

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Software Defined Networking σε Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

Συγγραφέας:

Γεωργακίλας Γιάννης, ΑΜ: 4335

Υπεύθυνος Καθηγητής:

Χρήστος Ι. Μπούρας, Καθηγητής

Επιβλέπων:

Δρ. Ανδρέας Παπαζώης

ΠΑΤΡΑ, Νοέμβρης 2017

Πρόλογος

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα, για την επικοινωνιακή του συνεργασία και καθοδήγηση καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέπων της εργασίας Δρ. Ανδρέα Παπαζώη και στην διδακτορικό Αναστασία Κόλλια που με τις στοχευμένες τους παρατηρήσεις υπήρξαν καταλυτικοί παράγοντες στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους ανθρώπους που ήταν κοντά μου όλο αυτόν τον καιρό στηρίζοντάς με σε κάθε επιλογή, παίζοντας ουσιαστικό ρόλο στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Γιάννης Γεωργακίλας

Πάτρα, Νοέμβρης 2017

Στην Ζωή

Περίληψη

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να αναδειχθεί το μοντέλο της νέας τεχνολογίας SDN και να γίνει μια τεχνική και οικονομική ανάλυση από τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του. Η νέα τεχνολογία SDN έρχεται να δώσει απάντηση στα σύγχρονα προβλήματα των κινητών δικτύων που προκύπτουν από τον μεγάλο όγκο κίνησης των δεδομένων, την αυξημένη κινητικότητα των χρηστών, καθώς και να υλοποιήσει την ανάγκη που προκύπτει πλέον για κεντρικό έλεγχο του δικτύου.

Η τεχνολογία SDN διαχωρίζει data plane και control plane και με τη βοήθεια του ελεγκτή (controller) επιτυγχάνει την κεντρική πλέον αναβάθμιση, επέκταση και διαχείριση του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο πολλαπλοί φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια κοινή υποδομή, πράγμα που θα συμβάλλει τελικώς στην μείωση των κεφαλαιουχικών δαπανών (capex) και των δαπανών υποδομής (opex).

Εκτιμάται ότι η αρχιτεκτονική SDN όχι απλά θα βελτιώσει, αλλά θα αλλάξει ριζικά την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS), αυξάνοντας την ταχύτητα του δικτύου και βελτιώνοντας την ασφάλειά του, ενώ ταυτόχρονα θα μειώσει το κόστος. Παράλληλα, από την πλευρά των παρόχων τηλεπικοινωνιακών κινητών δικτύων, θα σημειωθεί συνολική μείωση των εξόδων κεφαλαίου, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται το κόστος υποδομής, συντήρησης και εξοπλισμού.

Λέξεις κλειδιά: SDN, SDMN, EPC, C-RAN, EPS, NFV, NOS, RAN, CAPEX, OPEX

Executive Summary

The purpose of this thesis is to present the model of the new architecture of SDN and a technical and economical analysis of the benefits that arise from the use of SDN. The new SDN architecture has been developed in order to solve the multiple problems the operators by using the present mobile networks. These problems mainly include the increased data traffic and user mobility. In the present, there is also an immediate need for centralized network control, which can be accomplished also with the use of SDN architecture.

SDN architecture decouples data plane and control plane, and via the controller it allows centralized network management, so that the operators can accomplish multiple functions all at one. This enables mobile network operators to use a common infrastructure, which leads to immediate decrease of the capex and opex.

It is obvious that SDN architecture will radically change the quality of the provided services (QoS), by increasing the network speed and security, and decreasing the cost. The mobile network operators will benefit from the total decrease of the capital expenditures by using SDN, such as the infrastructure cost, the maintenance cost, and the equipment cost.

Key words: SDN, SDMN, EPC, C-RAN, EPS, NFV, NOS, RAN, CAPEX, OPEX

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	5
Executive Summary	6
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος σχημάτων	10
Ακρωνύμια.....	11
1. Εισαγωγή	13
2. Κινητά Δίκτυα	15
2.1 Η ιστορία των κινητών δικτύων	15
2.2 Η επανάσταση των κινητών δικτύων	16
2.3 Περιορισμοί της κλασσικής αρχιτεκτονικής των κινητών δικτύων.....	19
3. Software Defined Mobile Networking.....	21
3.1 SDN: Ιστορία και εξέλιξη	21
3.2 Software Defined Mobile Network.....	22
3.3 Πλεονεκτήματα χρήσης SDMN.....	26
3.3.1 Οφέλη στο Radio Access Network.....	27
3.3.2 Οφέλη στο Mobile Core Network.....	27
3.3.3 Οφέλη στο External Network	28
4. Αρχιτεκτονική των Mobile Networks	29
4.1 Evolved Packet Core	29
4.2 Αρχιτεκτονική του EPC.....	30
4.2.1 HSS.....	30
4.2.2 Serving GW	31
4.2.3 PDN GW	31
4.2.4 MME	32
4.3 UTRAN Universal Terrestrial Radio Access Network	33
4.4 Evolved Packet System	34
4.5 Cloud/Centralized Radio Access Network (C-RAN)	36
4.5.1 Η λύση του C-RAN	36
4.5.2 Επίδραση στο κόστος με τη χρήση C-RAN	37
4.5.3 Μειωμένες παρεμβολές στο δίκτυο και Advanced C-RAN	37
5. Αρχιτεκτονική του SDN.....	39

5.1 SDN διακόπτες.....	39
5.2 SDN ελεγκτής.....	40
5.2.1 Ο κεντρικός έλεγχος του SDN.....	41
5.3 SDN: Διεπαφές προγραμματισμού	42
5.3.1 Southbound Επικοινωνία	42
5.3.2 Επισκόπηση του OpenFlow	43
5.3.3 Northbound API.....	45
5.4 Σχέση του SDN με την εικονικοποίηση δικτύου και του NFV.	46
5.4.1 SDN και εικονικοποίηση του δικτύου	46
5.4.2 SDN και NFV.....	46
5.4.3 Αρχιτεκτονική SDN και Virtualization-Based Mobile Network (SDVMN).....	49
6. Ανάλυση της αρχιτεκτονικής του SDMN	52
6.1 Όραμα του SDN στα δίκτυα LTE.....	52
6.1.1 MM App.....	53
6.1.2 Access App.....	53
6.1.3 Secure Service Delivery App	54
6.2 Επιλογές για την τοποθέτηση του ελεγκτή SDMN	55
6.3 Το δίκτυο κινητής πρόσβασης που βασίζεται σε SDN	58
6.4 Αρχιτεκτονική με βάση το SDN.....	61
6.5 Η αρχιτεκτονική του SDMN	63
6.5.1 Ο ελεγκτής	63
6.5.2 Οι λειτουργίες των διακοπών	64
6.5.3 Ευέλικτη επεξεργασία πακέτων των διακοπών	64
6.5.4 Σταθμός βάσης: Απομακρυσμένος έλεγχος και εικονικοποίηση.....	65
6.6 Προτάσεις αρχιτεκτονικής για κινητά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασισμένα σε SDN.....	67
7. Αξιολόγηση του SDMN	71
7.1 Ανάγκη για μια νέα αρχιτεκτονική δικτύων για τους χρήστες των Mobile Networks.....	71
7.2 Τεχνική και επιχειρηματική ανάλυση των SDMN	72
7.2.1. Τεχνική ανάλυση του SDMN	72
7.2.2 Ποιοτική αξιολόγηση του κόστους του SDMN.....	72
7.2.3 Capex με τη χρήση SDMN.....	73
7.2.4 Opex με τη χρήση SDMN	74
7.3 Βασικά οφέλη χρήσης του SDMN	75
7.3.1 Διαχείριση παρεμβολών	75
7.3.2 Διαχείριση φόρτωσης κινητής κυκλοφορίας	76
7.3.3 Εικονικοποίηση του δικτύου	77
7.3.4 Οφέλη στους παρόχους	77

7.3.5 Οφέλη στους διαχειριστές	78
8. Συμπεράσματα	79
9. Μελλοντική Έρευνα.....	80
10. Βιβλιογραφία.....	81

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1. Η εξέλιξη των υπηρεσιών της κινητής βιομηχανίας . Πηγή: Cisco Systems (2014) Cisco Visual Networking Index (VNI)	15
Σχήμα 2. Παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Πηγή: Cisco Systems (2014) Cisco Visual Networking Index (VNI)	16
Σχήμα 3. Επίδραση των έξυπνων κινητών συσκευών στη αύξηση της κίνησης δεδομένων. Το smart traffic δημιουργείται από συσκευές με ελάχιστη συνδεσιμότητα 3G. Πηγή: Cisco Systems (2014) Cisco Visual Networking Index (VNI)	17
Σχήμα 4. Παγκόσμια ανάπτυξη έξυπνων κινητών συσκευών και συνδέσεων. Οι έξυπνες συσκευές είναι αυτές που έχουν προηγμένες δυνατότητες με ελάχιστη συνδεσιμότητα 3G.	18
Σχήμα 5. SDMN αρχιτεκτονική [43].....	22
Σχήμα 6. Επίπεδα αρχιτεκτονικής SDMN [44].	25
Σχήμα 7. Εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων [13].....	29
Σχήμα 8. Βασική αρχιτεκτονική του EPS [13].....	30
Σχήμα 9. Συνδέσεις του P-GW με άλλους λογικούς κόμβους και οι βασικές λειτουργίες [14].	31
Σχήμα 10. MME και Serving Gateway [14].	32
Σχήμα 11. Αρχιτεκτονική του UTRAN [45].	33
Σχήμα 12. Η ροή του EPS [46].	34
Σχήμα 13. Η αρχιτεκτονική του EPS [46].....	34
Σχήμα 14. Η εξέλιξη από GPRS σε EPS [46].....	35
Σχήμα 15. C-RAN Αρχιτεκτονική [20].	37
Σχήμα 16. Advanced C-RAN αρχιτεκτονική [20].....	38
Σχήμα 17. Carrier Aggregation (2CC) [20].....	38
Σχήμα 18. Διεπαφές προγραμματισμού στην αρχιτεκτονική SDN [47].....	42
Σχήμα 19 Το πρωτόκολλο OpenFlow. Πηγή: ONF OpenFlow 1.3.0 Switch Specification.....	43
Σχήμα 20. Η αρχιτεκτονική του OpenFlow. Πηγή : NoviFlow, Inc.	44
Σχήμα 21. Σχέση του SDN & NFV.....	48
Σχήμα 22. Γενική αρχιτεκτονική ενός SDN και ενός κινητού δικτύου βασισμένου σε virtualization (SDVMN) [48].	49
Σχήμα 23. Ομάδες εφαρμογών του SDMN σε 5G δίκτυο [54].....	52
Σχήμα 24. Αρχιτεκτονική δικτύου LTE [54].	55
Σχήμα 25. (α) Ενσωμάτωση του SDN με το S / P-GW (b) Ενσωμάτωση του SDN με το MME [54]... ..	56
Σχήμα 26. Ενσωμάτωση του SDN με το MME [54].	57
Σχήμα 27. Το δίκτυο κινητής πρόσβασης που βασίζεται σε SDN [55].	59
Σχήμα 28. SDMN αρχιτεκτονική προς το 5G	61
Σχήμα 29. Ομαλή μετεγκατάσταση 3 βημάτων προς το SDMN.....	62
Σχήμα 30. Αρχιτεκτονική SoftCell [63]	68
Σχήμα 31. SoftRAN αρχιτεκτονική [62]	69
Σχήμα 32. Αρχιτεκτονική του MobileFlow [64]	70
Σχήμα 33. Μειώσεις του κόστους σε opex & capex σε τρία σενάρια [42].	73

