίηση υπό μορφή λογισμικού μιας λειτουργίας του δικτύου. Αυτή η υλοποίηση τρέχει βασιζόμενη στην NFVI υποδομή, δηλαδή είναι υλοποίηση μιας NF όπου εγκαθίσταται σε εικονικούς πόρους π.χ. μια VM. Συνήθως οι VNFs συνοδεύονται από ένα EMS (Element Management System), το οποίο διαχειρίζεται τη συγκεκριμένη VNF. Η VNF έρχεται να εκτελέσει τις λειτουργίες ενός παραδοσιακού κόμβου δικτύου υπό τη μορφή λογισμικού, απαλλάσσοντας τους από το υλικό του υπολογιστή. Μια VNF μπορεί να υλοποιείται χρησιμοποιώντας παραπάνω από μια VMs, όπου σε αυτή την περίπτωση κάθε VM φιλοξενεί ένα διαφορετικό συστατικό στοιχείο της VNF. Μια υπηρεσία που προσφέρεται από έναν SP, αποτελείται από την σύνθεση μίας ή περισσότερων VNFs οι οποίες τρέχουν σε VMs. Το NFV MANO προβλέπει και διαχειρίζεται τους απαραίτητους πόρους για τον εφοδιασμό των VNFs καθώς και λειτουργίες όπως οι τροποποιήσεις αυτών των VNFs ή τροποποιήσεις στις υποδομές που αυτές χρησιμοποιούν. Περιλαμβάνει επίσης την οργάνωση και τη διαχείριση των φυσικών/εικονικών πόρων και συνεισφέρει στην εικονικοποίηση (virtualization) της φυσικής υποδομής. Επιπλέον, περιλαμβάνονται βάσεις δεδομένων οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση πληροφοριών και μοντέλων, τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες των VNFs και των εικονικών πόρων, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Γενικότερα, το NFV MANO εστιάζει στις εργασίες διαχείρισης που αφορούν την εικονοποίηση ενός δικτύου. Ακόμη, καθορίζει διασυνδέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των εσωτερικών μηχανισμών του MANO αλλά και για την επικοινωνία και τη συνεργασία με τα συστήματα διαχείρισης των παραδοσιακών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να επικοινωνεί και να συνεργάζεται με τα OSS (Operating Support Systems) και τα BSS (Business Support Systems), επιτρέποντας έτσι για διαχείριση τόσο των VNFs αλλά και των λειτουργιών που τρέχουν στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα. Στο Σχήμα 10, απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός VNF περιβάλλοντος εργασίας.

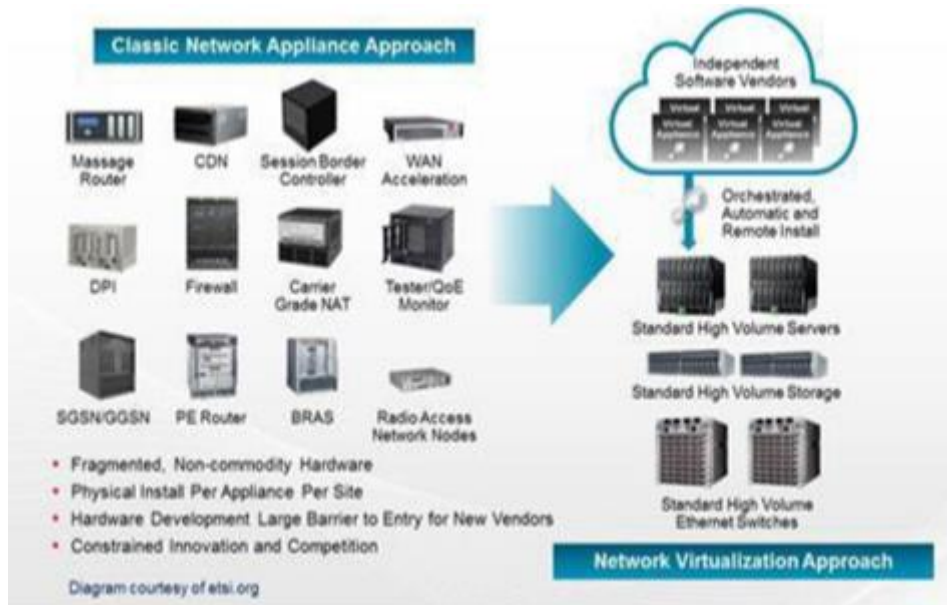


Σχήμα 10 – Η αρχιτεκτονική ενός NFV περιβάλλοντος εργασίας

2.4.2 Σενάρια Χρήσης NFV

Η τεχνολογία NFV στοχεύει στην αλλαγή του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται παραδοσιακά τα δίκτυα, προτείνοντας τη χρήση τεχνολογιών για την υλοποίηση εικονικών συναρτήσεων που επιτελούν λειτουργίες δικτυακών συσκευών και τοποθέτησή τους σε μεγάλους απλούς διακομιστές. Η διαδικασία αυτή, φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 11 που ακολουθεί. Αυτοί οι διακομιστές με τη σειρά τους, μπορούν να τοποθετηθούν σε κέντρα δεδομένων ή σε κόμβους του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία NFV αφορά την υλοποίηση των δικτυακών λειτουργιών σε λογισμικό, το οποίο μπορεί να εγκαθίστανται και να τρέχει πάνω σε απλό υλικό υπολογιστή. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα οι δικτυακές λειτουργίες αυτές να μπορούν να μετακινούνται ή να δημιουργούνται σε διάφορα σημεία του δικτύου όταν αυτό απαιτείται, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εγκατάσταση νέου εξειδικευμένου εξοπλισμού. Έτσι λοιπόν, καταλαβαίνουμε πώς η τεχνολογία NFV μειώνει το κόστος για τους δικτυακούς παρόχους, αφού ούτε χρειάζεται να επενδύσουν σε εξειδικευμένους διακομιστές/ υλικό υπολογιστή για το στήσιμο του δικτύου αλλά ούτε κατά την αναβάθμισή του. Η τεχνολογία NFV, υπόσχεται στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών περισσότερη ευελιξία στο να διευρύνουν τις δυνατότητες του δικτύου τους και τις υπηρεσίες που προσφέρουν στους πελάτες τους. Επίσης, τους προσφέρει τη δυνατότητα να εγκαθιστούν νέες υπηρεσίες δικτύου ή να αναβαθμίζουν παλαιότερες πιο γρήγορα και φθηνότερα. Πιο συγκεκριμένα, για την επίτευξη των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση του δικτύου κάποιες κατευθύνσεις. Να επιτευχθεί αποσύνδεση του λογισμικού με το υλικό του Υπολογιστή. Εφόσον τα στοιχεία του δικτύου πλέον δεν θα αποτελούνται από μία σύνθεση ειδικού υλικού υπολογιστή και λογισμικού, η υλοποίηση και η εξέλιξη του καθενός θα είναι ανεξάρτητη από του άλλου. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη διαφορετικών χρονοδιαγραμμάτων για την εγκατάσταση και συντήρηση του λογισμικού και του υλικού του υπολογιστή. Να υπάρχει ευέλικτη εγκατάσταση NFs, αφού η απόσχιση του λογισμικού από το υλικό του υπολογιστή ευνοεί την ανακατανομή και το διαμοιρασμό των πόρων της κοινής υποδομής, επιτρέποντας παράλληλα στο υλικό του υπολογιστή και το λογισμικό να εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες σε ποικίλες χρονικές στιγμές. Αυτό βοηθάει τους παρόχους να

δημιουργήσουν νέες υπηρεσίες γρήγορα πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Έτσι, υπηρεσίες ή μέρος των υπηρεσιών αυτών μπορούν να δημιουργηθούν σε οποιαδήποτε συσκευή η οποία υποστηρίζει NFV και οι μεταξύ τους συνδέσεις να υλοποιηθούν με ευέλικτο τρόπο. Να υποστηρίζεται δυναμική δυνατότητα κλιμάκωσης (Dynamic Scaling). Η δυνατότητα υλοποίησης της λειτουργίας μιας NF με μορφή λογισμικού προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον δυναμικό εφοδιασμό με πόρους μιας VNF, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δίκτυο κάθε στιγμή.



Σχήμα 11 – Παραδείγματα Network Function Virtualization

2.4.3 Οφέλη και προκλήσεις υιοθέτησης της NFV τεχνολογίας

Το NFV σύμφωνα με το ινστιτούτο ETSI, θα αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στους παρόχους που θα υιοθετήσουν την τεχνολογία αυτή και μερικά από αυτά θα αναφερθούν παρακάτω :

- Η ενοποίηση και ο διαμοιρασμός των πόρων του υλικού του υπολογιστή (φυσικών και εικονικών), οδηγούν σε μείωση του κόστους για την απόκτηση και συντήρηση εξοπλισμού καθώς και μείωση σε ενεργειακά κόστη.
- Η τεχνολογία NFV, επιτρέπει τον διαμοιρασμό των δικτυακών πόρων μεταξύ διαφορετικών VNFs με πολύ πιο εύκολο και προσαρμοστικό τρόπο, ενώ οι πόροι που ανατίθενται σε κάθε VNF μπορεί να αναδιανέμονται με δυναμικό τρόπο. Αυτή η δυνατότητα, ανοίγει το δρόμο για τη δημιουργία εξειδικευμένων υπηρεσιών με βάση τις απαιτήσεις των πελατών.
- Το NFV προσφέρει τη δυνατότητα για γρηγορότερη και πιο εύκολη υλοποίηση NFs σε αρκετά μικρότερο κόστος και με πολύ μικρότερο ρίσκο. Με άλλα λόγια μιλάμε για μικρότερο χρόνο διάθεσης προς την αγορά.
- Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του NFV είναι το γεγονός πως υποστηρίζει την ετερογένεια των παρατάξεων που θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των 5G δικτύων.

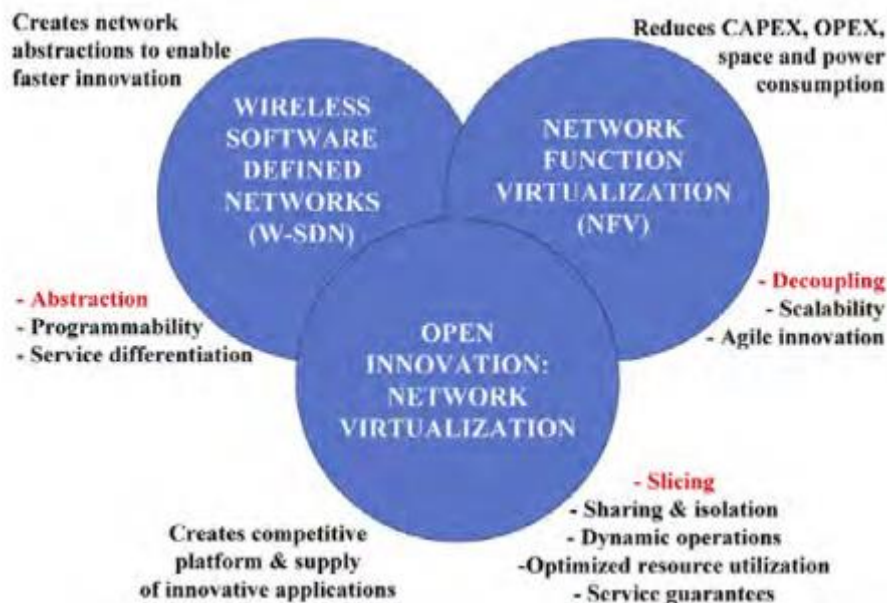
Η τεχνολογία αυτή εξαλείφει τους περιορισμούς που προκύπτουν από την ανάγκη ιδιοκτησίας εξειδικευμένου υλικού του υπολογιστή για την υποστήριξη υπηρεσιών. Οποιοσδήποτε μπορεί εύκολα, μόνο και μόνο από τον ορισμό του NFV, να αντιληφθεί τα τεράστια οφέλη που έχει για δίκτυα. Οι εικονικοποιημένες τροποποιήσεις που προτείνει δεν χρειάζονται νέο εξοπλισμό για να πραγματοποιηθούν. Αυτό κατ' επέκταση σημαίνει αναβάθμιση του δικτύου δηλαδή καλύτερη παροχή υπηρεσιών στους χρήστες του, χωρίς να χρειάζεται οι πάροχοι να βάλουν βαθιά το χέρι στην τσέπη. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι είναι εφικτό να εφαρμοστούν λειτουργίες δικτύου σε χαμηλού

κόστους υλικό, όπως σε πλατφόρμες βασισμένες σε επεξεργαστές γενικού σκοπού π.χ. για την επεξεργασία σήματος στο φυσικό επίπεδο. Επίσης σε ένα ακόμα παράδειγμα οι πάροχοι θα μπορούν να τρέξουν ένα τείχος προστασίας, που βασίζεται σε λογισμικό ανοιχτού κώδικα, σε μια Virtual Machine (VM) πλατφόρμας x86. Παράλληλα η μείωση του υλικού εξοπλισμού σημαίνει μείωση και στην καταναλισκόμενη ενέργεια άρα και μείωση στους παραγόμενους ρύπους. Όπως θα δούμε και σε επόμενα κεφάλαια, το NFV θα παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των 5G δικτύων τόσο όσον αφορά το Δίκτυο Κορμού (Evolved Packet Core) όσο και το RAN. Η ανάγκη για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και on-demand υπηρεσίες και γενικότερα η ικανοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του 5G πιέζει προς την κατεύθυνση της αλλαγής του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζουμε τα δίκτυα. Η ανεξαρτητοποίηση του λογισμικού από το υλικό του υπολογιστή των δικτυακών συσκευών αποτέλεσε το προοίμιο για την δημιουργία μιας νέας τεχνολογίας η οποία διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου του δικτύου από το επίπεδο μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία αυτή ονομάστηκε SDN και σε συνδυασμό με το NFV και το υπολογιστικό νέφος θα παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στα δίκτυα 5G.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση Εφαρμογής SDN Τεχνολογίας Σε Δίκτυα 5G

3.1 Εισαγωγή

Δεδομένου ότι τα δίκτυα 5G θα κατευθύνονται από το λογισμικό, οι νέες λύσεις αρχιτεκτονικής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από δύο αναδυόμενες τεχνολογίες, το SDN και το NFV όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 12. Ειδικότερα, το όφελος του SDN έγκειται στην ικανότητά του να παρέχει μια αφαίρεση της υποδομής του φυσικού δικτύου. Μέσω της δυνατότητας προγραμματισμού του δικτύου, η δυνατότητα αλλαγής της συμπεριφοράς του δικτύου στο σύνολό του, το SDN απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση των δικτύων.