Ακρωνύμια

VNF: Virtualized Network Functions
SDN: Software Defined Networking
SDMN: Software Defined Mobile Networking
EPS: Evolved Packet System
SDVMN: Software Defined Virtualization-Based Mobile Network
CAPEX: Capital expenditure
OPEX: Operational expenditure
GSM: Global System for Mobile communications
LTE: Long Term Evolution
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
M2M: Machine to machine
SMS: Short Message Service
SP: Service Providers
API: Application Programming Interface
PPP: Public Private Partnership
HMNs: Heterogeneous Mobile Networks
DP: Data Plane
CP: Control Plane
NOS: Network Operating System
3GPP: 3rd Generation Partnership Project
QoS: Quality of Service
RAN: Radio Access Network
VNO: Virtual Network Operator
GPRS: General Packet Radio Service
EPC: Evolved Packet Core
IP: Internet Protocol
UE: User Equipment
UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network
BGP: Border Gateway Protocol
NFV: Network Function Virtualization
MVNO: Mobile Virtual Network Operator
MaaS: Metal as a Service
GTP: GPRS Tunneling Protocol
DDoS: Distributed Denial-of-Service Attack
TCAM: Telecommunications Access Method
SIB: Subscribers Information Base
TCP: Transmission Control Protocol
UDP: User Datagram Protocol
VoIP: Voice over IP
DPI: Deep Packet Inspection
MAC: Media Access Control

1. Εισαγωγή

Σε όλο τον κόσμο, οι φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων χρειάζεται να ξοδεύουν δισεκατομμύρια προκειμένου να αναβαθμίσουν το δίκτυό τους, με τέτοιο τρόπο ώστε να συμβαδίζει με τα σύγχρονα πρότυπα του ασύρματου κινητού δικτύου υψηλών ταχυτήτων, όπως το LTE. Η αναβάθμιση αυτή του δικτύου οδηγεί σε αύξηση των μέσων εσόδων των φορέων και απειλεί άμεσα την κερδοφορία από μέρους των εταιρειών, ενώ καθυστερεί την υιοθέτηση των νέων προδιαγραφών δικτύου. Επομένως, είναι απαραίτητο να βρεθεί ένας νέος μηχανισμός για μείωση των κεφαλαιουχικών δαπανών (capex) και των δαπανών υποδομής (opex), ο οποίος θα επιτρέπει την άμεση υιοθέτηση των σύγχρονων προτύπων αναβάθμισης του δικτύου, χωρίς να επιφέρει μείωση των εσόδων στους παρόχους.

Την απάντηση σε αυτό το τεχνοοικονομικό ζήτημα έρχεται να δώσει μια νέα αρχιτεκτονική, το SDN, το οποίο βασίζεται στην αρχή ενεργοποίησης πολλαπλών παρόχων σε μια κοινή υποδομή δικτύου. Σε συνδυασμό με τον κεντρικό έλεγχο του controller, μέσω πρωτοκόλλων όπως το OpenFlow και της εικονικοποίησης μέσω του VNF, αποτελούν την αρχή για την επίλυση των σύγχρονων προβλημάτων του κινητού δικτύου.

Η τεχνική και οικονομική ανάλυση, όπως παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, υποδηλώνει ότι το SDN και η εικονικοποίηση του δικτύου υποδομής οδηγούν σε ουσιαστική μείωση των capex και opex για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Ως εκ τούτου, η χρήση του SDN θα επιλύσει τα ζητήματα αύξησης των εσόδων από την αναβάθμιση δικτύου και θα αυξήσει την κερδοφορία για τους παρόχους.

Συγκεκριμένα, στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή των κινητών δικτύων, τα σύγχρονα χαρακτηριστικά τους και οι περιορισμοί από τη χρήση τους.

Το 3^ο κεφάλαιο αφορά την αρχιτεκτονική SDN στα κινητά δίκτυα επικοινωνίας. Από την ιστορία και την εξέλιξη της οδηγούμαστε στη δομή της αρχιτεκτονικής αυτής και στη χρήση της ως εξέλιξης της κλασικής αρχιτεκτονικής των κινητών δικτύων. Στη συνέχεια, αναλύονται τα πλεονεκτήματα στη χρήση του SDMN σε κάθε επίπεδο των mobile networks.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται η δομή της αρχιτεκτονικής των mobile networks και συγκεκριμένα η αρχιτεκτονική του EPS με τα επιμέρους στοιχεία αυτής, τα οποία αποτελούν βάση για την ανάπτυξη και εξέλιξη της αρχιτεκτονικής SDMN.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του SDN αλλά και η σχέση του με την εικονικοποίηση των δικτύων καθώς και του NFV. Αναλύεται επίσης η αρχιτεκτονική ενός SDN κινητού δικτύου βασισμένου σε virtualization (SDVMN).

Στο 6^ο κεφάλαιο αναλύεται λεπτομερώς η αρχιτεκτονική του SDMN, ο τρόπος λειτουργίας αυτής της νέας αρχιτεκτονικής στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών, το όραμα για τα LTE δίκτυα αλλά και για το ανερχόμενο 5G. Μπαίνουν οι κατευθύνσεις για την τοποθέτηση του ελεγκτή του SDMN και τις λειτουργίες των διακοπών που θα παίξουν καθοριστικό ρόλο. Παρουσιάζονται επίσης πρότυπες αρχιτεκτονικές με βάση το SDN που κάθε μία έχει συγκεκριμένο σκοπό.

Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο έχουμε την αξιολόγηση του SDN. Καταγράφονται τα οφέλη με την χρήση αυτής της αρχιτεκτονικής τόσο στα φυσικά πρόσωπα του διαχειριστή και του παρόχου όσο και στην λειτουργία του δικτύου σαν οντότητα, σαν μοντέλο.

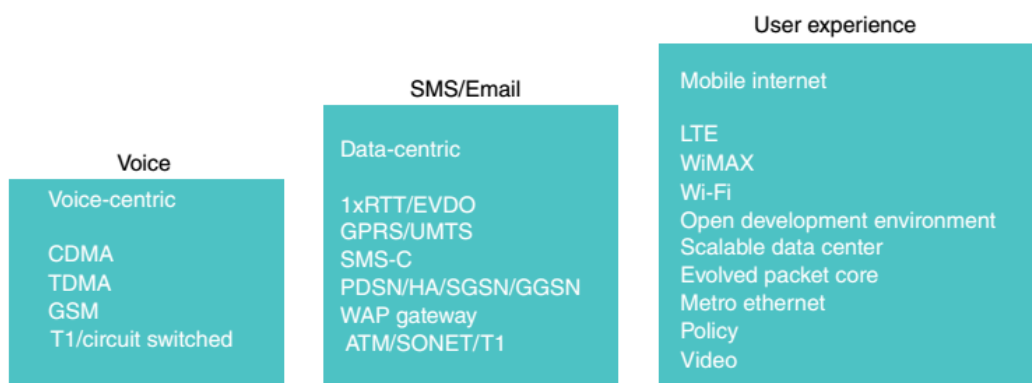
2. Κινητά Δίκτυα

2.1 Η ιστορία των κινητών δικτύων

Η εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας έχει αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι ζουν, εργάζονται και διασκεδάζουν, και μάλιστα σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Μέχρι το 1990, ήταν γνωστή η σταθερή αύξηση των κεφαλαίων για τους παρόχους υπηρεσιών, αλλά κανείς δε θα μπορούσε να προβλέψει τη μαζική αναστάτωση που προκλήθηκε στην αγορά από την εμφάνιση της κινητής δικτύωσης. Η εξέλιξη αυτών των αλλαγών ήταν τόσο ραγδαία και επέφερε τέτοιες αλλαγές στον τρόπο επικοινωνίας που πλέον οι σύγχρονοι νέοι δεν έχουν δει ή χρησιμοποιήσει ποτέ ένα τηλεφωνικό θάλαμο, αλλά φέρουν ένα smartphone στην τσέπη τους και συνδέονται σχεδόν 24 ώρες την ημέρα στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, νέοι τομείς ανάπτυξης έρχονται στο προσκήνιο της συζήτησης. Η εικονικοποίηση (virtualization), η ενορχήστρωση (orchestration) και η δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability) δίνουν πλέον νέες δυνατότητες εξέλιξης τόσο σε επίπεδο εφαρμογών, αλλά δημιουργούν και νέες εμπειρίες σε χρήστες σε όλο τον κόσμο. Η συνδεσιμότητα του δικτύου, είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή των υπηρεσιών και της εμπειρίας που αναζητούν σήμερα οι χρήστες κινητών τηλεφώνων.

Από την εμφάνιση του εμπορικά διαθέσιμου GSM τη δεκαετία του 1990 η ζήτηση για κινητές υπηρεσίες άλλαξε και οδήγησε στην εξέλιξη σε μια πακετοποιημένη αρχιτεκτονική GPRS. Ωστόσο, οι ανάγκες ώθησαν σε δημιουργία μιας νέας πιο στιβαρής υπηρεσίας, του UMTS και στη συνέχεια στην πιο ώριμη σχεδίαση του LTE. Η εξέλιξις κατέληξαν σε σημαντική αλλαγή στη βασική δομή του πυρήνα.

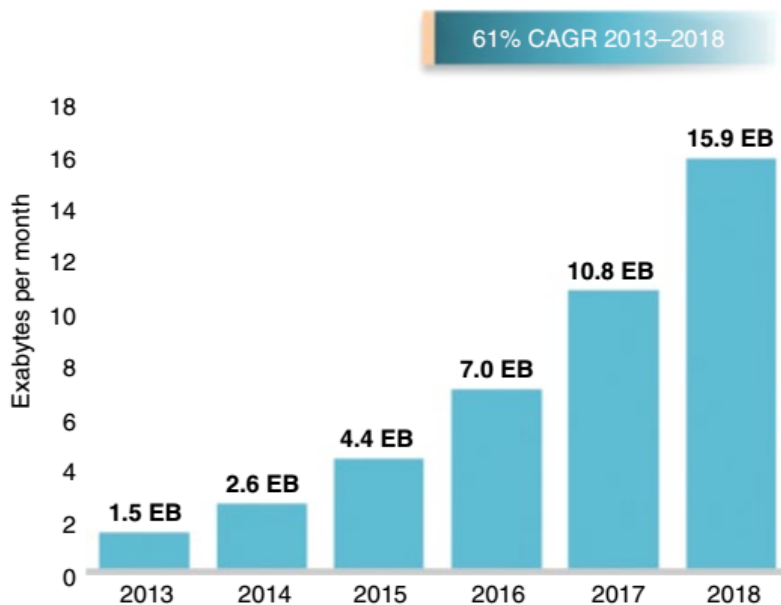


Σχήμα 1. Η εξέλιξη των υπηρεσιών της κινητής βιομηχανίας . Πηγή: Cisco Systems (2014) Cisco Visual Networking Index (VNI)

2.2 Η επανάσταση των κινητών δικτύων

Το σύγχρονο δίκτυο έχει εξελιχθεί πολύ από τις ημέρες των μισθωμένων γραμμών 56K και των T1 μαζί με το μεγάλο, κινητό τηλέφωνο στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Σήμερα, καθώς τα σημεία κινητής τηλεφωνίας καθίστανται ολοένα και περισσότερα, το ποσό των δεδομένων που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση αυτών των σημείων, σε συνδυασμό με τη διαχείριση της πρόσβασης σε κάθε μεμονωμένο δίκτυο, δημιουργούν σοβαρό πρόβλημα στη διαχείρισή τους. Το 2013 μόνο, προστέθηκαν πάνω από μισό δισεκατομμύριο (526 εκατομμύρια) κινητές συσκευές και συνδέσεις. Λύση έρχεται να δώσει, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) συμβάλλοντας στην αύξηση της κίνησης δεδομένων, σαν αποτέλεσμα μετάβασης σε πιο 'έξυπνες' κινητές συσκευές, χάρη στην εμφάνιση φορητών συσκευών και στην αύξηση των συνδέσεων μηχανής με μηχανή (M2M). Σήμερα, η νέα αρχιτεκτονική του κέντρου δεδομένων χρησιμοποιεί την εικονικοποίηση, την ενορχήστρωση και την κλιμάκωση [6].

Στο τέλος του 2013, η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας έφθασε τα 1,5 exabytes ανά μήνα [1] και αναμένεται να φθάσει τα 15,9 exabytes ανά μήνα έως το 2018.



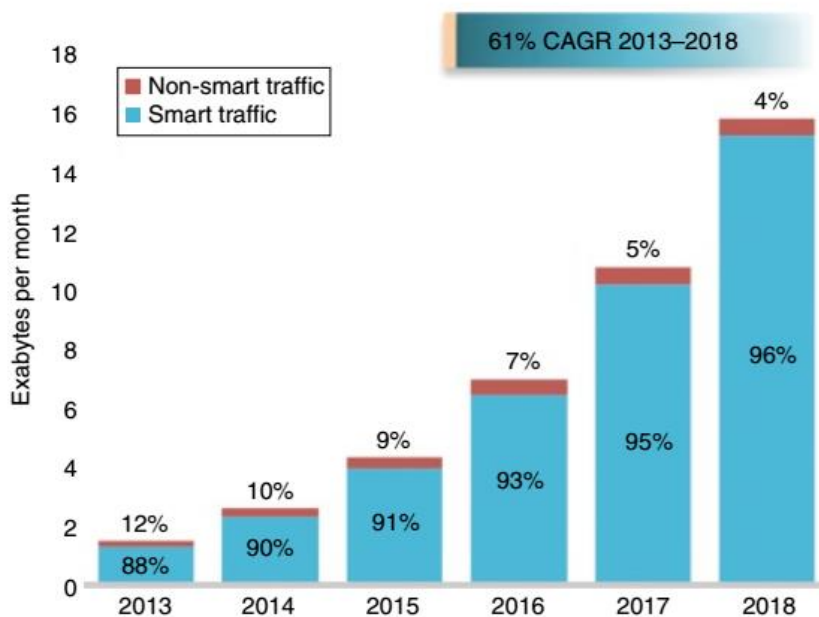
Σχήμα 2. Παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Πηγή: Cisco Systems (2014) Cisco Visual Networking Index (VNI)

Με την εισαγωγή του smartphone και την ικανότητα του καταναλωτή να αλλάξει το λειτουργικό σύστημα και να επιλέξει τις δικές του εφαρμογές, ο ίδιος ο χρήστης έχει για πρώτη φορά πραγματικό έλεγχο των προσωπικών του συσκευών. Πριν αυτό γίνει εφικτό, ο καταναλωτής είχε μόνο την ευχέρεια επιλογής της συσκευής τηλεφώνου, ενώ το λειτουργικό σύστημα είχε καθοριστεί από τον κατασκευαστή και δεν επιδεχόταν αλλαγές. Έτσι, ο καταναλωτής υποχρεούταν να χρησιμοποιήσει την εφαρμογή που είχε καθοριστεί από τον κατασκευαστή. Σε περίπτωση που

ο χρήστης επιθυμούσε κάποια εφαρμογή πλοήγησης, έπρεπε να την αγοράσει από τον πάροχο του τηλεφώνου. Αυτό αποτελεί πλέον παρελθόν, καθώς σήμερα ο καταναλωτής μπορεί να επιλέξει ο ίδιος κάποια εφαρμογή πλοήγησης, ανάμεσα στις χιλιάδες που διατίθενται στο διαδίκτυο, και να πληρώσει μια μικρή εφάπαξ χρέωση ή να χρησιμοποιήσει μία από τις χιλιάδες που διατίθενται δωρεάν.

Οι καταναλωτές χρησιμοποιούν πλέον το δίκτυο με διαφορετικούς τρόπους και όχι μόνο για τηλεφωνικές κλήσεις και μηνύματα SMS. Στέλνουν e-mail, περιηγούνται στο Διαδίκτυο, προσπελάζουν ιδιωτικά εταιρικά δίκτυα, επεξεργάζονται έγγραφα, ακούν μουσική, βλέπουν βίντεο, ακόμα και ζωντανή τηλεόραση. Ορισμένοι και ουκ ολίγοι αποθηκεύουν δεδομένα της ψηφιακής τους ζωής σε αυτές τις συσκευές, συμπεριλαμβανομένων στοιχείων από την προσωπική τους ζωή (οικογενειακές φωτογραφίες), την εργασιακή τους απασχόληση (εταιρικό email) καθώς και διαφόρων ειδών εμπιστευτικά έγγραφα. Οι χρήστες είναι πιο κινητοί, πιο ενημερωμένοι από ποτέ και βιώνουν πλέον μια νέα, ανεπανάληπτη εμπειρία με την χρήση των smartphones παρόμοια σε άνεση και ευκολία με την χρήση σταθερού υπολογιστή στο γραφείο.[2]

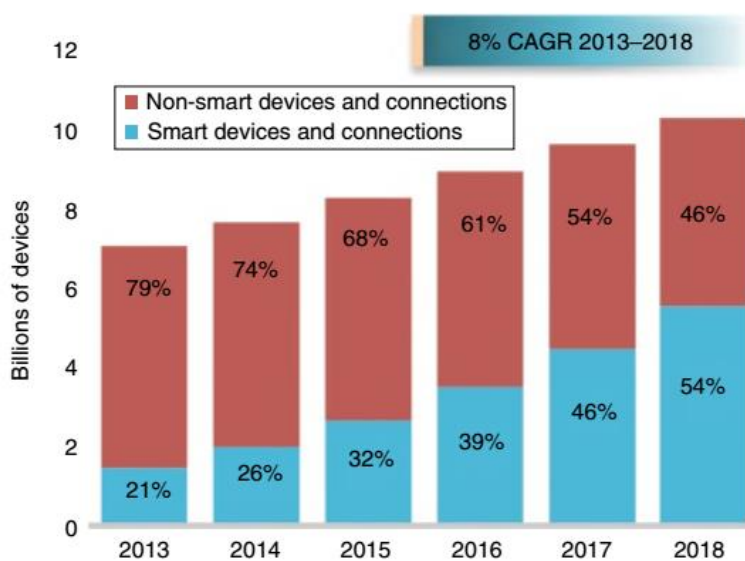
Οι επιλογές σε συσκευές αυξήθηκαν επίσης όχι μόνο με τηλέφωνα, αλλά με tablets με υπολογιστές και άλλα gadgets. Το smartphone δεν είναι πλέον ένα απλό παιχνίδι, είναι ένα βασικό επιχειρηματικό εργαλείο και υπάρχουν πολλές επιλογές ανάλογα με τις ανάγκες και τις προσωπικές προτιμήσεις του καταναλωτή. Ωστόσο, με την πληθώρα επιλογών έρχεται και μια σειρά πρόσθετων πιέσεων στους παρόχους υπηρεσιών (SP), οι οποίοι πρέπει τώρα να υποστηρίζουν τους πελάτες τους με βάση τις εξελισσόμενες ανάγκες και συμπεριφορές και να είναι επιπλέον ανταγωνιστικοί. Τα 'έξυπνα' τηλέφωνα απαιτούν περισσότερα δεδομένα και αναμένεται να είναι το 96% της παγκόσμιας κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2018 [1].



Σχήμα 3. Επίδραση των έξυπνων κινητών συσκευών στη αύξηση της κίνησης δεδομένων. Το smart traffic δημιουργείται από συσκευές με ελάχιστη συνδεσιμότητα 3G. Πηγή: Cisco Systems (2014) Cisco Visual Networking Index (VNI)

Κατανοώντας τις προκλήσεις του σήμερα και εξετάζοντας τις τάσεις του μέλλοντος, είναι σαφές ότι ο τρόπος διαχείρισης και κατασκευής των κινητών δικτύων πρέπει να αλλάξει. Υπάρχει η ανάγκη για καλύτερη ενορχήστρωση σε βάθος ανάλυσης για να εξασφαλιστεί η επιτυχή λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας στο μέλλον. Η μηνιαία παγκόσμια κυκλοφορία δεδομένων κινητής τηλεφωνίας θα ξεπεράσει τα 15 exabytes το μήνα μέχρι το 2018, από σχεδόν 10 δισεκατομμύρια κινητές συσκευές και συνδέσεις [1].

Με την ταχεία εξέλιξη των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας πρέπει να διατηρούν πολλαπλά δίκτυα για να υποστηρίξουν όλες τις υπηρεσίες τους 2G, 3G και LTE. Αν και ένα μεγάλο ποσοστό των χρηστών μεταναστεύουν σε νέα smartphone με δυνατότητα LTE [1], εξακολουθεί να υπάρχει ένα σημαντικό τμήμα καταναλωτών που αρκούνται στη χρήση συσκευών παλαιότερης τεχνολογίας, που απαιτεί εξίσου υποστήριξη και εξυπηρέτηση.



Σχήμα 4. Παγκόσμια ανάπτυξη έξυπνων κινητών συσκευών και συνδέσεων. Οι έξυπνες συσκευές είναι αυτές που έχουν προηγμένες δυνατότητες με ελάχιστη συνδεσιμότητα 3G.

Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να προσαρμοστούν και να ανταποκριθούν στον αυξανόμενο αριθμό συσκευών και στις απαιτήσεις κυκλοφορίας. Για να γίνει αυτό, πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν, να διαχειρίζονται και να βελτιστοποιούν το κινητό δίκτυο από άκρη σε άκρη. Η χρήση κοινών εργαλείων και τυποποιημένων Διεπαφών Προγραμματισμού Εφαρμογών (API) για την επικοινωνία με συσκευές μπορεί να απλοποιήσει την υπάρχουσα πολυπλοκότητα του δικτύου. Αυτό θα επιτρέπει πλέον στους παρόχους υπηρεσιών να εφαρμόζουν γρήγορα και αποτελεσματικά τις νέες ή επικαιροποιημένες πολιτικές υπηρεσιών, με βάση τις ανάγκες τους, για την ανάπτυξη της κυκλοφορίας του δικτύου σε οποιοδήποτε σημείο του. Χωρίς ένα πρότυπο API για τη συλλογή πληροφοριών από το δίκτυο και ένα ισχυρό σύστημα ενορχήστρωσης για την αυτοματοποίηση των αλλαγών, το δίκτυο δεν θα είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις συνεχόμενες απαιτήσεις των κινητών συσκευών. Επομένως, οι χειριστές θα πρέπει να έχουν ένα σημείο ελέγχου υψηλού επιπέδου όπου θα μπορούν να εφαρμόζουν γρήγορα αλλαγές στο δίκτυο ως σύνολο.