Σχήμα 12 – W-SDN με το NFV και παράδειγμα ανοιχτής καινοτομίας

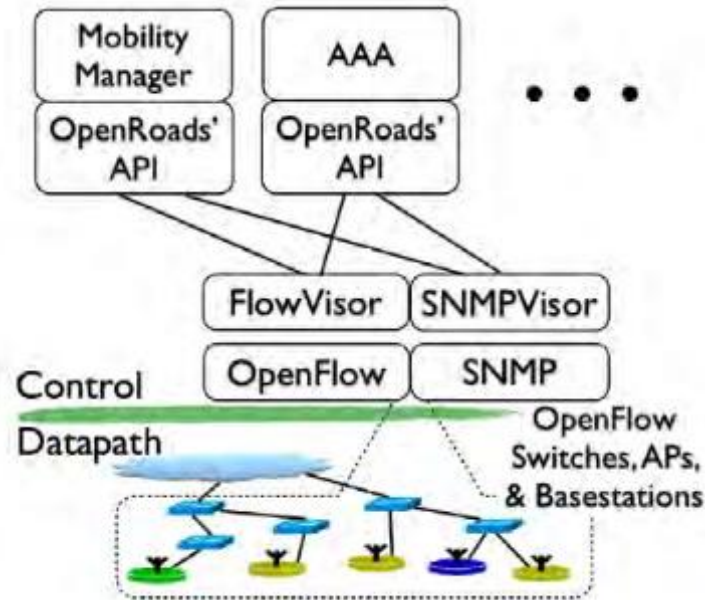
Το επίπεδο προγραμματισμού του δικτύου που παρέχεται από το SDN επιτρέπει την προσαρμογή και βελτιστοποίηση διαφόρων φετών δικτύου για διαφορετικές υλοποιήσεις υπηρεσιών, χρησιμοποιώντας την ίδια φυσική και λογική υποδομή δικτύου. Επιπλέον, διαχωρίζοντας τις λειτουργίες του δικτύου από τις υποκείμενες συσκευές υλικού, το NFV επιτρέπει μια λειτουργία δικτύου να εφαρμοστεί σε λογισμικό είτε τοπικά είτε σε απομακρυσμένους διακομιστές και data centers. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να βελτιώσει την δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου, πράγμα που επιτρέπει τη βέλτιστη οργάνωση και την εύκολη διαχείριση και ελέγχου ολόκληρου του δικτύου. Το σημαντικότερο όφελος που επιφέρει το NFV είναι η ευελιξία να εκτελούνται και να βελτιώνονται οι λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου έγκαιρα και ανεξάρτητα από την υποκείμενη φυσική υποδομή του δικτύου.

Πρόσφατα, οι έννοιες αυτές υλοποιούνται σε ασύρματα κυψελοειδή δίκτυα μέσω διαφόρων πτυχών, εφοδιάζοντας τα κυψελοειδή δίκτυα με την απαραίτητη ευελιξία για να εξελιχθούν και να προσαρμοστούν σύμφωνα με το συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον δικτύου για τα δίκτυα 5G. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια επισκόπηση μερικών αρχιτεκτονικών που έχουν υιοθετήσει τις παραπάνω τεχνολογίες. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στην αρχιτεκτονική του SoftAir ως ένα νέο παράδειγμα για τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς. Το SoftAir παρέχει υψηλής ευελιξίας αρχιτεκτονική, η οποία μπορεί να επιταχύνει τις καινοτομίες τόσο για την υποδομή προώθησης υλικού όσο και για τους αλγόριθμους δικτύωσης λογισμικού μέσω του διαχωρισμού του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων, επιτρέποντας την αποδοτική και προσαρμοστική κοινή χρήση πόρων δικτύου μέσω εικονικοποίησης δικτύου. Τέλος, ενθαρρύνει τη σύγκλιση των ετερογενών δικτύων μέσω ανοικτών και τεχνολογικά ανεξάρτητων διεπαφών και ενισχύει την ενεργειακή απόδοση μέσω της δυναμικής κλιμάκωσης της υπολογιστικής ικανότητας των SD-BSs, αποτελώντας μια ολοκληρωμένη λύση τόσο σε επίπεδο RAN όσο και σε επίπεδο CN. Στο τέλος της ενότητας θα περιγράψουμε την τεχνολογία του Network Slicing, που υποστηρίζει ένα σύνολο υπηρεσιών με ξεχωριστές απαιτήσεις σε μια κοινή υποδομή και υπόσχεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα 5G.

3.2 OpenRoads

Το OpenRoads είναι μια πρόωπη προσπάθεια να αναπτυχθεί μια ασύρματη πλατφόρμα SDN με το OpenFlow και το NOX από το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ. Χρησιμοποιεί το SDN ως γέφυρα μεταξύ τεχνολογιών όπως το LTE, το WiFi ή το WiMAX για να υποστηρίξει την ομαλή κινητικότητα των χρηστών. Η υποστήριξη του συνδυασμού πολλαπλών τεχνολογιών μπορεί να αυξήσει την ικανότητα και την κάλυψη του δικτύου εκμεταλλευόμενη τις διαθέσιμες τεχνολογίες. Διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το datapath (επίπεδο δεδομένων) και παράγει φέτες δικτύου (network slices) χρησιμοποιώντας το FlowVisor για να απομονώσει διαφορετικές ροές. Η υποκείμενη υποδομή ρυθμίζεται με τη χρήση του SNMP Visor, μια διεπαφή γραμμής εντολών (command line interface) για τη ρύθμιση των στοιχείων του επιπέδου δεδομένων με τη χρήση του πρωτόκολλο SNMP. Με άλλα λόγια, το OpenRoads επιτρέπει την εκτέλεση πολλών διαφορετικών πειραμάτων και υπηρεσιών ταυτόχρονα σε ένα φυσικό δίκτυο. Στην αρχιτεκτονική αυτή προστίθεται το OpenFlow σε σημεία πρόσβασης WiFi και σταθμούς βάσης WiMAX για τον έλεγχο της κυκλοφορίας και χρησιμοποιείται ο NOX controller ως ελεγκτής δικτύου που μπορεί να επικοινωνεί με συσκευές OpenFlow και να παρέχει καθολικές προβολές του δικτύου. Ο FlowVisor μπορεί να θεωρηθεί ως ένας διαφανής proxy για το OpenFlow. Τεμαχίζει το δίκτυο σε φέτες (slices) με σκοπό να μεταβιβάσει τον έλεγχο των διαφορετικών ροών σε διαφορετικούς ελεγκτές. Αυτή η ιδέα του τεμαχισμού του δικτύου θα επεκταθεί και στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπου προτείνεται με την εικονικοποίηση του υποστρώματος του δικτύου και με το διαχωρισμό σε μικρότερες κυψέλες να εικονικοποιηθούν οι ασύρματοι πόροι και να επιτραπεί

στους εικονικούς διαχειριστές του δικτύου (Mobile Virtual Network Operator - MVNO) να συνυπάρξουν σε ένα ενιαίο φυσικό επίπεδο του δικτύου. Η βασική δομή του OpenRoads φαίνεται στο Σχήμα 13. Το OpenRoads θα μπορούσε επίσης να διαχωρίσει επιτυχώς την κίνηση των διαφορετικών χρηστών με διαφορετικές πολιτικές προώθησης. Το OpenRoads είναι το πρώτο έργο για τη μετακίνηση του ασύρματου δικτύου προς μια λειτουργία πιο ανοικτή (openness). Ωστόσο, στοχεύει κυρίως σε δίκτυα WiMAX / WiFi με μικρή υποστήριξη για κυψελοειδή δίκτυα.

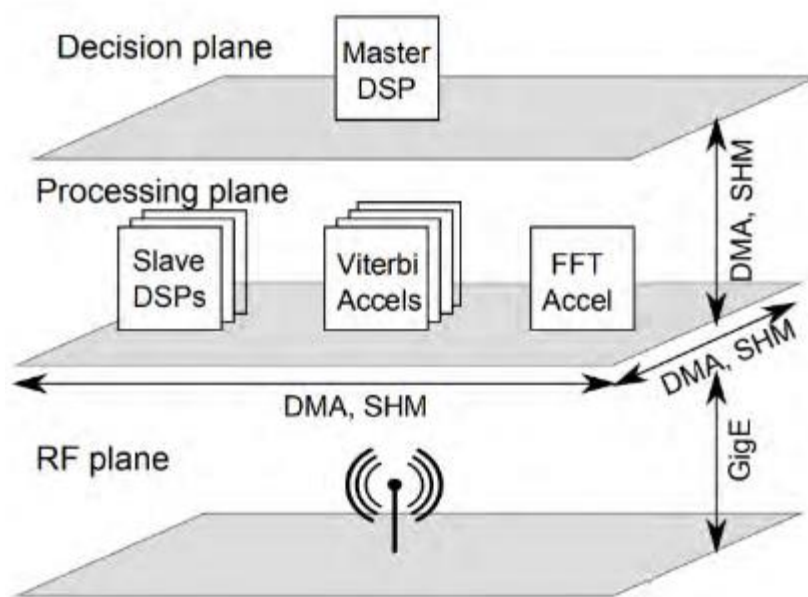


Σχήμα 13 – OpenRoads και ασύρματη αρχιτεκτονική OpenFlow

3.3 OpenRadio

Ένα νέο προγραμματιζόμενο ασύρματο επίπεδο δεδομένων προτείνεται από το OpenRadio που παρέχει δυνατότητες αρθρωτού προγραμματισμού για ολόκληρη την ασύρματη στοίβα. Το OpenRadio, είχε ως κίνητρο τη δυσκολία του συνεχούς ανασχεδιασμού των δικτύων ώστε αυτά να μπορούν να συμβαδίζουν με την εξέλιξη των πρωτοκόλλων και έτσι προτείνει τη χρήση του SDN για την κατασκευή κυψελοειδών δικτύων κορμού (cellular core networks) που υποστηρίζουν πιο αποτελεσματικά την εξέλιξη αυτή. Η κύρια ιδέα πίσω από το OpenRadio είναι να υποστηρίξει συστηματικά διαφορετικά πρωτόκολλα (3G, 4G, ή WiFi), ενώ βελτιστοποιεί τη λειτουργία σε όλα αυτά. Χρησιμοποιώντας αρθρωτές αφαιρέσεις, το OpenRadio μπορεί να εξελίξει στοιχεία πρωτοκόλλου αναβαθμίζοντας τη λειτουργία του επιπέδου ελέγχου, συχνά αναβαθμίζοντας το λογισμικό χωρίς να αντικαταστήσει το υλικό του ελεγκτή ή τα στοιχεία (συσκευές) του επιπέδου δεδομένων. Το Σχήμα 14 δείχνει την αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης (BS) OpenRadio, η οποία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση αρχιτεκτονικής ψηφιακών επεξεργαστών σημάτων πολλαπλών πυρήνων (multi-core DSP - Digital Signal Processors). Αυτές οι αρχιτεκτονικές τυπικά περιέχουν πυρήνες DSP βελτιστοποιημένους για υπολογισμούς επεξεργασίας σήματος και επιταχυντές υλικού που παρέχουν επιτάχυνση συγκεκριμένων, συνήθως χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων. Τέτοιες πλατφόρμες παρέχουν την επιθυμητή ισορροπία μεταξύ της απόδοσης και της ευελιξίας. Η πρόκληση του λογισμικού είναι να αξιοποιήσει την ακατέργαστη τεράστια υπολογιστική ισχύ διατηρώντας ταυτόχρονα τις αρθρωτές αφαιρέσεις (abstractions). Από την άλλη πλευρά, ο βασικός στόχος του συστήματος είναι ο χρόνος εκτέλεσης, δηλαδή οι πυρήνες DSP και οι επιταχυντές υλικού, να εκτελούν γρήγορα τις προκαθορισμένες ενέργειες. Προς αυτή την κατεύθυνση, ενώ η