2.3 Περιορισμοί της κλασσικής αρχιτεκτονικής των κινητών δικτύων

Όλες αυτές οι υπηρεσίες τροφοδοτούν την έλξη προς τα κινητά ευρυζωνικά δίκτυα αντί για το ενσύρματο Internet. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι η κίνηση των δεδομένων μέσω κινητού τηλεφώνου θα ξεπεράσει την ενσύρματη κίνηση δεδομένων στο εγγύς μέλλον. Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρέπει να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας για τους συνδρομητές τους, ακόμη και στις περιπτώσεις που οι απαιτήσεις κυκλοφορίας είναι πολύ μεγάλες.

Είναι πολύ δύσκολο να ικανοποιηθούν όλες αυτές τις απαιτήσεις χρησιμοποιώντας τη σημερινή αρχιτεκτονική κινητού δικτύου. Τα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αντιμετωπίζουν διάφορους περιορισμούς και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

Scalability: Τα υπάρχοντα στατικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι δύσκολο να τροποποιηθούν ώστε να συμβαδίζουν με τις αυξανόμενες απαιτήσεις κυκλοφορίας και εάν αυτό γίνει εφικτό, θα είναι εξαιρετικά δαπανηρό.

Complex network management: Οι περισσότερες συσκευές Backhaul, όπως τα eNodeBs (εξελισσόμενες NodeBs) και οι οντότητες διαχείρισης της κίνησης, στερούνται κοινών διεπαφών ελέγχου. Ως εκ τούτου, απαιτείται σημαντική τεχνογνωσία και πόροι για τη διαχείριση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Manual network configuration: Τα περισσότερα συστήματα διαχείρισης δικτύων είναι χειροκίνητα και απαιτούνται εκπαιδευμένοι χειριστές [3-4] για την επίτευξη ασφάλειας [5]. Ωστόσο, αυτές οι χειροκίνητες ρυθμίσεις είναι επιρρεπείς σε σφάλματα λανθασμένης ρύθμισης. Επίσης, είναι δαπανηρή και χρειάζεται πολύς χρόνος για την αντιμετώπιση τέτοιων σφαλμάτων. Σύμφωνα με την έκθεση του Ομίλου Yankee [3], το 62% των διακοπών του δικτύου σε δίκτυα πολλαπλών εκδόσεων οφείλεται σε ανθρώπινα λάθη. Επιπλέον, το 80% του προϋπολογισμού του IT δαπανάτε για τη συντήρηση και τη λειτουργία του δικτύου.

Inflexibility: Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, η διαδικασία υλοποίησης – διατήρησης των standards είναι μεγάλη. Επομένως, χρειάζονται πολλοί μήνες ή χρόνια για την εισαγωγή νέων υπηρεσιών.

High cost: Οι φορείς κινητής τηλεφωνίας δεν έχουν την ευελιξία να "συνδυάζουν" τις δυνατότητες από διαφορετικές συσκευές προμηθευτών. Αυτό αυξάνει άμεσα τις κεφαλαιουχικές δαπάνες του δικτύου. Επιπλέον, η χειροκίνητη διαμόρφωση και η έλλειψη ευελιξίας αυξάνουν τα λειτουργικά έξοδα του δικτύου.

Multioperator or multitechnology environment: Τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών περιέχουν ποικίλες ασύρματες τεχνολογίες (για παράδειγμα, Enhanced Data Rates for GSM Evolution, Wideband Code Division Multiple Access, Long-Term Evolution, και Wi-Fi) και υποστηρίζουν πολλούς εικονικούς ιδιωτικούς φορείς.

Complex and expensive network devices: Είναι δύσκολο να γίνει διαχειρίσιμη η λειτουργικότητα των συσκευών που προέρχονται από διαφορετικούς προμηθευτές σε ένα περιβάλλον πολλαπλών λειτουργιών, καθώς χρησιμοποιούν διαφορετικές ρυθμίσεις, έχουν διαφορετικές απαιτήσεις πολιτικής και ασφάλειας.

Complex and expensive network devices: Ορισμένες κινητές συσκευές backhaul πρέπει να χειρίζονται εκτεταμένες λειτουργίες. Για παράδειγμα, το Packet Data Gateway είναι υπεύθυνο για πολλές σημαντικές λειτουργίες του data plane, όπως η παρακολούθηση της κυκλοφορίας, η τιμολόγηση, η διαχείριση ποιότητας της υπηρεσίας (QoS), και ο έλεγχος πρόσβασης. Επομένως, οι συσκευές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές.

Increasing network congestion: Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας πρέπει να χρησιμοποιούν μικρότερες κυψέλες για να διευκολύνουν την αύξηση της κυκλοφορίας, πράγμα που αυξάνει τελικά τον αριθμό των σταθμών βάσης στο δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, στα κινητά δίκτυα οι συσκευές backhaul θα αντιμετωπίσουν συμφόρηση με τρόπο παρόμοιο με τα δίκτυα δεδομένων.

Frequent mobility and roaming: Τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών υποστηρίζουν τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης (για παράδειγμα, 2G, 3G, 4G και Wi-Fi). Επομένως, οι χρήστες κινητών συσκευών μετακινούνται συχνά σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα διαχείρισης του δικτύου.

3. Software Defined Mobile Networking

3.1 SDN: Ιστορία και εξέλιξη

Έπειτα από τρεις δεκαετίες εξέλιξης, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας προχωρούν στην πέμπτη γενιά (5G)[7]. Στην Ευρώπη το 5G infrastructure public private partnership (PPP) καθόρισε τους παρακάτω φιλόδοξους στόχους απόδοσης για δίκτυα 5G: 10 με 100 φορές υψηλότερο ρυθμό δεδομένων μέσου χρήστη, 10 με 100 φορές περισσότερες συνδεδεμένες συσκευές, 10 φορές χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας δικτύου, λιγότερο από 1 ms end-to-end latency και 1000 φορές υψηλότερη ασύρματη κίνηση δεδομένων ανά γεωγραφική περιοχή.

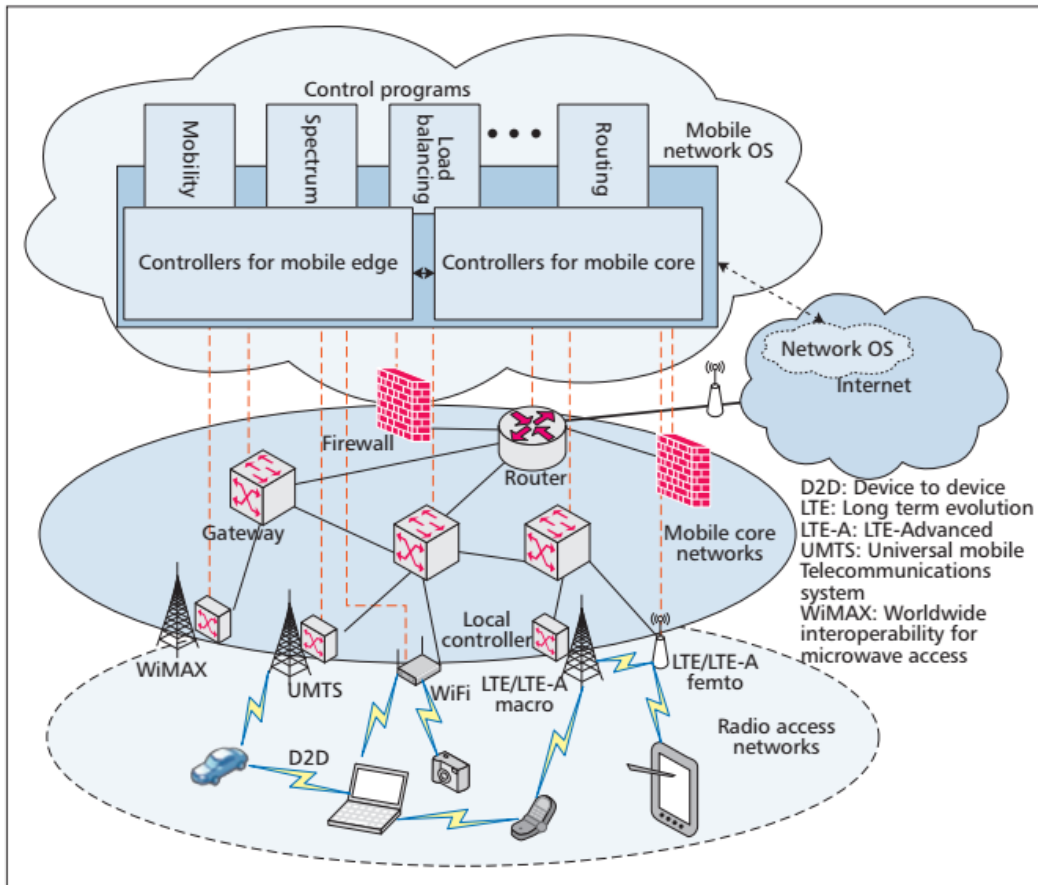
Προκειμένου να ικανοποιηθούν αυτές οι νέες απαιτήσεις, θα παρατηρηθούν περισσότερες αποδιοργανωτικές αλλαγές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ένα διακεκριμένο χαρακτηριστικό θα είναι η πλήρης υιοθέτηση του σχεδιασμού δικτύωσης που καθορίζεται από το λογισμικό σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Πράγματι, ο προσδιορισμός του λογισμικού των δικτύων κινητής τηλεφωνίας θα μπορούσε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τα δυσκολότερα προβλήματα των σημερινών κινητών και άλλων δικτύων ασύρματης πρόσβασης, να διαχειριστεί την ανομοιογένεια και την πολυπλοκότητα στο δίκτυο, και επιπλέον να γίνει ο καταλύτης θεμελιωδών αλλαγών στο ασύρματο οικοσύστημα.

Ενώ ο ορισμός των καθορισμένων από το λογισμικό κινητών δικτύων (SDMNs) παραμένει ανοικτός, το SDN για το διαδίκτυο χρησιμοποιείται ευρέως ως μοντέλο αναφοράς για το σχεδιασμό SDMN. Οι βασικές ιδέες από το SDN για το διαδίκτυο είναι η αποσύνδεση του επιπέδου δεδομένων και του επιπέδου ελέγχου και η χρήση λογικού κεντρικού ελέγχου για τη διαχείριση του εκάστοτε προβλήματος σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα. Προφανώς το SDMN δεν θα αποτελέσει μια απλή επέκταση της ιδέας του SDN για το διαδίκτυο, διότι η ασύρματη πρόσβαση στα κινητά δίκτυα είναι διαφορετική από τη δρομολόγηση στο διαδίκτυο. Κάποια προστιθέμενα χαρακτηριστικά λογισμικού στα SDMNs θα ικανοποιήσουν συγκεκριμένες ανάγκες των ασύρματων δικτύων.

Η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων ίσως δώσει κάποια στοιχεία για τον σχεδιασμό του SDMN. Στις μέρες μας τα υπολογιστικά συστήματα έχουν εξελιχθεί σε τέτοιο επίπεδο που η απόδοση ενός smartphone εύκολα ξεπερνάει αυτή ενός υπερ-υπολογιστή προ δεκαετιών. Αυτή η εξέλιξη υποστηρίζεται σταθερά από τις προόδους στην ανάπτυξη του λειτουργικού συστήματος (OS) και των γλωσσών προγραμματισμού. Τα OS αποσυνδέουν επιτυχώς τα high-layer προγράμματα από την εκτέλεση low-layer hardware.

Η λειτουργία του αφηρημένου και σπονδυλωτού σχεδιασμού ενός υπολογιστικού συστήματος μαζί με τη μετατόπιση του προβλήματος προς τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, καθιερώνουν τις αρχές σχεδιασμού για να ελέγξουν την πολυπλοκότητα των συστημάτων πληροφορικής. Η επιστήμη των υπολογιστών γεννήθηκε για να δημιουργήσει το θεωρητικό υπόβαθρο που εγγυάται περαιτέρω την καινοτομία και τη συνεχή εξέλιξη των συστημάτων πληροφορικής.

Η ίδια τάση ταιριάζει με την ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών. Οι αλληλεπιδράσεις και η πολυπλοκότητα στα σημερινά ετερογενή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (HMNs) είναι παρόμοια με τα αρχικά στάδια της ιστορίας των συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Πρέπει, λοιπόν, να αναθεωρηθεί η μορφή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Μια πιο απλουστευμένη αρχιτεκτονική του SDMN αναπαρίσταται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5. SDMN αρχιτεκτονική [43].

3.2 Software Defined Mobile Network

Το SDN είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που αναμένεται να επιλύσει πολλούς περιορισμούς στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το SDN παρέχει στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τις απαιτούμενες βελτιώσεις στην ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την επίδοση ώστε να συμβαδίζει με την αναμενόμενη ανάπτυξη. Τα καθορισμένα από το λογισμικό κινητά δίκτυα (SDMN) κατευθύνουν το τρέχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας προς ένα μοντέλο που βασίζεται στον κεντρικό έλεγχο και χρησιμοποιεί μη δαπανηρό υλικό και έναν κεντρικό ελεγκτή. Το SDN επιτρέπει τον διαχωρισμό του επιπέδου δεδομένων (DP) από τα επίπεδα ελέγχου (CP). Οι διακόπτες, οι δρομολογητές και οι πύλες με δυνατότητα SDN ελέγχονται μέσω ενός SDN ελεγκτή / λειτουργικό σύστημα δικτύου (NOS) και θεωρούνται ως εικονικοί πόροι. Το CP των στοιχείων δικτύωσης κινητής τηλεφωνίας μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα cloud operator για υπολογιστές.

Σε αυτό το πρότυπο, κάθε φορέας εκμετάλλευσης έχει την ευελιξία να αναπτύξει τις δικές του δικτυακές ιδέες, να βελτιστοποιήσει το δίκτυό του και να αντιμετωπίσει τις συγκεκριμένες ανάγκες των συνδρομητών του. Επιπλέον, οι προγραμματιζόμενοι από το λογισμικό διακόπτες δικτύου στο SDMN χρησιμοποιούν σύγχρονες ευέλικτες μεθοδολογίες προγραμματισμού. Αυτές οι μεθοδολογίες λογισμικού μπορούν να αναπτυχθούν, να ενισχυθούν και να αναβαθμιστούν σε πολύ μικρότερους κύκλους από την ανάπτυξη των σύγχρονων, τελευταίας τεχνολογίας κινητών συσκευών backhaul.

Η απόκτηση του virtualization σε κινητά δίκτυα Long Term Evolution (LTE) φέρνει το οικονομικό πλεονέκτημα με δύο τρόπους. Πρώτον, το SDMN απαιτεί φθηνό υλικό, όπως εμπορικούς διακομιστές και διακόπτες αντί των ακριβών κινητών συσκευών backhaul. Δεύτερον, η εισαγωγή της τεχνολογίας SDN στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας επιτρέπει την είσοδο νέων φορέων στο οικοσύστημα δικτύου κινητής τηλεφωνίας, όπως οι ανεξάρτητοι προμηθευτές λογισμικού (ISV), οι προμηθευτές cloud συστημάτων και οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου (ISP) που θα αλλάξουν το επιχειρηματικό μοντέλο των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Έτσι, η έννοια του SDMN θα αλλάξει την αρχιτεκτονική δικτύου των σημερινών δικτύων LTE 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Το SDN θα ανοίξει επίσης νέες ευκαιρίες διαχείρισης της κυκλοφορίας, των πόρων, και της κινητικότητας, καθώς και θα επιβάλλει νέες προκλήσεις στην ασφάλεια των δικτύων.

Η προσαρμογή του SDN και της έννοιας της εικονικοποίησης στον τομέα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας θα επιλύσει τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το SDN σχεδιάστηκε αρχικά για σταθερά δίκτυα. Ωστόσο, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τα σταθερά δίκτυα, όπως το mobility management, το air-interface, η υψηλότερη ποιότητα των υπηρεσιών (QoS), η μεταφορά πακέτων και πολλά άλλα. Ως εκ τούτου, η ιδέα SDMN προτείνεται ως επέκταση του υποδείγματος SDN για την υποστήριξη της λειτουργικότητας συγκεκριμένων δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, το SDMN έχει μεγαλύτερο βαθμό ενημερότητας στις υπηρεσίες του και βέλτιστη χρήση των πόρων του δικτύου σε σχέση με τις αρχικές ιδέες του SDN.

Οι τελευταίες τηλεπικοινωνιακές αρχιτεκτονικές όπως το Evolved Packet Core (EPC) εξήγησαν τα πλεονεκτήματα του διαχωρισμού του CP από το DP. Το EPC υποστήριξε αυτόν τον διαχωρισμό σε κάποιο βαθμό. Ωστόσο, το SDN επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό τους. Επιπλέον, οργανισμοί όπως ο Internet Engineering Task Force (IETF) και ο European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ενδιαφέρονται να χρησιμοποιήσουν έννοιες εικονικής λειτουργίας δικτύου (NFV) σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Οι έννοιες του SDN συμβάλλουν επίσης στην προσαρμογή των λειτουργιών NFV. Βασικά, οι έννοιες του NFV διευκολύνουν την παροχή κατ' απαίτηση και την online κλιμάκωση για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Το SDMN χωρίζει το CP και το DP του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και επιτρέπει με αυτό τον τρόπο τη συγκέντρωση όλων των λειτουργιών ελέγχου. Το DP αποτελείται τώρα από low-end διακόπτες και συνδέσμους μεταξύ τους. Η αρχιτεκτονική SDMN λοιπόν, μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα [8, 9, 10] :

1. DP επίπεδο

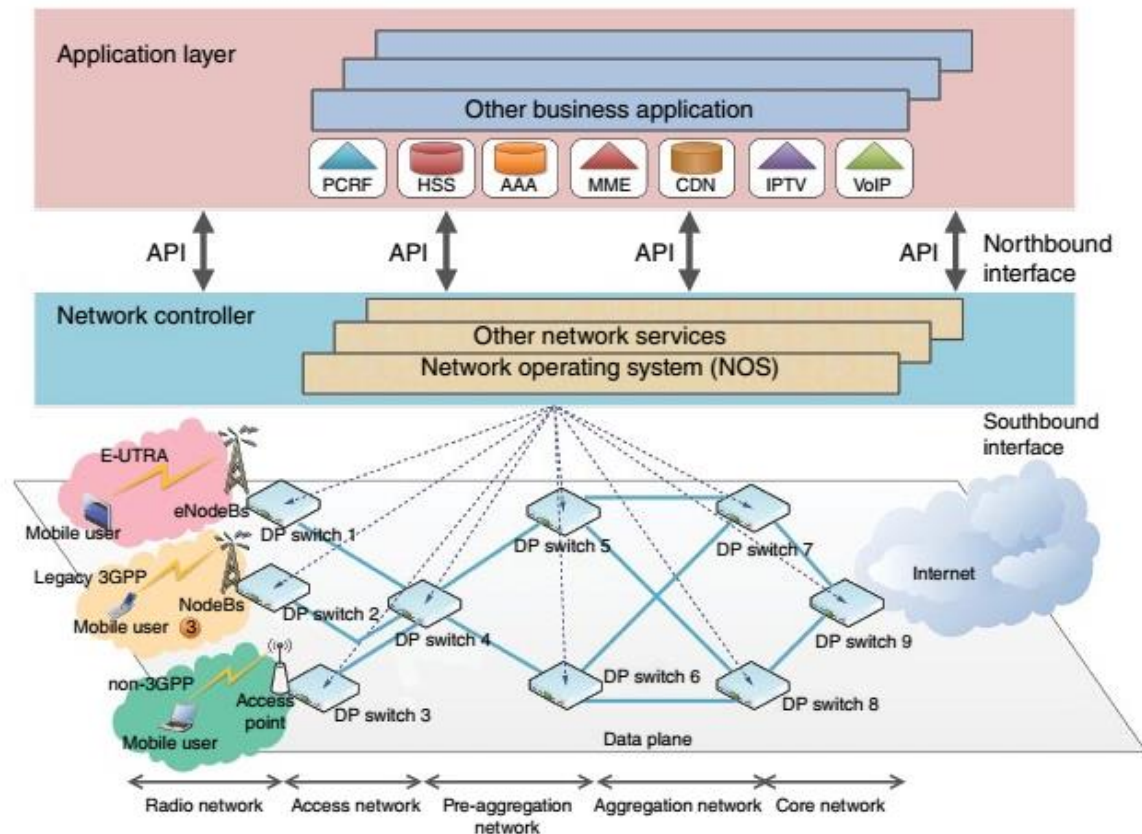
Το στρώμα DP είναι επίσης γνωστό ως το στρώμα υποδομής. Αποτελείται από στοιχεία δικτύου όπως διακόπτες και άλλες συσκευές. Οι διακόπτες υποστηρίζουν τις λειτουργίες μεταγωγής πακέτων και προώθησης. Οι σταθμοί βάσης συνδέονται με τους DP διακόπτες στα άκρα του επιπέδου. Παρομοίως, οι διακόπτες των συνόρων στο κεντρικό δίκτυο συνδέονται με το Internet για να εκφορτώσουν την κίνηση των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας.

2. Network controller

Ο κεντρικός ελεγκτής παρέχει μια ενοποιημένη λειτουργία ελέγχου των DP διακοπών. Με ένα πρωτόκολλο ελέγχου (π.χ. OpenFlow, Beacon, Maestro και DevonFlow) μπορεί να επιτευχθεί από τον ελεγκτή η επικοινωνία με τα στοιχεία του DP. Βασικά, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο ελέγχου για να εγκαταστήσει τους κανόνες ροής σε κάθε DP διακόπτη για τη δρομολόγηση της κίνησης κατά μήκος του DP κινητού δικτύου. Η σύνδεση του ελεγκτή δικτύου με το DP επίπεδο πραγματοποιείται από το Southbound Application Programming Interface (API). Το λειτουργικό σύστημα του δικτύου (NOS) είναι υπεύθυνο για την υποστήριξη όλων των λειτουργιών ελέγχου του ελεγκτή. Τα στοιχεία ελέγχου εκτελούν τις παραδοσιακές λειτουργίες και βοηθούν το NOS να χειρίζεται λειτουργίες δικτύου κινητής τηλεφωνίας, όπως η διαχείριση της κινητικότητας, η διαχείριση των πόρων και η μεταφορά της κυκλοφορίας.

3. Επίπεδο εφαρμογών

Το επίπεδο εφαρμογών αποτελείται από όλες τις επιχειρηματικές εφαρμογές και τις εφαρμογές ελέγχου του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Τα παραδοσιακά στοιχεία για το κινητό δίκτυο, όπως το Policy and Charging Rules Function (PCRF), Home Subscriber Server (HSS), Mobility Management Entity (MME), και Authentication, Authorization, and Accounting (AAA) είναι τώρα εφαρμογές λογισμικού που εκτελούνται πάνω από NOS. Η σύνδεση του ελεγκτή δικτύου με το επίπεδο εφαρμογών πραγματοποιείται από το Northbound Application Programming Interface (API).