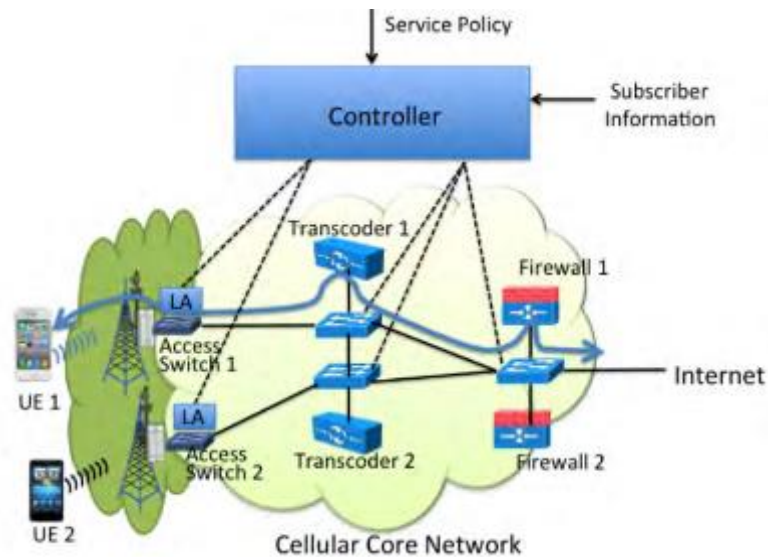
αποδοτική εκτέλεση επιτυγχάνεται μέσω του επιταχυνόμενου υλικού, ο προσδιορισμός στο χρόνο εκτέλεσης επιτυγχάνεται μέσω του διαχωρισμού του επιπέδου απόφασης (Decision plane) από το επίπεδο της επεξεργασίας (Processing plane). Ο ίδιος διαχωρισμός εφαρμόζεται και στους πόρους υλικού, ορίζοντας τον πυρήνα του επιπέδου απόφασης ως κύριο πυρήνα (Master DSP) που ελέγχει τους πυρήνες επεξεργασίας και επιταχυντές (Slave DSPs, accelerators) του επιπέδου επεξεργασίας. Δύο σημαντικές συμβολές του σχεδιασμού του OpenRadio είναι οι εξής. Πρώτον, αποσυνδέει το ασύρματο πρωτόκολλο από το υλικό, ακόμα και αν διασφαλίζει ότι οι πλατφόρμες πολλαπλών πυρήνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή των πρωτοκόλλων. Δεύτερον, παρέχει μια προγραμματιζόμενη διεπαφή μεταξύ των στοιχείων επεξεργασίας και απόφασης των ασύρματων πρωτοκόλλων. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στην διαχείριση των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών καθώς επίσης παρέχει υποστήριξη για το QoS και την εξέλιξη και την τυποποίηση του πρωτοκόλλου.



Σχήμα 14 – Στα εσωτερικά του OpenRadio BS με διαφορετικά είδη υπολογιστικών πυρήνων

3.4 SoftCell

Η κατανομή πόρων είναι απαραίτητη στο κυψελοειδές δίκτυο όπου το RAN συνδέεται με τα όρια του Internet για να μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας. Το παραδοσιακό κυψελοειδές δίκτυο συγκεντρώνει τον έλεγχο αυτής της όψης του δικτύου στις πύλες PG-W που οδηγεί σε καθυστέρηση και συμφόρηση. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική οδηγεί σε σημαντικούς περιορισμούς αποτυχίας και κλιμάκωσης, που απαιτούν πολύπλοκες και δαπανηρές μονάδες P-GW, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι ανοχής σφάλματος και κλιμάκωσης.



Σχήμα 15 – Αρχιτεκτονική δικτύου SoftCell

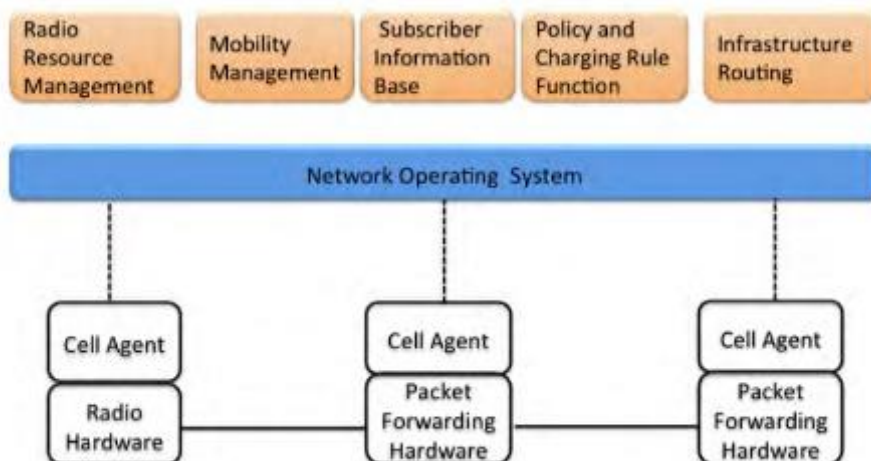
Το Softcell είναι η πρώτη προσπάθεια για να επεκταθεί το SDN στον πυρήνα του κινητού δικτύου. Ουσιαστικά υλοποιεί τις βασικές αρχές του SDN στο επίπεδο ελέγχου του πυρήνα του δικτύου. Το SoftCell καταργεί τις πολύπλοκες λειτουργίες από το P-GW στους μεταγωγείς πρόσβασης στους σταθμούς βάσης. Ο ελεγκτής έχει μια συνολική προβολή του δικτύου και μπορεί να δρομολογήσει την κυκλοφορία μέσω middle-boxes που είναι εγκατεστημένα στους μεταγωγείς όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση σχεδιασμού απαιτεί υψηλή κατάσταση (για υποστήριξη ευρείας ποικιλίας πακέτων) και εύρος ζώνης (προς υποστήριξη της κίνησης στο Internet), οι οποίες ενδέχεται να περιορίσουν την επεκτασιμότητα του δικτύου. Για να αντιμετωπίσει αυτή την ανησυχία, το SoftCell εισάγει έναν πολυδιάστατο αλγόριθμο συσσωρευμένης δέσμης πακέτων για να μειώσει το μέγεθος του πίνακα προώθησης στις οντότητες του επιπέδου δεδομένων. Δεδομένου ότι η πλειονότητα της κυκλοφορίας προέρχεται από κινητές συσκευές, για να μειωθεί η απαίτηση εύρους ζώνης, το SoftCell εκτελεί ταξινόμηση πακέτων η οποία πραγματοποιείται στους μεταγωγείς πρόσβασης, δίπλα στους σταθμούς βάσης, χρησιμοποιώντας έναν τοπικό ελεγκτή και μεταγωγείς υλοποιημένους σε λογισμικό όπως vSwitch . Το SoftCell εγγυάται ότι τα πακέτα που ανήκουν στην ίδια σύνδεση διασχίζουν την ίδια σειρά middleboxes προς τις δύο κατευθύνσεις, ακόμη και με την ύπαρξη κινητικότητας, βελτιώνοντας την επεκτασιμότητα και την ευελιξία του δικτύου.

3.5 CellSDN

Σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα κυψελοειδή δίκτυα έχουν ορισμένα μοναδικά χαρακτηριστικά και αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις κλιμάκωσης. Για παράδειγμα, επειδή στα κυψελοειδή δίκτυα οι χρήστες κινούνται πάντα, θα δημιουργηθεί ένας μεγάλος αριθμός ενημερώσεων κατάστασης από το επίπεδο δεδομένων, το οποίο θα δημιουργήσει μεγάλη πίεση σε έναν κεντρικό ελεγκτή. Επιπλέον, η μέση καθυστέρηση απόκρισης θα αυξηθεί επίσης έντονα όταν ένα σύνολο σταθμών βάσης επικοινωνεί ταυτόχρονα με ένα απομακρυσμένο controller. Στις προκλήσεις αυτές προσπαθεί να δώσει λύση η αρχιτεκτονική CellSDN . Στο Σχήμα 16 συνοψίζεται η αρχιτεκτονική δικτύου CellSDN, η οποία στοχεύει στην επίτευξη ενός κεντρικού επιπέδου ελέγχου για τα δίκτυα κορμού των κυψελοειδών δικτύων. Η αρχιτεκτονική SDN προσφέρει έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να θυσιάζεται η δυνατότητα κλιμάκωσης. Ενεργοποιεί το SDN σε κυψελοειδή δίκτυα με 4 επιπλέον επεκτάσεις:

- (1) οι εφαρμογές του ελεγκτή εκφράζουν την πολιτική όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των συνδρομητών,
- (2) οι μεταγωγείς εκτελούν έναν τοπικό πράκτορα ελέγχου για απλές ενέργειες,
- (3) οι μεταγωγείς υποστηρίζουν πιο ευέλικτη λειτουργικότητα του επιπέδου δεδομένων και
- (4) οι σταθμοί βάσης (BSs) υποστηρίζουν τον απομακρυσμένο έλεγχο των εικονικών ασύρματων πόρων.

Ο ελεγκτής SDN αποτελείται από λειτουργικό σύστημα δικτύου (NOS) που εκτελεί πολλές ενότητες εφαρμογών π.χ. διαχείριση ραδιοπόρων, διαχείριση κινητικότητας και δρομολόγηση. Επίσης, η SIB (Subscriber Information Base) αποθηκεύει και διατηρεί πληροφορίες για τους χρήστες, όπως δυναμικά δεδομένα π.χ. η τρέχουσα διεύθυνση IP των χρηστών, η τοποθεσία και η συνολική κατανάλωση κυκλοφορίας. Το NOS μπορεί να μετατρέπει τις πολιτικές σε κανόνες αλλαγής, όπως την αντιστοίχιση αποφάσεων σε σχέση με τις κεφαλίδες πακέτων ή τη μέτρηση δικτύου στους συνδρομητές, επιτρέποντας στις ενότητες εφαρμογών να εστιάζουν στους συνδρομητές και τα χαρακτηριστικά τους. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται αποτελεσματική κατανομή πόρων μέσω virtualization δικτύου χρησιμοποιώντας το FlowVisor (ένα proxy μεταξύ του ελεγκτή και του επιπέδου δεδομένων). Ο ελεγκτής μπορεί με αυτό το τρόπο να διαιρέσει δυναμικά το δίκτυο σε φέτες (slices) που κάθε μια να χειρίζεται όλη την κίνηση που ταιριάζει με κάποιο χαρακτηριστικό στο προφίλ του συνδρομητή. Επιτρέπει στον πάροχο να απομονώνει την κυκλοφορία χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα παλαιού τύπου. Επιπλέον, ο ελεγκτής ενδέχεται να μην είναι σε θέση να ανταποκριθεί τόσο γρήγορα σε τοπικά συμβάντα, όπως μπορούν οι ίδιοι οι μεταγωγείς. Οι μεταγωγείς έχουν κάποιο απλό λογισμικό ελέγχου (που ονομάζεται τοπικός πράκτορας ελέγχου – local control agent) που εκτελεί απλές τοπικές ενέργειες υπό την εντολή του ελεγκτή π.χ. αλλάζοντας αυτόματα την προτεραιότητα μιας ουράς όταν η κυκλοφορία υπερβαίνει ένα όριο ή αλλάζοντας μια ετικέτα σε ένα πακέτο δρομολογώντας την κίνηση μέσω ενός ενδιάμεσου middlebox. Αυτές οι λειτουργίες δεν επωφελούνται σημαντικά από το συντονισμό του ελεγκτή με βάση την καθολική εικόνα όλου του δικτύου, αλλά απαιτούν γρήγορο χρόνο απόκρισης. Ως εκ τούτου, η ερευνητική πρόκληση για το Cellular SDN είναι ο σχεδιασμός των τοπικών πρακτόρων και οι τεχνικές διαχωρισμού των λειτουργιών.