Σχήμα 6. Επίπεδα αρχιτεκτονικής SDMN [44].

Έτσι, η προσαρμογή του SDN αλλάζει την αρχιτεκτονική δικτύου των σημερινών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, το SDN θα ανοίξει νέες ευκαιρίες σε διάφορα τμήματα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ειδικότερα, θα παρέχει διάφορα οφέλη για τη διαχείριση της κυκλοφορίας, των πόρων και της κινητικότητας, καθώς και θα καταφέρει να επιβάλλει νέες προκλήσεις στην ασφάλεια του δικτύου.

Από κοινού, το SDN θεωρείται "μία νέα ριζοσπαστική ιδέα στη δικτύωση". Έχει προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα για σταθερό και ενσύρματο δίκτυο. Έτσι, το SDN θεωρείται μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που μπορούν να επιλύσουν τους περιορισμούς στα τρέχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το SDN παρέχει τις απαιτούμενες βελτιώσεις στην ευελιξία, την επεκτασιμότητα και τις επιδόσεις για την προσαρμογή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας ώστε να συμβαδίζει με την αναμενόμενη ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, το SDN πιθανόν να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη φάση σχεδιασμού πέραν των δικτύων κινητής τηλεφωνίας LTE. Η βαθιά κατανόηση αυτής της αναδυόμενης έννοιας του SDMN είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των διαφόρων προκλήσεων των μελλοντικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας με δυνατότητα SDN.

3.3 Πλεονεκτήματα χρήσης SDMN

Η αρχιτεκτονική SDMN προσφέρει πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά για την εξέλιξη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας όπως [8, 9-11]:

Logically centralized control: Ένας κεντρικός ελεγκτής μπορεί να λάβει αποφάσεις ελέγχου βάσει της συνολικής προβολής του δικτύου. Οι αποφάσεις αυτές είναι ακριβέστερες και αποτελεσματικότερες από τις υφιστάμενες αυτόνομες αποφάσεις βάσει συστήματος.

Flexibility: Η αρχιτεκτονική SDMN ορίζει ένα κοινό πρότυπο μεταξύ των συσκευών backhaul. Ως εκ τούτου, ο ελεγκτής μπορεί να διαχειριστεί οποιοδήποτε στοιχείο κινητής τηλεφωνίας με δυνατότητα SDN από οποιονδήποτε προμηθευτή, εφόσον υπάρχει μια κοινή πλατφόρμα, όπως το OpenFlow.

Automatic network management: Η αυτόματη διαχείριση δικτύου επιτρέπει την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και λειτουργιών δικτύου σε λίγες ώρες αντί για ημέρες. Επίσης, είναι δυνατός ο δυναμικός προγραμματισμός των ρυθμίσεων της συσκευής ώστε να επιτευχθεί καλύτερη χρήση και ασφάλεια των πόρων και χαμηλότερη συμφόρηση από τις στατικές ρυθμίσεις. Επιπλέον, η αντιμετώπιση προβλημάτων διαμόρφωσης δικτύου είναι πολύ γρήγορη λόγω της συνολικής εικόνας που έχει ο ελεγκτής.

Virtualized abstraction: Η αρχιτεκτονική SDMN αποκρύπτει την πολυπλοκότητα των διαφόρων τεχνολογιών πρόσβασης και τοπολογιών. Η προγραμματισιμότητα του δικτύου SDMN και το προτεινόμενο μοντέλο ροής υποστηρίζουν τον πολυδιάστατο έλεγχο πολιτικής, την ευέλικτη κυκλοφοριακή συγκέντρωση και το διαχωρισμό.

Higher rate of innovation: Η δυνατότητα προγραμματισμού του δικτύου και οι κοινές διεπαφές των προγραμματιστικών εφαρμογών (API) επιταχύνουν την επιχειρηματική καινοτομία στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ο χειριστής έχει την ευελιξία να καινοτομεί γρήγορα και να δοκιμάζει διάφορες καινοφανείς εφαρμογές ελέγχου πάνω από το λειτουργικό σύστημα του δικτύου. Η ανάπτυξη αυτών των πρωτοποριακών εφαρμογών λογισμικού είναι ταχύτερη από την ανάπτυξη των σημερινών εφαρμογών που βασίζονται στο υλικό.

More granular network control: Ο ελεγκτής μπορεί να αλλάξει δυναμικά τις πολιτικές ελέγχου, βάσει της συμπεριφοράς του δικτύου όπως session, user, device, και application levels.

On-demand provision and online scaling up of resources: Οι έννοιες του SDN επιτρέπουν την προσαρμογή της εικονικοποίησης δικτύου. Η εικονικοποίηση των συσκευών δικτύου εξασφαλίζει την παροχή κατ' απαίτηση πόρων όταν απαιτείται και την κλιμάκωση πόρων για την ικανοποίηση της ζήτησης.

Low-cost backhaul devices: Η αρχιτεκτονική SDN αφαιρεί το επίπεδο ελέγχου από συσκευές backhaul, οι οποίες πλέον χρειάζονται μόνο για πολύ βασικές λειτουργίες.

Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα επίπεδα μιας αρχιτεκτονικής δικτύου κινητής τηλεφωνίας και επιτυγχάνουν πολλά γενικά βασικά οφέλη, όπως η μείωση του CAPEX και του OPEX, η εύκολη διαχείριση και λειτουργία, η ταχεία ανάπτυξη της καινοτομίας χωρίς παρεμβολή στα ενδοεπιχειρησιακά δίκτυα και η αποτελεσματική χρήση των πόρων. Αυτά τα οφέλη είναι ειδικά για κάθε επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και περιγράφονται παρακάτω:

3.3.1 Οφέλη στο Radio Access Network

Με την υιοθέτηση του SDN και του virtualization στο τμήμα RAN, κερδίζουμε μερικά οφέλη. Πρώτον, με το network virtualization, οι φυσικοί πόροι του RAN (δηλ. ENoB) μπορούν να αντληθούν και να τεμαχιστούν σε εικονικούς πόρους RAN και να μοιραστούν από πολλούς φορείς, έτσι ώστε οι φορείς εκμετάλλευσης να εξοικονομήσουν σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τους [10]. Μέσω ενός ελεγκτή SDN-RAN, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να προσαρμόσουν τα δικά τους virtual network slices. Δεύτερον, μέσω virtualization και centralization των λειτουργιών RAN, αυτές οι λειτουργίες μπορούν να μοιραστούν με άλλες λειτουργίες συχνοτήτων. Αυτό βελτιώνει τη χρήση των πόρων και τη διακίνησή τους. Τέλος, το radio resource management απλοποιείται χρησιμοποιώντας έναν κεντρικό ελεγκτή για το RAN. Ο ελεγκτής SDN-RAN είναι υπεύθυνος για τον προγραμματισμό και την κατανομή των radio resources, για στοιχεία του radio access. Οι τελευταίοι αλγόριθμοι του radio resource management και συντονισμού παρεμβολών μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν και να αναπτυχθούν στον ελεγκτή SDN-RAN. Ως αποτέλεσμα, ο ελεγκτής SDN-RAN μπορεί να καταναίμει δίκαια τα radio resources και να υπολογίσει έναν χάρτη παρεμβολών, ώστε να καταφέρει να ακυρώσει ή να εκμεταλλευτεί παρεμβολές μεταξύ γειτονικών κυψελών του κυψελωτού δικτύου, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση RAN [10].

3.3.2 Οφέλη στο Mobile Core Network

Σε αυτό το βασικό μέρος, τα κύρια οφέλη προέρχονται από την εικονικοποίηση των λειτουργιών του core network, την προγραμματισιμότητα του CP, τη συγκέντρωση του επιπέδου ελέγχου και την έννοια του εικονικού διαχειριστή δικτύου. Πρώτον, η εικονικοποίηση των βασικών λειτουργιών του δικτύου συμβάλλει στη μείωση του CAPEX και του OPEX, στη στήριξη του multi-tenancy και στη γρήγορη και ταχεία κλιμάκωση των πόρων του core network, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. Δεύτερον, η δυνατότητα προγραμματισμού του core network απλοποιεί τη διαχείρισή του, διευκολύνει τη διαμόρφωση του δικτύου και επιτρέπει νέες καινοτομίες, με ταχύτερο χρόνο στην αγορά [10]. Με τη χρήση ενός κεντρικού ελεγκτή, το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μπορεί να ελέγχει το QoS με λεπτομερή τρόπο, σύμφωνα με τις διάφορες απαιτήσεις των συνδρομητών και των υπηρεσιών. Τέλος, η τμηματοποίηση επιτρέπει στους πολλαπλούς παρόχους εικονικών δικτύων (VNO) να εκτελούνται στην ίδια υποδομή του core network, γεγονός που βελτιστοποιεί το κόστος και τη χρήση των πόρων της συσκευής [10].

3.3.3 Οφέλη στο External Network

Εδώ, τα κύρια οφέλη προέρχονται από την εικονικοποίηση λειτουργιών IMS (IP Multimedia Subsystem) και την εισαγωγή του SFC (*Service Function Chaining*). Πρώτον, η εικονικοποίηση των λειτουργιών IMS σε ένα cloud system επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας να κλιμακώσουν τους πόρους του δικτύου προς τα άνω και προς τα κάτω για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις QoS [10]. Εν τω μεταξύ, αυτό βελτιώνει επίσης τη χρήση των πόρων των συσκευών. Δεύτερον, η υιοθέτηση της έννοιας SDN για τον έλεγχο της κυκλοφορίας μέσω μιας σειράς middle boxes (δηλ. SFC) προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στην παροχή υπηρεσιών από το κινητό δίκτυο στο Internet και αντίστροφα. Η κίνηση από κάθε συνδρομητή διέρχεται μόνο μέσω μιας σειράς middle boxes, όπως ορίζεται για τον συγκεκριμένο συνδρομητή [10].

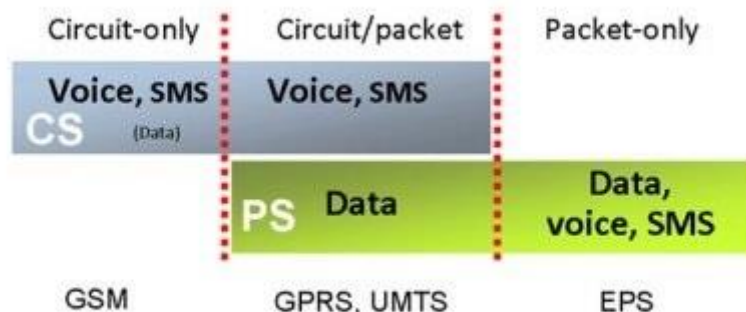
4. Αρχιτεκτονική των Mobile Networks

4.1 Evolved Packet Core

Το EPC είναι η τελευταία εξέλιξη της αρχιτεκτονικής δικτύου πυρήνα. Στο παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών (GSM) η αρχιτεκτονική βασίζεται στην μεταγωγή κυκλωμάτων (circuit-switching). Αυτό σημαίνει ότι τα κυκλώματα είναι εγκατεστημένα μεταξύ του καλούντος και καλουμένου σε ολόκληρο το δίκτυο τηλεπικοινωνίας (κεντρικό δίκτυο της κινητής τηλεφωνίας, σταθερής τηλεφωνίας). Στο GSM, όλες οι υπηρεσίες μεταφέρονται μέσω κυκλωμάτων-διακοπών τηλεφωνίας, αλλά προβάλλονται μόνο σύντομα μηνύματα (SMS) και ορισμένα δεδομένα.

Στο GPRS, η μεταγωγή πακέτων (packet-switching) προστίθεται στην μεταγωγή κυκλωμάτων. Με την τεχνολογία αυτή, τα δεδομένα μεταφέρονται σε πακέτα χωρίς να δημιουργούνται ειδικά κυκλώματα. Αυτό προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα. Στο GPRS, τα κυκλώματα μεταφέρουν φωνή και SMS (στις περισσότερες περιπτώσεις). Ως εκ τούτου, το βασικό δίκτυο αποτελείται από δύο τομείς: το κύκλωμα και το πακέτο. Στο UMTS (3G), αυτή η έννοια διπλού τομέα διατηρείται και στην πλευρά του κεντρικού δικτύου. Ορισμένα στοιχεία του δικτύου έχουν εξελιχθεί αλλά η έννοια παραμένει παρόμοια [13].

Κατά το σχεδιασμό της εξέλιξης του συστήματος 3G, η κοινότητα 3GPP αποφάσισε να χρησιμοποιήσει το πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) ως το βασικό πρωτόκολλο για τη μεταφορά όλων των υπηρεσιών. Συμφωνήθηκε, ότι το EPC δεν θα διέθετε πια τομέα μεταγωγής κυκλωμάτων και ότι θα πρέπει να είναι μια εξέλιξη της αρχιτεκτονικής που θα μεταφέρει πακέτα που χρησιμοποιούνται στο GPRS / UMTS. Η απόφαση αυτή είχε συνέπειες για την ίδια την αρχιτεκτονική αλλά και για τον τρόπο παροχής των υπηρεσιών. Η παραδοσιακή χρήση κυκλωμάτων για τη μεταφορά φωνητικών μηνυμάτων και σύντομων μηνυμάτων πρέπει να αντικατασταθεί μακροπρόθεσμα από λύσεις που βασίζονται στην τεχνολογία IP.

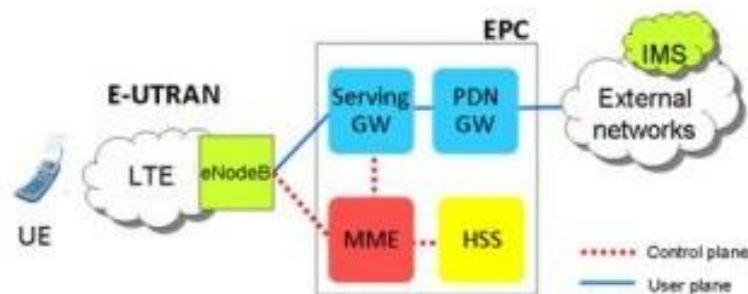


Σχήμα 7. Εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων [13].

4.2 Αρχιτεκτονική του EPC

Το EPC εισήχθη για πρώτη φορά από το 3GPP στην έκδοση 8 του προτύπου. Αποφασίστηκε να έχει μια "επίπεδη αρχιτεκτονική". Η ιδέα είναι να χειριστεί αποτελεσματικά το ωφέλιμο φορτίο (την κυκλοφορία δεδομένων) από πλευράς απόδοσης και κόστους. Λίγοι κόμβοι δικτύου συμμετέχουν στον χειρισμό της κίνησης και η μετατροπή πρωτοκόλλου (protocol conversion) αποφεύγεται[13].

Το Σχήμα 8 δείχνει μια πολύ βασική αρχιτεκτονική του EPS όταν ο Εξοπλισμός Χρήστη (UE) είναι συνδεδεμένος με το EPC μέσω του E-UTRAN (δίκτυο πρόσβασης LTE). Το Evolved NodeB (eNodeB) είναι ο σταθμός βάσης για το LTE. Σε αυτό το σχήμα, το EPC αποτελείται από τέσσερα στοιχεία δικτύου: την πύλη εξυπηρέτησης Serving GW, την πύλη PDN (PDN GW), το MME και το HSS. Το EPC συνδέεται με τα εξωτερικά δίκτυα, τα οποία μπορούν να περιλαμβάνουν το IP Multimedia Core Network Subsystem (IMS).



Σχήμα 8. Βασική αρχιτεκτονική του EPS [13].

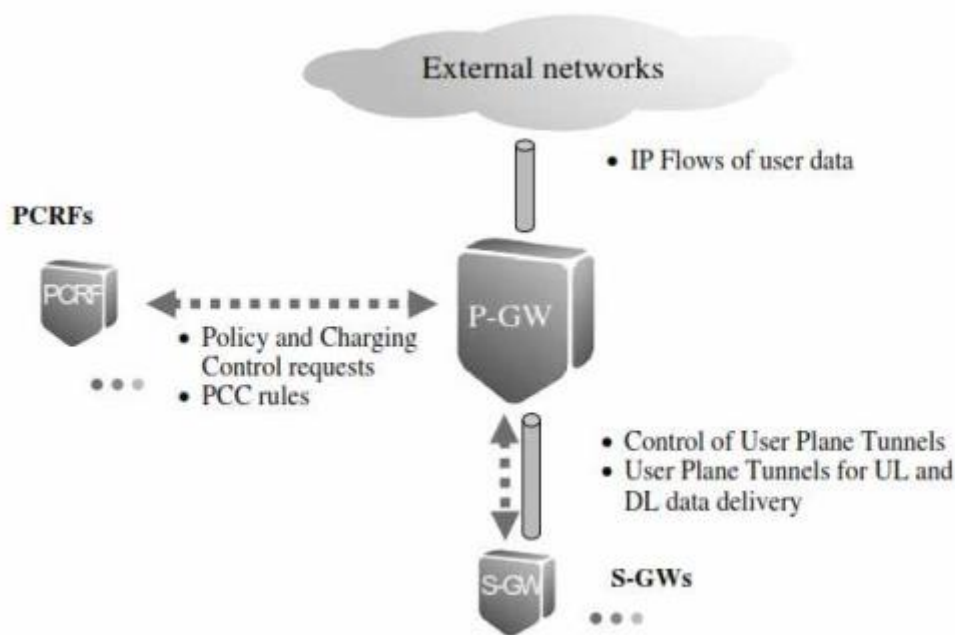
4.2.1 HSS

Βασικά, το HSS (για το Home Subscriber Server) είναι μια βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες σχετικές με το χρήστη και τους συνδρομητές. Παρέχει επίσης λειτουργίες υποστήριξης στη διαχείριση της κινητικότητας, τη ρύθμιση κλήσεων και συνεδριών, τον έλεγχο ταυτότητας χρήστη και την εξουσιοδότηση πρόσβασης. Το HSS αποθηκεύει το πρωτότυπο προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιέχει τις πληροφορίες για τις υπηρεσίες που είναι κατάλληλες για τον χρήστη, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών για τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις. Επιπλέον, ελέγχει εάν η περιαγωγή σε ένα συγκεκριμένο επισκεπτόμενο δίκτυο επιτρέπεται ή όχι. Το μόνιμο κλειδί που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την αυθεντικότητα του φορέα που αποστέλλεται σε ένα επισκεπτόμενο δίκτυο για την επικύρωση του χρήστη και την παραγωγή των επόμενων κλειδιών για την κρυπτογράφηση και την προστασία, είναι αποθηκευμένα στο Authentication Center (AuC) το οποίο είναι χαρακτηριστικό μέρος του HSS. Σε όλη τη σχετική σηματοδότηση με αυτές τις λειτουργίες το HSS αλληλεπιδρά με το MME [14].

4.2.2 Serving GW

Οι πύλες (Serving GW και PDN GW) ασχολούνται με το επίπεδο χρήστη. Μεταφέρουν την κίνηση δεδομένων IP μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και των εξωτερικών δικτύων. Το Serving GW είναι το σημείο διασύνδεσης μεταξύ του radio-side και του EPC. Όπως υποδηλώνει το όνομά της, αυτή η πύλη εξυπηρετεί την UE δρομολογώντας τα εισερχόμενα και εξερχόμενα πακέτα IP. Εξυπηρετεί επίσης ως συντονιστής κινητικότητας για την αλληλεπίδραση με άλλες 3GPP τεχνολογίες όπως GPRS και το UMTS. Συνδέεται λογικά με την άλλη πύλη, το PDN GW.

4.2.3 PDN GW

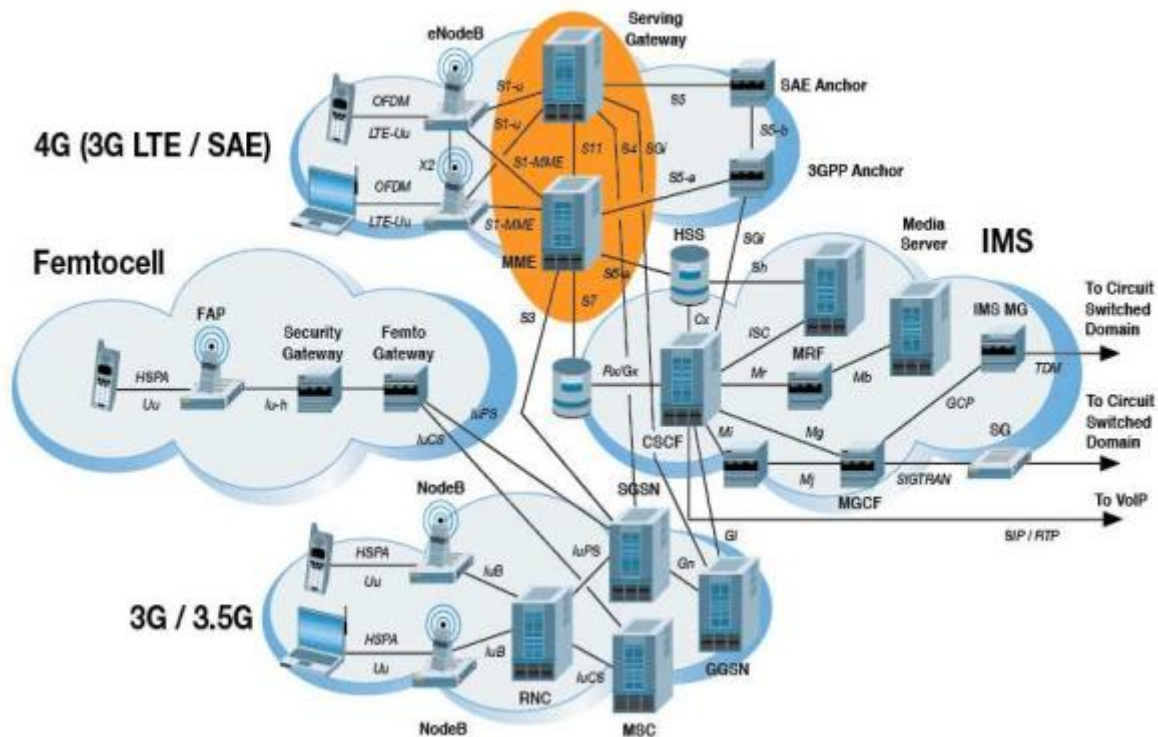


Σχήμα 9. Συνδέσεις του P-GW με άλλους λογικούς κόμβους και οι βασικές λειτουργίες [14].