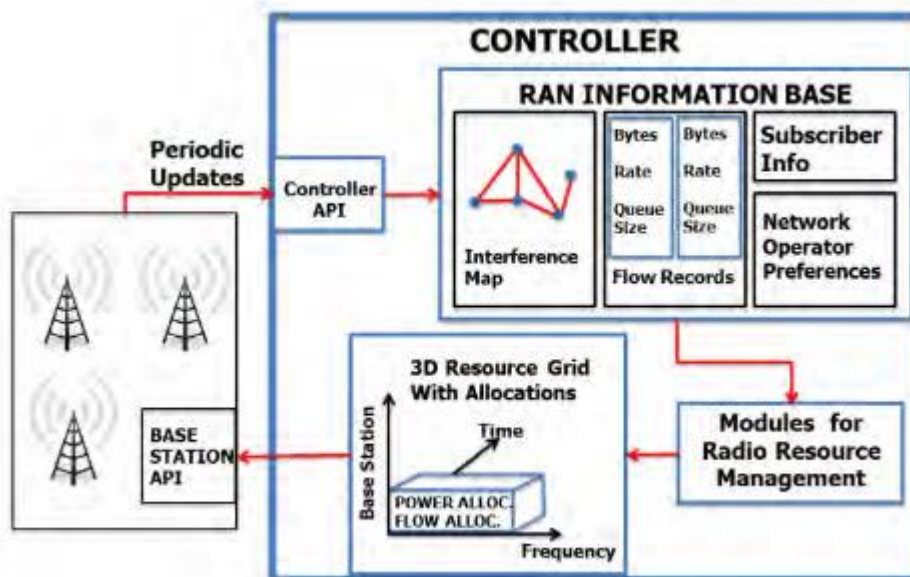


Σχήμα 16 – Cellular SDN (CellSDN)

Υπάρχουν όμως και κάποιοι περιορισμοί του CellSDN. Δεδομένου ότι το CellSDN είναι το πρώτο έργο για την ενσωμάτωση του SDN σε κυψελοειδή δίκτυα, αφορά μόνο για το δίκτυο κορμού και δεν έχει καμία σχέση με το RAN. Παρέχει μια αφηρημένη έννοια χωρίς πρακτικές μεθόδους υλοποίησης. Συγκεκριμένα, εισάγεται η έννοια της αποσύνδεσης, η οποία περιλαμβάνει (i) ελεγκτή και μεταγωγείς με τοπικούς πράκτορες ελέγχου, (ii) μεταγωγείς με ευέλικτες λειτουργίες επιπέδου δεδομένων, όπως βαθιά επιθεώρηση πακέτων και συμπίεση κεφαλίδας. Το CellSDN αναφέρει επίσης τις βασικές λειτουργίες εικονικοποίησης, όπου οι σταθμοί βάσης πρέπει να υποστηρίζουν την εικονικοποίηση των ασύρματων πόρων για την ευέλικτη και αποδοτική διαχείριση τους.

3.6 SoftRAN

Τα σημερινά δίκτυα ραδιοπρόσβασης χρησιμοποιούν κατανεμημένους αλγόριθμους για τη διαχείριση περιορισμένου φάσματος και την εκτέλεση μεταπομπών. Για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ασύρματης κίνησης (mobile traffic) και της πυκνής ανάπτυξης σταθμών βάσης, ορισμένοι ερευνητές πρότειναν το SoftRAN, ένα κεντρικοποιημένο Software Defined δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας, για αποδοτική και αποτελεσματική διαχείριση μεταπομπών, κατανομής ραδιοπόρων καθώς και ρύθμιση τιμών ισχύος μετάδοσης. Το SoftRAN χρησιμοποιεί ένα λογικά κεντρικοποιημένο επίπεδο ελέγχου, ασύρματης πρόσβασης για την αφαίρεση ενός συνόλου σταθμών βάσης ως ένα ενιαίο εικονικό σταθμό βάσης. Οι ραδιοπόροι αφαιρούνται στις διαστάσεις του χώρου, του χρόνου και της συχνότητας, οδηγώντας σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα πόρων που μπορεί να διατεθεί κεντρικά για την επίτευξη σχεδόν της βέλτιστης κατανομής τους. Στόχος είναι η εικονικοποίηση του RAN σε ένα εικονικοποιημένο σταθμό βάσης, ο οποίος θα πραγματοποιεί κατανομή των κινητών πόρων, επιτελώντας εξισορρόπηση φορτίου κίνησης καθώς και άλλες λειτουργίες ελέγχου σε ένα μόνο σημείο. Το Σχήμα 17 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του SoftRAN.



Σχήμα 17 – Αρχιτεκτονική SoftRAN

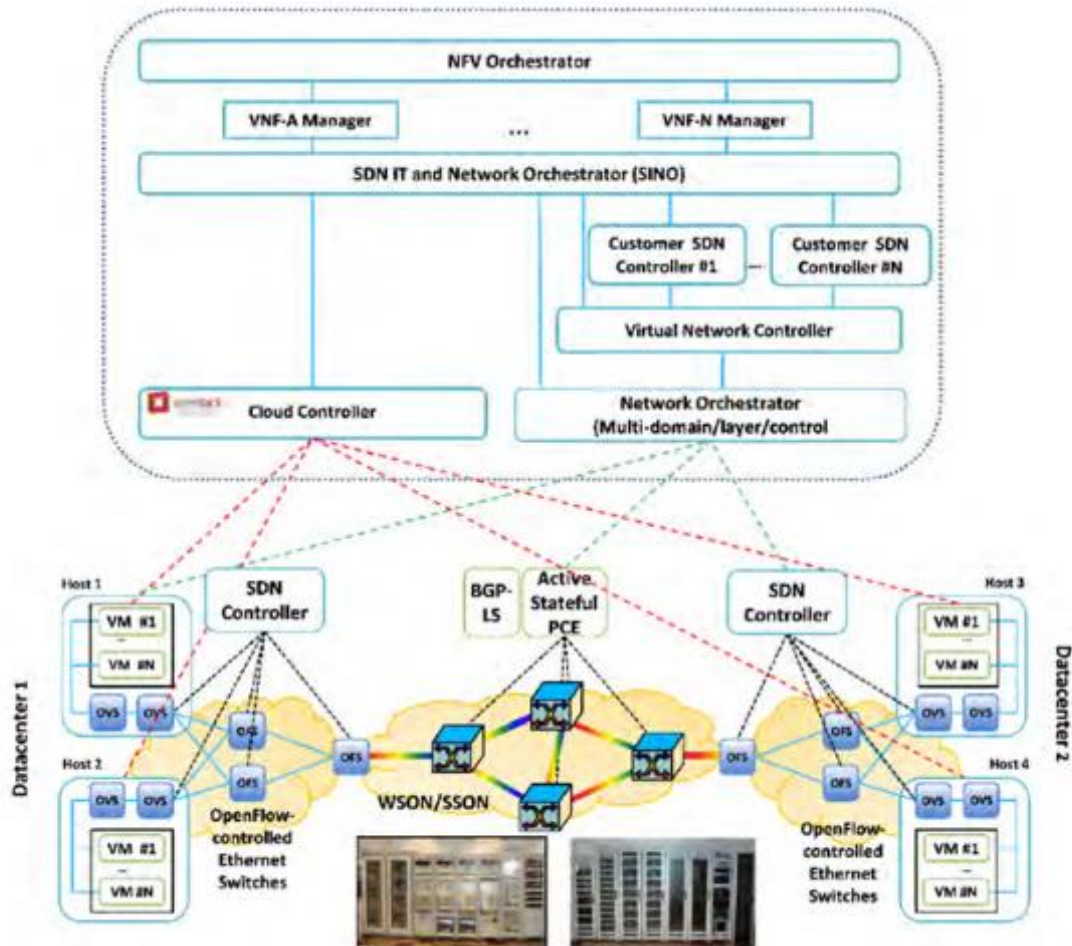
Στο SoftRAN, τα δίκτυα ελέγχονται με κεντρικό τρόπο: όλοι οι σταθμοί βάσης αφαιρούνται ως εικονικά στοιχεία και διοικούνται από τον λογικό κεντρικό ελεγκτή. Ο ελεγκτής διατηρεί την εποπτεία της κατάστασης ολόκληρου του δικτύου και λαμβάνει αποφάσεις. Υπάρχουν καθορισμένα APIs για την επικοινωνία του επιπέδου ελέγχου με τους σταθμούς βάσης ώστε να γίνεται

ενημέρωση της καθολικής κατάστασης του δικτύου και για τη διαμόρφωση του καθενός σταθμού βάσης. Διαφορετικές ενότητες του ελεγκτή έχουν πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων πληροφοριών (RAN information base - RIB) που αποτελείται από χάρτες παρεμβολών (interference map), αρχεία ροής (flow records) και προτιμήσεις των operators (network operator preferences) και χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης των ραδιοπόρων. Ωστόσο, αυτός ο σχεδιασμός πρέπει να αντιμετωπίσει την καθυστέρηση επικοινωνίας (latency) μεταξύ του επιπέδου δεδομένων και του επιπέδου ελέγχου ειδικά όταν πρέπει να ληφθούν γρήγορα αποφάσεις. Η καθυστέρηση αντιμετωπίζεται μέσω κατανομής καθηκόντων, όπου μεμονωμένα στοιχεία στο επίπεδο δεδομένων έχουν τον τοπικό έλεγχο, ενώ το λογικά κεντρικοποιημένο επίπεδο ελέγχου (ο controller), έχει τον έλεγχο για ολόκληρο το δίκτυο. Το SoftRAN έχει δύο βασικές αρχές για τον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου. Πρώτον, οι αποφάσεις ελέγχου που επηρεάζονται από γειτονικούς σταθμούς βάσης και κυψέλες πρέπει να γίνονται στον κεντρικό ελεγκτή. Δεύτερον, οι αποφάσεις που εξαρτώνται από τις ταχέως μεταβαλλόμενες παραμέτρους πρέπει να γίνονται τοπικά από σταθμούς βάσης κατά προτίμηση, π.χ. κατανομή των πόρων. Λειτουργίες όπως η διαχείριση της μεταπομπής (handover) και η κατανομή της ισχύος μετάδοσης γίνονται στον controller καθώς οι αποφάσεις αυτές δεν μπορούν να γίνουν στο σταθμό βάσης αφού απαιτείται γενικότερος συντονισμός και με τους γειτονικούς σταθμούς. Από την άλλη πλευρά, η ευθύνη για την κατανομή συχνότητας κατερχόμενης ζεύξης (downlink) μεταβιβάζεται στον σταθμό βάσης καθώς αυτή η εκχώρηση δεν απαιτεί συντονισμό μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Πράγματι, τέτοιες παράμετροι κατανομής συχνοτήτων μεταξύ των κυψελών ενημερώνονται συχνά, καθιστώντας δύσκολη την ανεκτικότητα των καθυστερήσεων στη λήψη αυτών των αποφάσεων σε κεντρικό επίπεδο. Ωστόσο, η κατανομή συχνοτήτων ανερχόμενης ζεύξης (uplink) γίνεται στον ελεγκτή για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κυψελών. Το SoftRAN βελτιώνει την αντιστοίχιση πόρων (διαχείριση χρόνου και συχνότητας σε κάθε σταθμό βάσης) και την αποτελεσματική κατανομή ισχύος εκπομπής για ένα σύνολο πόρων σε κάθε σταθμό βάσης ενός πυκνού WCN (Wireless Core Network).

3.7 ADRENALINE

Το ADRENALINE αποτελεί ένα ρεαλιστικό περιβάλλον δοκιμών (testbed) το οποίο περιλαμβάνει πολλά αλληλένδετα αν και ανεξάρτητα συστατικά και πρωτότυπα, προσφέροντας υπηρεσίες end-to-end, διασυνδέοντας χρήστες και εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών ετερογενών δικτύων για την ανάπτυξη και δοκιμή υπηρεσιών 5G. Επιτρέπει σε ερευνητές, κατασκευαστές συστημάτων και φορείς εκμετάλλευσης να αξιολογούν πειραματικά, σε συνθήκες κοντά στα συστήματα παραγωγής, όλες τις πτυχές που σχετίζονται με τον cloud computing, σε κατανομημένα περιβάλλοντα με πολλαπλά γεωγραφικά διασκορπισμένα κέντρα δεδομένων, ενώ παράλληλα διαχειρίζονται πόρους αποθήκευσης, υπολογισμού και δικτύωσης. Το ADRENALINE περιλαμβάνει ένα επίπεδο ελέγχου πολλαπλών τεχνολογιών για δίκτυα πολλαπλών στρώσεων, τα οποία διαχειρίζονται τους πόρους δικτύωσης. Εν συντομία, ένα επίπεδο ελέγχου είναι ένα λογισμικό που αυτοματοποιεί τις διαδικασίες που εμπλέκονται στην παροχή υπηρεσιών δικτύωσης, όπως οπτικές διαδρομές φωτός ή υπηρεσίες συνδεσιμότητας Ethernet / MPLS-TP / IP. Ο σχεδιασμός του επιπέδου ελέγχου στο ADRENALINE ακολουθεί τις γενικές αρχές του SDN. Οι υπηρεσίες συνδεσιμότητας δικτύου παρέχονται από μια ενορχήστρωση ελέγχου. Σε ένα συγκεκριμένο τομέα και επίπεδο, το επίπεδο ελέγχου μπορεί να βασίζεται στην τεχνολογία και τα πρωτόκολλα GMPLS - ένα κατανομημένο σύστημα στο οποίο ένας αποκλειστικός ελεγκτής είναι υπεύθυνος για κάθε κόμβο αυτόνομα - ή ακολουθεί τις αρχές SDN / OpenFlow, με κεντρικό ελεγκτή που διαχειρίζεται όλες τις πτυχές ενός δικτύου, ρυθμίζοντας δυναμικά τα δίκτυα σύμφωνα με τις ανάγκες

των χρηστών και των εφαρμογών. Τα επίπεδα ελέγχου GMPLS μπορούν να επεκταθούν με ένα στοιχείο υπολογιστικής διαδρομής (PCE - Path Computation Element), το οποίο είναι μια εφαρμογή ή υπηρεσία που αναλαμβάνει συγκεκριμένα καθήκοντα και ευθύνες του επιπέδου ελέγχου, όπως υπολογισμός βέλτιστων διαδρομών ή ενεργώντας ως κεντρικό σημείο για τη διαχείριση των συνδέσεων (Active Stateful PCE).



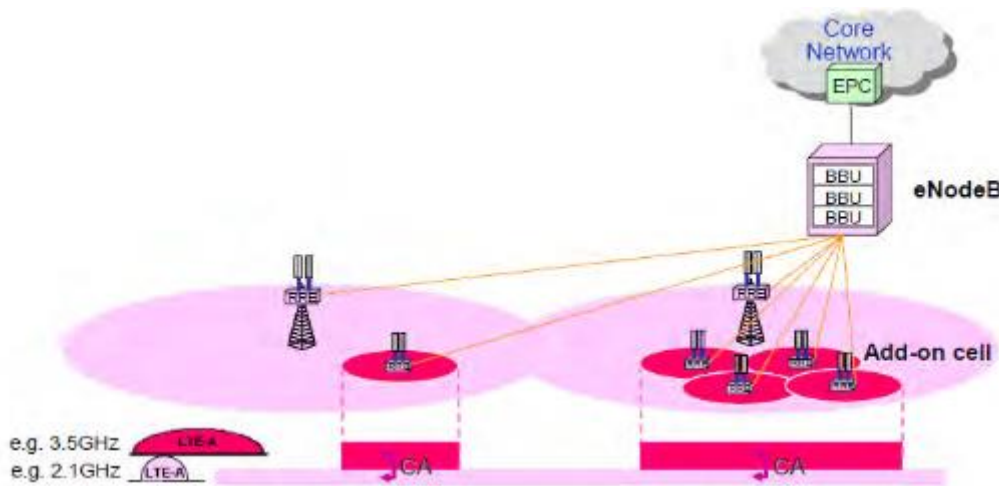
Σχήμα 18 – Αρχιτεκτονική

Η ενορχήστρωση δικτύου από άκρο σε άκρο (για την παροχή ενός γενικού ελέγχου ανεξάρτητα από τον αριθμό των τομέων) ενεργοποιείται με την εκτεταμένη χρήση της αρχιτεκτονικής και του πλαισίου λειτουργίας δικτύου με βάση τις εφαρμογές, χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του επιπέδου ελέγχου ADRENALINE. Οι υπηρεσίες εικονικοποίησης δικτύου από άκρο σε άκρο εκτελούνται από έναν Εικονικό Ελεγκτή Δικτύου (Virtual Network Controller), ο οποίος είναι σε θέση να παρέχει αφηρημένες προβολές δικτύου πολλαπλών επιπέδων σε διάφορους πελάτες, διασφαλίζοντας την ασφάλεια, την απομόνωση και τον ανεξάρτητο έλεγχο του SDN (δηλ. τους ελεγκτές SDN του πελάτη). Όπως αναφέρθηκε, στο αλληλένδετο περιβάλλον στο οποίο οι υπηρεσίες 5G από άκρο σε άκρο μπορούν να καλύπτουν ετερογενείς τεχνολογίες cloud-computing και δικτύωσης, το ADRENALINE περιλαμβάνει έναν ολοκληρωμένο ενοποιημένο πληροφοριακό και δικτυακό ενορχηστρωτή SDN (SINO - SDN Integrated IT and Network Orchestrator). Ένα SINO είναι ένα συγκεντρωτικό σύστημα ικανό να συντονίζει, από άποψη υψηλού επιπέδου, πτυχές διαχείρισης του cloud και δικτύων σε σύγχρονα περιβάλλοντα πολλαπλών μισθωτών (multi-tenant environments), παρέχοντας στην πλατφόρμα την εκτέλεση εφαρμογών χρηστών και εικονικοποιημένων

λειτουργιών δικτύου (VNF Manager). Ένας ενορχηστρωτής NFV (NFV orchestrator) παρέχεται επίσης για να αναπτύξει την από άκρο σε άκρο εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών VNF Forwarding Graphs. Ο διαχειριστής υπηρεσίας Cloud Computing υλοποιείται με βάση ένα τροποποιημένο λογισμικό OpenStack, ένα από τα κορυφαία καταναμημένα συστήματα cloud computing ανοιχτού κώδικα.

3.8 DOCOMO

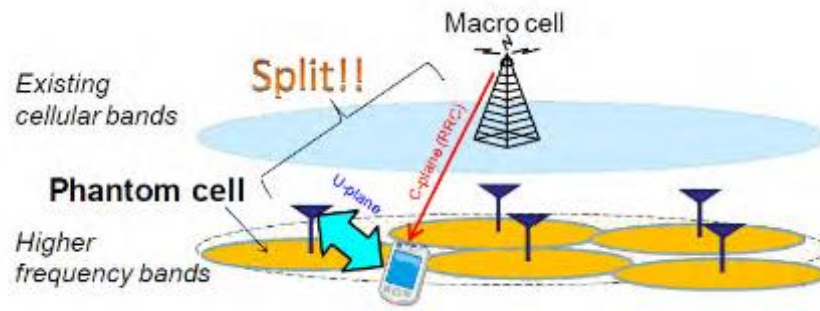
Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 19, η DOCOMO εκμεταλλεύεται την ιδέα του C-RAN στο σχεδιασμό του 5G RAN για να διαχωρίσει το Επίπεδο Ελέγχου (C) από το Επίπεδο Δεδομένων Χρήστη (U) και να μετακινήσει τη λειτουργικότητα ελέγχου στο cloud για μια κεντροποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου με απομακρυσμένο εξοπλισμό ασύρματης πρόσβασης. Επιπλέον, υιοθετεί τεχνολογίες συνάθροισης φορέων (CA - carrier aggregation) και μικρών κυψελών (small cells), δημιουργώντας μια προηγμένη αρχιτεκτονική C-RAN όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Συγκεκριμένα, μικρές κυψέλες με κόμβους χαμηλής ισχύος αντιμετωπίζουν την έκρηξη της κίνησης των κινητών συσκευών (mobile traffic). Η βασική συνδεσιμότητα και η κινητικότητα διατηρείται κάτω από την κάλυψη των μακροκυψελών (macrocell) και οι μικρές κυψέλες (οι αποκαλούμενες πρόσθετες κυψέλες - add-on cells) επιτυγχάνουν υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Επιπλέον, η προηγμένη αρχιτεκτονική C-RAN χειρίζεται όλη την επεξεργασία για CA και των μεταπομπών μέσα σε μια κεντρική μονάδα BBU στο eNodeB, η οποία μειώνει δραστικά τη σηματοδότηση στο δίκτυο κορμού.



Σχήμα 19 – Αρχιτεκτονική DOCOMO στο RAN

Μία από τις σημαντικότερες συνεισφορές της DOCOMO είναι το σενάριο των phantom cell όπως φαίνεται στο Σχήμα 20. Συγκεκριμένα το phantom cell, βασισμένο σε αρχιτεκτονική δικτύου πολλαπλών επιπέδων, χωρίζει το επίπεδο ελέγχου (C) και το επίπεδο δεδομένων χρήστη (U) μεταξύ των macro-cell και small-cells χρησιμοποιώντας διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Η ιδέα της DOCOMO χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική Phantom cell και ενσωματώνει τέτοιες πολλαπλές στρώσεις NW χρησιμοποιώντας χαμηλότερες και υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, τα small-cells χειρίζονται την κίνηση-κυκλοφορία για συνεδρίες δεδομένων υψηλής απόδοσης με το χρήστη (επίπεδο U) ενώ τα macrocells ελέγχουν τη σηματοδότηση του επιπέδου ελέγχου, π.χ. τον έλεγχο των ραδιοπόρων (RRC – Radio Resource Control). Τα macrocells και τα small-cells συνθέτουν μια σχέση master-slave, μέσω της οποίας το macro-cell αποστέλλει πληροφορίες

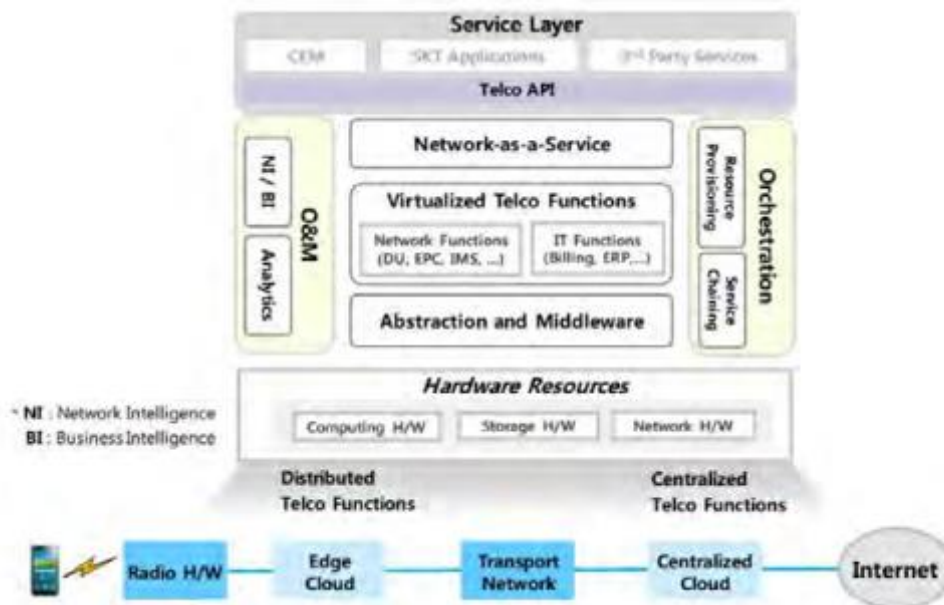
ελέγχου στους χρήστες που συνδέονται στα small-cells δηλ. καθιστούν τα small-cells πρακτικά αόρατα για τον χρήστη, για αυτό και η ονομασία phantom-cell.



Σχήμα 20 – Αρχιτεκτονική Phanto-cell με διαχωρισμό C/U επιπέδων

3.9 SK-Telecom

Η SK Telecom εισάγει μια πλατφόρμα 5G που βασίζεται σε λογισμικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 21, η οποία είναι μια βιομηχανική λύση για κυψελοειδή συστήματα 5G και η οποία προσφέρει ένα πλαίσιο προσανατολισμένο στο λογισμικό, εξετάζοντας από κοινού το SD-RAN και το SD-CN (SDN στο επίπεδο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού). Αποσυνδέει το επίπεδο ελέγχου (λειτουργικότητες λογισμικού) και το επίπεδο δεδομένων (συσκευές υλικού) και μια βασική λειτουργία στο πλαίσιο του λογισμικού είναι η παροχή μιας πλατφόρμας δικτύου ως υπηρεσία εξυπηρέτησης (Network as a Service - NaaS), η οποία επιτρέπει τη διαμόρφωση και αλλαγή των λειτουργιών τόσο σε επίπεδο τηλεπικοινωνιών όσο και υπηρεσιών. Η SK Telecom παρέχει επίσης το Telco API για χρήση υπηρεσιών, επιτρέποντας την υλοποίηση υπηρεσιών βασισμένων σε αναλύσεις στοιχείων (analytics) π.χ. multi-Service carrier Ethernet 2.0 και MPLS edge solution. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική πραγματοποιεί από κοινού SD-CN και SD-RAN, όπου το SD-CN περιλαμβάνει προγραμματιζόμενους απλούς μεταγωγείς με πίνακες ροής, ενώ το SD-RAN διαθέτει μονάδες ραδιοσυχνότητας και κεραιές και εφαρμόζεται ένα ενιαίο συνεκτικό επίπεδο ελέγχου. Για το σκοπό αυτό, η SK Telecom εφαρμόζει και υλοποιεί πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες 5G μέσω αυτής της πλατφόρμας που καθορίζεται από το λογισμικό.



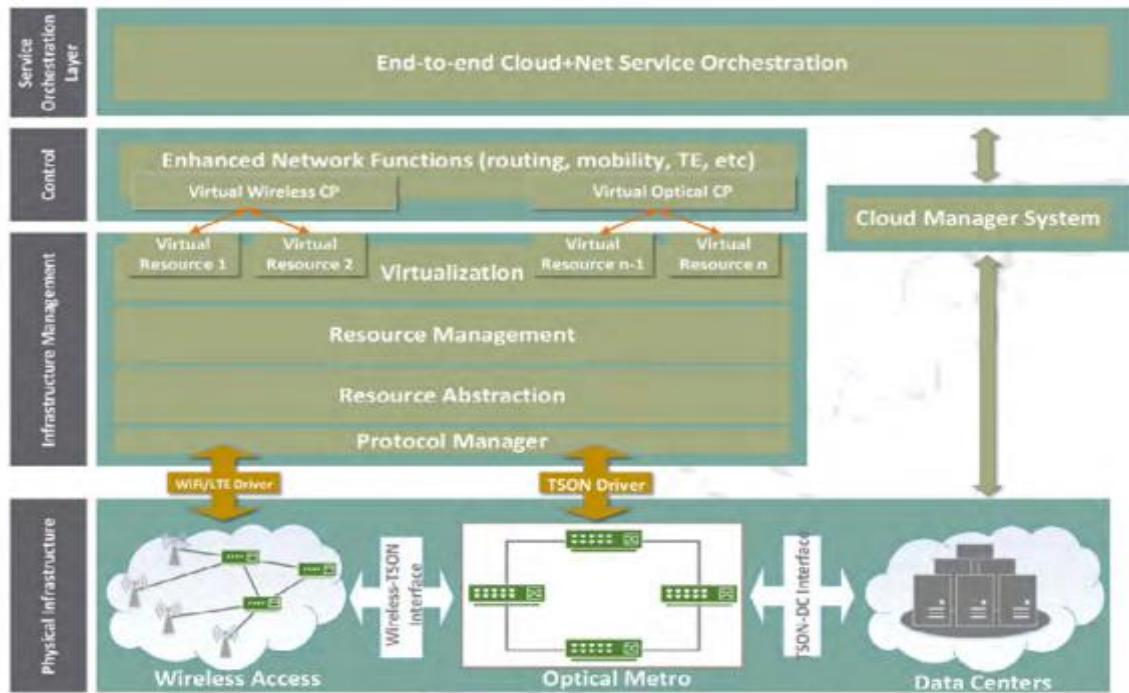
Σχήμα 21 – Πλατφόρμα 5G βασισμένη σε λογισμικό από την εταιρεία SK-Telecom

Τρεις σημαντικές τεχνολογίες υποστηρίζονται από την εξέλιξη του δικτύου της SK Telecom μέσω του NFV και του SDN: Εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου κορμού (CN) βασισμένη στο NFV, εικονικοποίηση του RAN και SDN με ολοκληρωμένη ενορχήστρωση. Πρώτον, μέσω του NFV, η SK Telecom δημιουργεί το cloud μέσω εικονικοποίησης ενός τυποποιημένου εξοπλισμού - hardware και χειρίζεται ένα σύνολο λειτουργιών δικτύου και υπηρεσιών σε αυτό το δίκτυο που βασίζεται σε λογισμικό. Δεύτερον, η SK Telecom επιτρέπει σε μια τεχνολογία να κεντριοκοποιεί και να εικονικοποιεί τη ψηφιακή μονάδα ενός σταθμού βάσης (BS) σε ένα τυποποιημένο βασισμένο σε υλικό cloud, με δυνατότητα επεξεργασίας των σημάτων στο RAN σε πραγματικό χρόνο. Τρίτον, παρέχει αποτελεσματικό έλεγχο και διαχείριση κύκλου ζωής των υπηρεσιών δικτύων βασισμένων σε λογισμικό από έναν κεντρικό και ενοποιημένο ενορχηστρωτή υπηρεσιών δικτύου (network service orchestrator).

3.10 CONTENT

CONTENT (Convergence of Wireless Optical Network and IT Resources in Support of Cloud Services - Σύγκλιση ασύρματου οπτικού δικτύου και πόρων IT για την υποστήριξη των υπηρεσιών Cloud) ήταν ένα τριετές ευρωπαϊκό συγχρηματοδοτούμενο έργο, το οποίο ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2012 και έληξε τον Οκτώβριο του 2015. Στόχος του ήταν η αρχιτεκτονική δικτύων και η συνολική λύση υποδομής για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης συμβατικού cloud computing καθώς και του mobile cloud computing, που μπορεί να εισαγάγει νέα επιχειρηματικά μοντέλα και να διευκολύνει νέες ευκαιρίες για διάφορους επιχειρηματικούς τομείς. Το Σχήμα 22 δείχνει την πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που προτείνεται από το περιεχόμενο, η οποία περιλαμβάνει πολλά επίπεδα:

- h.** *εταρογενές επίπεδο φυσικής υποδομής (heterogeneous physical infrastructure layer),*
- i.** *επίπεδο διαχείρισης της υποδομής (infrastructure management layer),*
- j.** *επίπεδο ελέγχου (control layer) και*
- k.** *επίπεδο ενορχήστρωσης υπηρεσιών (service orchestration layer).*



Σχήμα 22 – Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική Content

Πρώτον, το ετερογενές φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει ένα τομέα υβριδικού ασύρματου δικτύου πρόσβασης (LTE / Wi-Fi) και έναν τομέα οπτικού δικτύου (TSON) που διασυνδέει γεωγραφικά κατακεντρωμένα κέντρα δεδομένων, υποστηρίζοντας τη μεταβλητότητα των καναλιών με βάση το πλαίσιο. Δεύτερον, το επίπεδο διαχείρισης της υποδομής διαχειρίζεται τη δημιουργία υποδομών εικονικών δικτύων μέσω των υποκείμενων φυσικών πόρων. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των υποστηριζόμενων λειτουργιών είναι η εννοησιμότητα άντληση πόρων σε όλους τους τομείς, που περιλαμβάνουν ανταλλαγή πληροφοριών και συντονισμό μεταξύ τομέων. Τρίτον, το επίπεδο ελέγχου δημιουργεί απρόσκοπτη συνδεσιμότητα σε ετερογενείς τομείς τεχνολογίας μέσω μιας συντονισμένης προσέγγισης από άκρο σε άκρο για την υποστήριξη της βελτιστοποιημένης απόδοσης, των εγγυήσεων QoS καθώς και της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των πόρων. Τέλος, το επίπεδο ενοποίησης είναι υπεύθυνο για τον αποτελεσματικό συντονισμό των πόρων του cloud και του δικτύου, προκειμένου να καταστεί δυνατή η τελική σύνθεση και η παροχή ολοκληρωμένων υπηρεσιών cloud, και mobile cloud υπηρεσίες που υποστηρίζουν την απαιτούμενη QoE.

Συμπερασματικά, το CONTENT προτείνει μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική με στόχο να διευκολύνει τις βασικές αρχές της νέας πρότασής της, δηλαδή τη διασταυρούμενη τεχνολογική εικονικοποίηση για την υποστήριξη της βελτιστοποιημένης, ομαλής και συντονισμένης παροχής cloud και mobile cloud υπηρεσιών σε ετερογενείς τομείς δικτύων.

3.11 OpenRAN

Η αρχιτεκτονική του OpenRAN παρουσιάζεται στο Σχήμα 23. Περιέχει τρία βασικά μέρη:

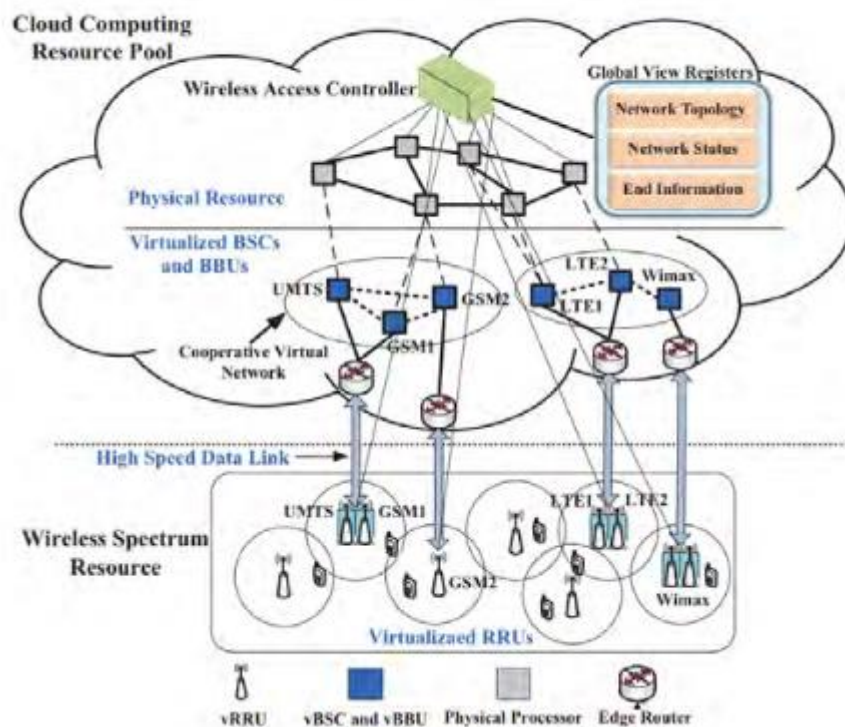
- wireless spectrum resource pool –WSRP (δεξαμενή πόρων ασύρματου φάσματος)
- cloud computing resource pool (CCRP) και
- SDN controller.

Το WSRP αποτελείται από πολλαπλές φυσικές απομακρυσμένες κεραίες (pRRU - physical Remote Radio Head) που είναι κατακεντρωμένες σε διάφορες τοποθεσίες. Για την αποτελεσματική υποστήριξη της σύγκλισης των ετερογενών δικτύων, το WSRP εικονικοποιεί το φάσμα μέσω

τεχνολογίας virtualization RF, επιτρέποντας αρκετές εικονικές RRU's (vRRUs) με διαφορετικά ασύρματα πρωτόκολλα να συνυπάρχουν σε ένα κοινό pRRU. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 23, ένα pRRU μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίζει δύο vRRU που εκτελούν UMTS και GSM αντίστοιχα.

Το CCRP αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό φυσικών επεξεργαστών που κατασκευάζουν ένα δίκτυο υψηλής ταχύτητας cloud computing. Διαφορετικά από την μέθοδο κάθετης δικτύωσης που υιοθετείται από το τρέχον δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, στο σύστημα αυτό δεν υπάρχουν πλέον παραδοσιακές μονάδες βάσης (BBU - base band units) και ελεγκτές σταθμών βάσης (BSC - base station controllers). Αυτά αντικαθίστανται από εικονικές (vBBUs και vBSCs) που αναπτύσσονται σε κοινόχρηστους επεξεργαστές με τεχνολογίες virtualization. Ως εκ τούτου, αυτά τα εικονικά στοιχεία πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένων των vBSC, vBBUs και vRRUs, αποτελούν ένα πλήρες RAN.

Ο ελεγκτής SDN είναι το επίπεδο ελέγχου των ετερογενών RAN, αφαιρώντας και συνδυάζοντας λειτουργίες ελέγχου των στοιχείων πρόσβασης. Καθορίζει τις στρατηγικές κάθε vBBU και vBSC και κάθε στοιχείο εικονικής πρόσβασης περιέχει έναν παράγοντα SDN που επικοινωνεί με τον ελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου SDN.

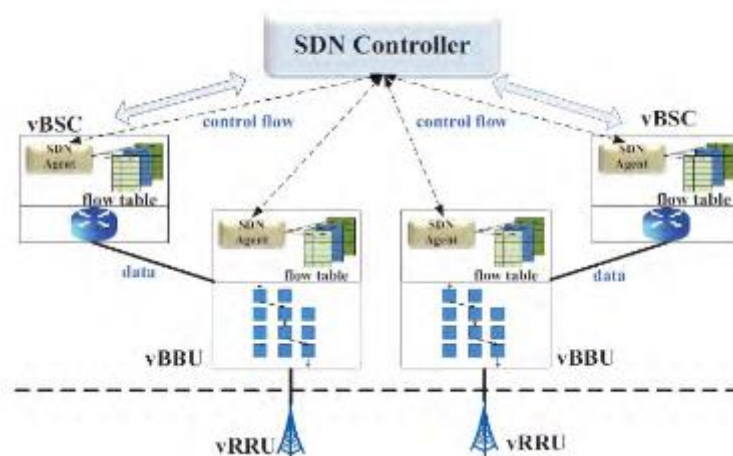


Σχήμα 23 – Επισκόπηση αρχιτεκτονικής του OpenRAN

Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τέσσερα επίπεδα εικονικοποίησης: επίπεδο εφαρμογής, επίπεδο cloud, επίπεδο φάσματος και επίπεδο συνεργασίας. Με την εικονικοποίηση του επιπέδου εφαρμογών, ο χώρος ροών (flowspace) διαιρείται και κάθε εικονικός χώρος λειτουργεί και

διαχειρίζεται τις δικές του στρατηγικές ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή, οι εικονικοί χώροι αντιστοιχούν σε πολλούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύου ή υπηρεσίες.

Με την εικονικοποίηση σε επίπεδο cloud, ο ελεγκτής SDN δημιουργεί vBBUs και vBSCs με εικονικοποίηση των φυσικών επεξεργαστών και την κατανομή κατάλληλων υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων. Η εικονικοποίηση σε επίπεδο φάσματος αναφέρεται στην εικονικοποίηση του φάσματος μέσω τεχνολογίας εικονικοποίησης RF, η οποία επιτρέπει σε αρκετές vRRU με διαφορετικά ασύρματα πρωτόκολλα να συνυπάρχουν σε ένα κοινό pRRU. Η εικονικοποίηση επιπέδου συνεργασίας κατασκευάζει αρκετά εικονικά δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των εικονικών κόμβων και των εικονικών συνδέσεων. Αυτό συμβαίνει επειδή η συνεργατική επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών vRRU έχει ως σκοπό την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών και απαιτεί επικοινωνίες μεταξύ διαφορετικών vBBU και vBSC. Στην αρχιτεκτονική OpenRAN υιοθετείται η μέθοδος του κεντρικού ελέγχου βάσει ροών. Ο ελεγκτής δημιουργεί και βελτιστοποιεί δυναμικά τα στοιχεία εικονικής πρόσβασης σύμφωνα με τις απαιτήσεις, αξιοποιώντας αποτελεσματικά και δίκαια την εικονικοποίηση και την κατανομή των ραδιοπόρων καθώς και των υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων σε στοιχεία εικονικής πρόσβασης. Υιοθετείται επίσης η στρατηγική ελέγχου "match-action" που βασίζεται στη ροή. Η κεφαλίδα πακέτου σε κάθε ροή έχει αρκετά πεδία αντιστοίχισης όπως διεύθυνση IP, διεύθυνση MAC και θύρα. Κάθε εικονικό στοιχείο πρόσβασης έχει έναν ενοποιημένο πράκτορα SDN (a unified SDN agent) για την επίλυση της ροής ελέγχου. Ο ελεγκτής ορίζει τους κανόνες σε κάθε εικονικό στοιχείο πρόσβασης. Όταν ένα στοιχείο λαμβάνει ένα πακέτο, ελέγχει πρώτα εάν η ροή αυτή μπορεί να ταιριάζει με τους κανόνες ελέγχου. Αν ναι, εκτελεί την αντίστοιχη ενέργεια. Οι ενέργειες σε διαφορετικά στοιχεία εικονικής πρόσβασης μπορεί να είναι διαφορετικές, π.χ. το vBSC μπορεί να δρομολογήσει τα δεδομένα αλλά το vBBU πιθανόν εκτελεί έλεγχο ισχύος. Η στρατηγική ελέγχου του SDN καθιστά το RAN πιο ανοικτό και πιο ευέλικτο.



Σχήμα 24 – Στρατηγική ελέγχου SDN και προγραμματιζόμενο σχέδιο

Η αρχιτεκτονική του OpenRAN είναι προγραμματιζόμενη τόσο σε επίπεδο ελέγχου όσο και σε επίπεδο δεδομένων, γεγονός που καθιστά το RAN πιο ελεγχόμενο και εξελίξιμο. Στο επίπεδο ελέγχου, ο ελεγκτής SDN έχει την ικανότητα να καθορίζει ή να τροποποιεί τους κανόνες σε κάθε

στοιχείο εικονικής πρόσβασης, όπως η δρομολόγηση, η κατανομή του εύρους ζώνης και οι προτεραιότητες ροής. Στο επίπεδο δεδομένων, αν και διαφορετικά ασύρματα πρωτόκολλα λειτουργούν αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους, μοιράζονται πάντοτε μερικά στοιχεία, όπως διαμόρφωση, κωδικοποίηση και παρεμβολή. Εμπνευσμένο από το SDR, διαμορφώνονται ασύρματα πρωτόκολλα σε vBBU. Μετά από αυτό, κάθε vBBU επιλέγει και συνδυάζει τις κατάλληλες μονάδες για την υλοποίηση του ασύρματου πρωτοκόλλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 24.

Κεφάλαιο 4ο: Μελλοντικές Προκλήσεις και Προοπτικές

4.1 Συμπεράσματα

Το 5G αντιπροσωπεύει μια πλήρη επανάσταση των δικτύων κινητής επικοινωνίας για την κάλυψη των υπερβολικά αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών, των υπηρεσιών και των εφαρμογών. Πλέον είναι η κορυφαία τεχνολογία κινητών επικοινωνιών μετά το 2020 και ανταποκρίνεται στην απαίτηση για πληροφορία της ανθρώπινης κοινωνίας μέσω της διασύνδεσης του ασύρματου κόσμου χωρίς εμπόδια. Ο αυξανόμενος αριθμός έξυπνων συσκευών που παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας δεδομένων, η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών και η διατήρηση παράλληλα μεγάλου εύρους ζώνης και ανεπαίσθητης καθυστέρησης αποτελούν μερικά από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά των μελλοντικών δικτύων. Αυτές οι απαιτήσεις δεν μπορούσαν να καλυφθούν από τις υποδομές δικτύων λόγω τόσο του μονολιθικού σχεδιασμού όσο και του υψηλού κόστους επέκτασης των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών. Τα δίκτυα 5G αποτελούνται από ένα κράμα τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών που αλληλοσυμπληρώνονται κατά περίπτωση με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων που έχουν τεθεί.

4.2 Προοπτικές Δικτύων 5^{ης} Γενιάς

Μία από τις βασικές ιδέες για το σχεδιασμό της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής 5G είναι να διαχωριστούν τα σενάρια εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Αυτό θα ενισχυθεί από το σύστημα κατανεμημένης κεραίας (DAS) και την τεχνολογία massive MIMO, όπου αναπτύσσονται γεωγραφικά κατανεμημένες συστοιχίες κεραιών με δεκάδες ή εκατοντάδες στοιχεία κεραίας. Τα υπαίθρια BSs θα είναι εξοπλισμένα με μεγάλες συστοιχίες κεραίας που διανέμονται γύρω από την κυψέλη και συνδέονται με το BS μέσω οπτικών ινών, επωφελούμενα τόσο από τα συστήματα DAS όσο και από την τεχνολογία massive MIMO. Στο εσωτερικό των κτιρίων θα υπάρχουν ασύρματα σημεία πρόσβασης (APs) που θα συνδέονται ενσύρματα με τις εξωτερικές κεραίες του κτιρίου. Αυτό ασφαλώς θα αυξήσει βραχυπρόθεσμα το κόστος των υποδομών αλλά παράλληλα θα βελτιώσει σημαντικά τη μέση απόδοση των κυψελών, τη φασματική απόδοση, την ενεργειακή απόδοση και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του κυψελωτού συστήματος μακροπρόθεσμα. Χρησιμοποιώντας μια τέτοια κυψελοειδή αρχιτεκτονική, οι χρήστες θα επικοινωνούν μόνο με το ασύρματο δίκτυο στο εσωτερικό και οι μεγαλύτερες κεραίες θα βρίσκονται εκτός του κτιρίου. Επίσης για την επικοινωνία στο εσωτερικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν υφιστάμενες τεχνολογίες με υψηλούς ρυθμούς

μετάδοσης, όπως Wi-Fi, femtocells, mm-Wave, ασύρματη επικοινωνία μέσω του ορατού φωτός (VLC). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες mmWave και VLC χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες που δεν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για κυψελοειδείς επικοινωνίες. Αυτά τα κύματα υψηλής συχνότητας δεν διαπερνούν πολύ καλά στα στερεά υλικά και μπορούν εύκολα να απορροφηθούν ή να διασκορπιστούν από τον αέρα ή και τη βροχή.

Επομένως, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν αυτά τα κύματα για εφαρμογές σε υπαίθριες και μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, με τα διαθέσιμα μεγάλα εύρη ζώνης, οι τεχνολογίες mmwave και VLC μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για εσωτερικά σενάρια. Για την επίλυση του προβλήματος της έλλειψης φάσματος, εκτός από την εύρεση νέου φάσματος που δεν χρησιμοποιείται παραδοσιακά για ασύρματες υπηρεσίες μπορούμε επίσης να προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε τη χρήση του ραδιοφάσματος με τη χρήση των γνωστικών δικτύων επικοινωνίας (Cognitive Radio Networks). Επίσης πρωταγωνιστικό ρόλο θα παίξει και η επικοινωνίες D2D με πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν κυρίως στο επίπεδο της ιδιωτικότητας. Από μια άλλη οπτική, το Opportunistic networking φαίνεται να αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση στο πρόβλημα της επέκτασης της κάλυψης της υποδομής, προκειμένου να παρέχεται εξυπηρέτηση σε κόμβους που κανονικά δεν θα καλύπτονται από την υποδομή ή να παρέχουν αποσυμφόρηση της υπάρχουσας υποδομής επεκτείνοντας την χωρητικότητά της. Τα Opportunistic networks δημιουργούνται, διαχειρίζονται και τερματίζονται με δυναμικό τρόπο. Αποτελεί μια τεχνολογία που καλύπτει τις ανάγκες των αναπτυσσόμενων περιοχών του πλανήτη για επικοινωνία εκπληρώνοντας την πρόκληση των δικτύων 5ης γενιάς για κάλυψη παντού. Γενικά η αρχιτεκτονική ενός κυψελωτού συστήματος 5G είναι ετερογενής, καθώς περιλαμβάνει κυψέλες διαφορετικού μεγέθους όπως macrocells, microcells, small cells και αναμεταδότες (relays). Με στόχο μια πιο επίπεδη και πιο ευέλικτη αρχιτεκτονική, διάφορα σχέδια για τα μελλοντικά δίκτυα 5G έχουν αναπτυχθεί και προταθεί. Η βάση για τέτοια σχέδια παρέχεται από τεχνολογίες αιχμής, όπως πύκνωση δικτύου (UltraDense Networks), SDN, NFV, cloud computing, έξυπνη διαχείριση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και αρχιτεκτονικές με σκοπό την ενεργειακή αποδοτικότητα. Τα Ultra Dense Networks (UDNs), αντιμετωπίζουν την υψηλή κίνηση στη μετάδοση δεδομένων μέσω της πύκνωσης της υποδομής. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα, να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα και να υπάρξει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Έτσι, από τα βελτίωση της χωρητικότητας, προσδοκούμε ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα αποτελούνται από διαφορετικές μικρές κυψέλες με διαφορετικούς τύπους από small cell BSs. Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι των small cell BSs θα στοχεύουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και κίνηση.

4.3 Προκλήσεις και Προτάσεις Αντιμετώπισης

Οι κινητές συσκευές είναι πανταχού παρούσες στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων, με αξιοσημείωτη αύξηση της κίνησης δεδομένων. Καθώς οι εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας γίνονται όλο και πιο “πεινασμένες” για πόρους, το χάσμα μεταξύ των απαιτούμενων πόρων και εκείνων που διατίθενται σε κινητές συσκευές διευρύνεται. Επίσης η καθυστέρηση αποτελεί μια από τις βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα 5ης γενιάς. Για να γεφυρωθεί αυτό το κενό και να αντιμετωπιστεί το latency, το cloud computing μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επέκταση των πόρων των φορητών συσκευών. Πίσω από την έννοια της “επέκτασης” κρύβεται το Edge Computing, που σκοπό έχει οι υπηρεσίες cloud να μετακινούνται πιο κοντά στον εξοπλισμό των χρηστών (UEs), δηλ. στην άκρη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (edge network). Με βάση αυτή την προτεραιότητα της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης κινείται τόσο ο ακαδημαϊκός όσο και ο χώρος της βιομηχανίας όπου μελετώνται τεχνολογίες οι οποίες θα ωθήσουν το CC πιο κοντά στην άκρη του δικτύου ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη για χαμηλή καθυστέρηση. Τέτοιες τεχνολογίες

είναι το Fog Computing, το Mobile Edge Computing και τα Cloudlets. Το C-RAN είναι μια πρωτοποριακή αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται στην τάση των σημερινών συνθηκών δικτύου και της τεχνολογικής προόδου. Ως ένα είδος καθαρού συστήματος, βασίζεται στην κεντρική επεξεργασία, στην ασύρματη συνεργασία και στην cloud υποδομή σε πραγματικό χρόνο. Η ουσία είναι να μειώσει τον αριθμό των σταθμών βάσης ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, να υιοθετήσει την τεχνολογία της εικονικοποίησης για να πραγματοποιήσει την ανταλλαγή πόρων και τον δυναμικό προγραμματισμό τους, να βελτιώσει την απόδοση του ραδιοφάσματος και να επιτύχει χαμηλό κόστος, υψηλό εύρος ζώνης και ευέλικτη λειτουργία. Ο γενικός στόχος του C-RAN είναι να αντιμετωπίσει μια σειρά προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι φορείς των mobile networks όπως η κατανάλωση ενέργειας, το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, επιδιώκοντας βιώσιμη επιχειρηματικότητα και αύξηση κέρδους στο μέλλον, προσπαθώντας να υποστηρίξει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των τελικών χρηστών προς την 5η γενιά κινητών δικτύων. Τα δίκτυα πρέπει επίσης να γίνουν πιο “έξυπνα”. Η προσθήκη τεχνητής νοημοσύνης σε μια προγραμματιζόμενη υποδομή δικτύου θα μας επιτρέψει να μετατρέψουμε μεγάλους όγκους δεδομένων σε πολύτιμες γνώσεις δίνοντας ώθηση σε νέες εφαρμογές και υπηρεσίες. Οι πάροχοι υπηρεσιών επικοινωνίας μπορούν να ενισχύσουν τα δίκτυά τους και να αναπτύξουν ευελιξία και νοημοσύνη εφαρμόζοντας μηχανική μάθηση, η οποία μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων μπορεί να βοηθήσει να εντοπιστούν τάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν προληπτικά, προστατευτικά ή επαναλαμβανόμενα. Ένα παράδειγμα περισσότερης νοημοσύνης στην άκρη του δικτύου σήμερα είναι η χρήση της μηχανικής μάθησης για να καθορίσει τον καλύτερο τρόπο μεγιστοποίησης της ισχύος του σήματος από τους ασύρματους σταθμούς βάσης στις συνδεδεμένες συσκευές. Με τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την τοπογραφία και τα πρότυπα κυκλοφορίας, οι πάροχοι υπηρεσιών επικοινωνίας μαθαίνουν πώς να τοποθετούν τις έξυπνες κεραιές τους σε διάφορες ώρες της ημέρας για την επίτευξη ισχυρότερων συνδέσεων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ένα καλά συντονισμένο δίκτυο που χρησιμοποιεί μόνο τους βέλτιστους πόρους και την απαιτούμενη χωρητικότητα για κάθε χρήστη και την κάθε περίπτωση χρήσης. Οι δύο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που ευελπιστούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην οικοδόμηση των δικτύων 5G είναι το SDN σε συνδυασμό με το NFV. Η αρχιτεκτονική SDN επιτρέπει την ευέλικτη υποστήριξη σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης και σεναρίων σε μια κοινή υποδομή, προσαρμόζοντας και βελτιστοποιώντας τις υπηρεσίες ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις τους. Μέσω της εικονικοποίησης και ενορχήστρωσης των υποκειμένων πόρων που θα χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες, το SDN επιτρέπει τον δυναμικό έλεγχο των πόρων. Το SDN επικεντρώνεται κυρίως στη χρήση των πόρων για την παροχή υπηρεσιών ενώ το NFV επικεντρώνεται κυρίως στη δημιουργία και την υποστήριξη των πόρων σε όλο τον κύκλο ζωής τους, οι οποίοι μπορούν να αποσυνδεθούν σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση υλικού. Το SDN προσφέρει επιπλέον ευελιξία στο δίκτυο, προγραμματισμότητα και κεντρική διαχείριση. Στόχος του είναι τα δίκτυα μέσω κεντροποιημένων ελεγκτών, που διαθέτουν τεχνητή νοημοσύνη και είναι βασισμένοι σε λογισμικό, να επεξεργάζονται τα στοιχεία κίνησης του δικτύου και ανάλογα με τις ανάγκες του να κατευθύνουν και να ανακατανέμουν τον όγκο κίνησης. Τα SDN μέσω του κεντροποιημένου και αυτοματοποιημένου ελέγχου φαίνεται να ανταποκρίνεται σε αρκετές από τις προκλήσεις των σύγχρονων δικτύων, διασφαλίζοντας βελτιωμένη αξιοποίηση των δικτυακών πόρων, μειώνοντας τόσο τις κεφαλαιουχικές δαπάνες όσο και τις λειτουργικές, και αυξάνοντας την ποιότητα της εξυπηρέτησης, τόσο σε ενσύρματα όσο και ασύρματα δίκτυα. Από την άλλη πλευρά το NFV μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στο δίκτυο εικονικοποιώντας λειτουργίες που μέχρι πρότινος επιτελούνταν από υλικές οντότητες, γεγονός που σημαίνει ευκολία μετατροπών και αναβάθμισης, λιγότερα έξοδα υποδομής και ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, διαχωρίζοντας τις

λειτουργίες του δικτύου από τις υποκείμενες συσκευές υλικού, το NFV επιτρέπει μια λειτουργία δικτύου να εφαρμοστεί σε λογισμικό είτε τοπικά είτε σε απομακρυσμένους διακομιστές και data centers. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να βελτιώσει την δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου, πράγμα που επιτρέπει τη βέλτιστη οργάνωση και την εύκολη διαχείριση και έλεγχο ολόκληρου του δικτύου. Το σημαντικότερο όφελος που επιφέρει το NFV είναι η ευελιξία να εκτελούνται και να βελτιώνονται οι λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου έγκαιρα και ανεξάρτητα από την υποκείμενη φυσική υποδομή του δικτύου. Παρόλο που το NFV και το SDN δεν είναι αλληλοεξαρτώμενα, μπορούν συνδυαστικά και συμπληρωματικά να αποφέρουν τεράστια οφέλη στα δίκτυα 5G. Μια αναδυόμενη τάση που επιδιώκει να μετασχηματίσει τα δίκτυα χρησιμοποιώντας λύσεις βασισμένες σε λογισμικό, μπορεί να αποτελέσει έναν πιθανό παράγοντα για την επίτευξη του στόχου της ανάπτυξης καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών. Μέσω του συνδυασμού SDN & NFV παρέχεται η προγραμματισιμότητα και η ευελιξία που απαιτούνται για τη δημιουργία πολλαπλών λογικών (εικονικών) δικτύων, στην κορυφή ενός κοινού δικτύου. Αυτά τα λογικά δίκτυα αναφέρονται ως φέτες δικτύου (network slices) και τα οποία θα αποτελούν αυτοδύναμα δίκτυα, αρκετά ευέλικτα ώστε να χωρέσουν ταυτόχρονα διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης από επιχειρήσεις και από πολλαπλούς παίκτες σε μια κοινή υποδομή δικτύου. Αυτό το νέο κύμα καινοτομίας και εφαρμογών έχει σκοπό να δημιουργήσει νέες επιχειρηματικές ιδέες και κοινωνική αξία. Η μεγαλύτερη αλλαγή σε στρατηγικό και οικονομικό επίπεδο θα επέλθει από την είσοδο πολλών νέων και ως επί το πλείστον μικρών εταιριών στους κλάδους που θα υιοθετήσουν το συνδυασμό και την ενσωμάτωση των SDN & NFV. Επιπλέον, μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες για την κάλυψη εφαρμογών με διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις. Αυτή η προσπάθεια μπορεί επίσης να επιταχυνθεί για να μειώσει το κόστος με την αξιοποίηση ανοιχτών προτύπων και την κοινότητα ανοιχτού κώδικα μέσω διαφόρων πρωτοβουλιών. Με τη βελτιστοποίηση των φετών δικτύου για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, οι επιχειρήσεις μπορούν να προσφέρουν μοναδικές και εξατομικευμένες υπηρεσίες με βάση την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), τη συμφόρηση του δικτύου, τις προτιμήσεις των χρηστών και τις απαιτήσεις ασφαλείας. Η μετάβαση σε προγραμματιζόμενα δίκτυα που βασίζονται στην εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) και στη δικτύωση καθοριζόμενη από λογισμικό (SDN) θα οδηγήσει σε ένα πολύ πιο δυναμικό περιβάλλον, όπου εφαρμογές και υπηρεσίες θα μπορούν να ενεργοποιούνται, να κλιμακώνονται και να μετακινούνται με τρόπο άμεσο και αυτοματοποιημένο. Η αυξημένη χρήση των στοιχείων ανάλυσης δικτύου (analytics), θα επιτρέψει στους παρόχους την δυναμική και με ακρίβεια βελτιστοποίηση του δικτύου τους, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις, στους παρόχους περιεχομένου και στους τελικούς χρήστες να ζητούν και να λαμβάνουν άμεσα εξειδικευμένες υπηρεσίες δικτύου. Το 5G θέλει να είναι η γενιά που φέρνει την επανάσταση, η γενιά που δεν καλύπτει μόνο τις ανάγκες των φορέων εκμετάλλευσης και των χρηστών για υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών, αλλά ανοίγει νέες προοπτικές και επιτρέπει μια εξαιρετικά ευρεία ποικιλία εφαρμογών και χρήσης, ενοποιημένη μέσα σε μια ενιαία τεχνολογία. Το 5G καθιερώνεται ως ένας παράγοντας που επιτρέπει την ψηφιοποίηση της κοινωνίας και της οικονομίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Software-defined networking (SDN): a survey, Kamal Benzekki, Abdeslam El Fergougui, Abdelbaki Elbelrhiti Elalaoui
- [2] A survey: Control plane scalability issues and approaches in Software-Defined Networking (SDN), Murat Karakus Arjan Dur

- [3] A Survey on Software-Defined Networking, Wenfeng Xia, Yonggang Wen, Chuan Heng Foh
- [4] Software Defined Networking (SDN) Challenges, issues and Solution, Deepak Singh Rana, Shiv Ashish Dhondiyal, Sushil Kumar Chamoli, Dusit Niyato, Haiyong Xie
- [5] Towards Fifth-Generation (5G) Optical Transport Networks, Slavisa Aleksic
- [6] Towards Mobile Computing Technology: The Vision of Fifth Generation Mobile Networks, Arun Rajesh Sivaraman, Arun Kumar Sivaraman, M.Lakshmi
- [7] A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies, Akhil Gupta, and Rakesh Kumar Jha
- [8] End-to-End Data Analytics Framework for 5G Architecture, EMMANOUIL Pateromichelakis, Fabrizio Moggio, Christian Mannweiler, Paul Arnold, Mehrdad Shariat, Michael Einhaus, Qing Wei, Ömer Bulakci, and Antonio De Domenico
- [9] Wireless Software-Defined Networks (W-SDNs) and Network Function Virtualization (NFV) for 5G Cellular Systems: An Overview and Qualitative Evaluation, Ian F. Akyildiz, Shih-Chun Lin, and Pu Wang
- [10] NFV and SDN - Key Technology Enablers for 5G Networks, Faqir Zarrar Yousaf, Michael Bredel, Sibylle Schaller, and Fabian Schneider
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking
- [12] Physical Layer Split for User Selective Uplink Joint Reception in SDN Enabled Cloud-RAN, Dora Boviz, Aravinthan Gopalasingham, Chung Shue Chen, Laurent Roullet
- [13] Software-Defined and Virtualized Future Mobile and Wireless Networks: A Survey, Mao Yang, Yong Li, Depeng Jin, Lieguang Zeng, Xin Wu,,Athanasios V. Vasilakos
- [14] A Novel Multipath-Transmission Supported Software Defined Wireless Network Architecture, Chuan Xu, Wenqiang Jin, Guofeng Zhao, Huaglorry Tianfield, Shui Yu, and Youyang Qu
- [15] The ADRENALINE Testbed: An SDN/NFV Packet/Optical Transport Network and Edge/Core Cloud Platform for End-to-End 5G and IoT Services, Raul Muñoz, Laia Nadal, Ramon Casellas, Michela Svaluto Moreolo, Ricard Vilalta, Josep Maria Fàbrega, Ricardo Martínez, Arturo Mayoral, Fco. Javier Vílchez
- [16] Forwarding Strategy on SDN-based Content Centric Network for Efficient Content Delivery, Jaehyeok Son, DoHyeon Kim, Hyo Sung Kang, Choong Seon Hong
- [17] OpenRAN: A Software-defined RAN Architecture Via Virtualization, Mao Yang, Yong Li, Depeng Jin, Li Su, Shaowu Ma, Lieguang Zeng
- [18] SDN-based RAN Protection Solution for 5G, an Experimental Approach, Minqi Wang, Gaël Simon, Isabel Amigo, Luiz Anet Neto, Loutfi Nuaymi, Philippe Chanclou
- [19] Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges, Akram Hakiri and Pascal Berthou
- [20] Overview of 5G Security Challenges and Solutions, Ijaz Ahmad, Tanesh Kumar, Madhusanka Liyanage, Jude Okwuibe, Mika Ylianttila, Andrei Gurtov

Βιβλιογραφία

- [21] Wireless Network Virtualization With SDN and C-RAN for 5G Networks: Requirements, Opportunities, and Challenges, Edvin J. Kitindi, Shu Fu, Yunjian Jia, Asif Kabir, and Ying Wang
- [22] 5G Network Challenges and Realization Insights, P. S. Khodashenas, J. Aznar, A. Legarrea, C. Ruiz, M.S. Siddiqui, E. Escalona, S. Figuerola
- [23] 5G Cellular Network Integration with SDN: Challenges, Issues and Beyond, Sahrish Khan Tayyaba, Munam Ali Shah