Το PDN GW είναι το σημείο διασύνδεσης μεταξύ του EPC και των εξωτερικών δικτύων IP. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται PDN (Packet Data Network), εξ' ου και το όνομα. Είναι ο συντονιστής της κινητικότητας του πιο υψηλού επιπέδου στο σύστημα και συνήθως ενεργεί ως σημείο IP της σύνδεσης για το UE. Εκτελεί έλεγχο κίνησης και λειτουργίες φιλτραρίσματος όπως απαιτείται από την εν λόγω υπηρεσία. Ομοίως στη S-GW το P-GW διατηρείται στις εγκαταστάσεις των παρόχων σε μια κεντρική τοποθεσία. Τυπικά το P-GW διαθέτει τη IP διεύθυνση στο UE και το UE χρησιμοποιεί αυτό για να επικοινωνήσει με τους άλλους IP hosts στα εξωτερικά δίκτυα πχ το διαδίκτυο. Το PDN GW δρομολογεί τα πακέτα προς και από τα PDN [14].

4.2.4 MME

Το MME (Mobility Management Entity) ασχολείται με το επίπεδο ελέγχου. Διαχειρίζεται τη σηματοδότηση που σχετίζεται με την κινητικότητα και την ασφάλεια για την πρόσβαση στο E-UTRAN. Το MME είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση και την τηλεϊδοποίηση του UE σε κατάσταση αναμονής. Το MME είναι το σημείο τερματισμού στο δίκτυο για την προστασία του λογαριασμού/ακεραιότητας για σηματοδότηση NAS και χειρίζεται τη βασική διαχείριση ασφάλειας. Η νόμιμη παρεμβολή της σηματοδότησης υποστηρίζεται επίσης από το MME. Είναι το σημείο τερματισμού του Non-Access Stratum (NAS) [14].



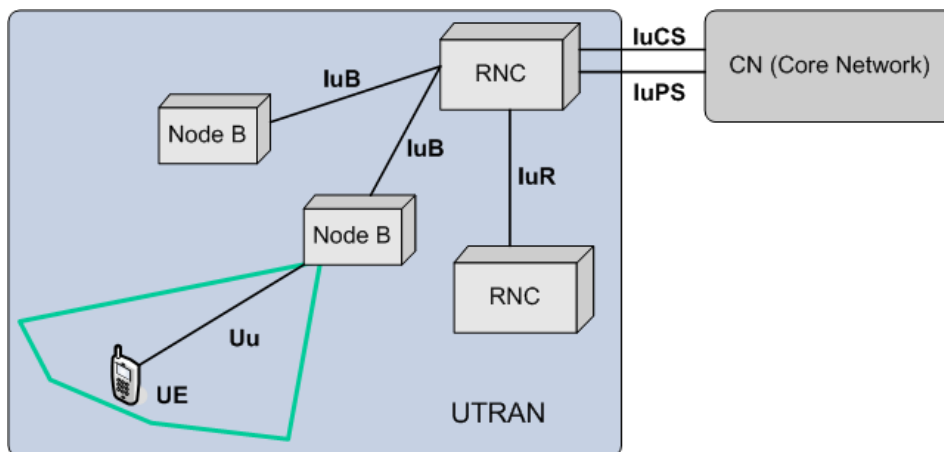
Σχήμα 10. MME και Serving Gateway [14].

4.3 UTRAN Universal Terrestrial Radio Access Network

Το UTRAN είναι ένας συλλογικός όρος για το δίκτυο και τον εξοπλισμό που συνδέει τα κινητά τηλέφωνα με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο ή το διαδίκτυο. Περιέχει τους σταθμούς βάσης-κόμβους, οι οποίοι ονομάζονται Node B's και τους Radio Network Controllers (RNCs) [15] που αποτελούν το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης UMTS [16]. Αυτό το δίκτυο επικοινωνιών, γνωστό και ως 3G (3rd Generation Wireless Mobile Communication Technology), μπορεί να μεταφέρει πολλούς τύπους κυκλοφορίας από Circuit Switched σε IP βασισμένο σε Packet Switched, σε πραγματικό χρόνο. Το UTRAN επιτρέπει τη διασύνδεση μεταξύ του UE (εξοπλισμού χρήστη) και του κεντρικού δικτύου.

Ο RNC παρέχει λειτουργίες ελέγχου για έναν ή περισσότερους Node Bs. Ένα Node B και ένα RNC μπορεί να είναι η ίδια συσκευή, αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων υπάρχει ένα κεντρικό RNC που εξυπηρετεί πολλαπλούς Node Bs. Παρά το γεγονός ότι δεν χρειάζεται να διαχωριστούν φυσικά, υπάρχει μια λογική διεπαφή μεταξύ τους γνωστή ως IuB. Ο RNC και ο αντίστοιχος Node B αποκαλούνται Radio Network Subsystem (RNS). Μπορεί να υπάρχουν και περισσότερα από ένα RNS σε ένα UTRAN.

Υπάρχουν τέσσερις διεπαφές που συνδέουν το UTRAN εσωτερικά ή εξωτερικά με άλλες λειτουργικές οντότητες: Iu, Uu, IuB και IuR [17]. Η διασύνδεση Iu είναι μια εξωτερική διεπαφή που συνδέει τον RNC με το κεντρικό δίκτυο (CN). Ο Uu είναι επίσης εξωτερικός, συνδέοντας τον Node B με τον Εξοπλισμό Χρήστη (UE). Το IuB είναι μια εσωτερική διεπαφή που συνδέει τον RNC με τον Node B. Και τέλος υπάρχει η διεπαφή IuR που είναι μια εσωτερική διασύνδεση τις περισσότερες φορές, αλλά μπορεί, κατ'εξαιρέση, να είναι και μια εξωτερική διεπαφή για κάποιες αρχιτεκτονικές δικτύου. Η IuR συνδέει δύο RNC μεταξύ τους.



Σχήμα 11. Αρχιτεκτονική του UTRAN [45].

4.4 Evolved Packet System

Το Evolved Packet System (EPS) είναι μια εξέλιξη της κοινότητας 3GPP του συστήματος GPRS που χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα βελτιστοποίησης πακέτων με υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και χαμηλότερη καθυστέρηση, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές τεχνολογίες επικοινωνίας (RAT). Το EPS περιλαμβάνει το EPC μαζί με την Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) και το Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) [18].

User → Radio N/W → Core N/W → IP N/W

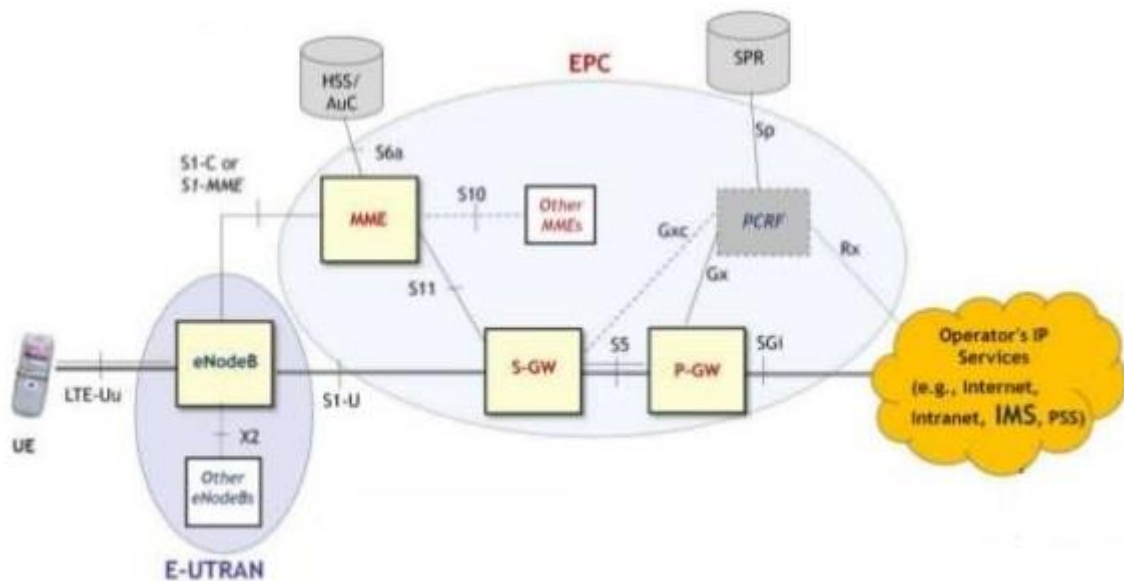
(UE, e-nodeB)

(E-UTRAN)

(EPC)

(IMS)

Σχήμα 12. Η ροή του EPS [46].



Σχήμα 13. Η αρχιτεκτονική του EPS [46]

UE: Αναφέρεται στην συσκευή που ελέγχεται από τον χρήστη όπως π.χ. το κινητό, tablet, κλπ.
eNodeBs: Αποτελούν τις κεραιές στα GSM δίκτυα. Μέσω του X2 επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ άλλων eNodeBs.

MME: Παρακολουθεί την τρέχουσα κατάσταση του χρήστη εάν είναι ενεργοποιημένη ή απενεργοποιημένη. Επικοινωνεί με την HSS για την κρυπτογράφηση δεδομένων και τον έλεγχο των κλειδιών ασφαλείας. Ο χρήστης μπορεί να εγγραφεί με μία MME τη φορά. Οι πρωταρχικές ευθύνες περιλαμβάνουν το EMM (τοποθεσία & κατάσταση χρήστη) και ESM (δημιουργία συνεδρίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο).

HSS : Παρόμοιο με την HLR. Περιέχει όλα τα κρυπτογραφημένα δεδομένα που σχετίζονται με τον χρήστη. Λειτουργεί ως κόμβος αποθήκευσης πληροφοριών βάσης δεδομένων.

S-GW: Ένα UE μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα S-GW. Το MME λέει σε ποιον πρέπει να συνδεθεί το PGW. Χειρίζεται τα IP πακέτα του χρήστη και το P-GW.

PDN-SW: Γνωστή ως PCEF, επίσης συνδεδεμένη με το PCRF, OCS (διακομιστής χρέωσης). Ελέγχει το επίπεδο του QoS και υπαγορεύει τις υπηρεσίες του με «δικτατορικό» τρόπο.

GPRS

- **MS (Mobile station)**
- **nodeB**
- **RNC**
- **SGSN**
- **GGSN**
- **HLR**

EPS

- **UE**
- **E-nodeB**
- **E-nodeB**
- **S-GW & MME**
- **P-GW**
- **HSS**

Σχήμα 14. Η εξέλιξη από GPRS σε EPS [46].

4.5 Cloud/Centralized Radio Access Network (C-RAN)

Οι δυνατότητες του κινητού δικτύου εξελίσσονται γρήγορα, συνεχώς ωθούμενες από νέες απαιτήσεις σχετικά με την καθυστέρηση, τον όγκο κίνησης, τα ποσοστά δεδομένων και την ανάγκη για αξιόπιστη συνδεσιμότητα [19]. Για την ικανοποίηση των μελλοντικών απαιτήσεων, η αρχιτεκτονική LTE RAN θα πρέπει να υποστηρίξει τη βελτιωμένη συγκέντρωση πόρων, την ικανότητα κλιμάκωσης, και τη φασματική απόδοση σε διάφορες διαμορφώσεις δικτύου μεταφοράς. Η αρχιτεκτονική C-RAN θα υποστηρίξει αυτές τις ανάγκες, αξιοποιώντας τις τεχνικές του Virtualization και τις δυνατότητες επεξεργασίας των κέντρων δεδομένων, καθώς και τον βελτιωμένο συντονισμό συχνοτήτων για κατανεμημένες και κεντρικές εφαρμογές του RAN.

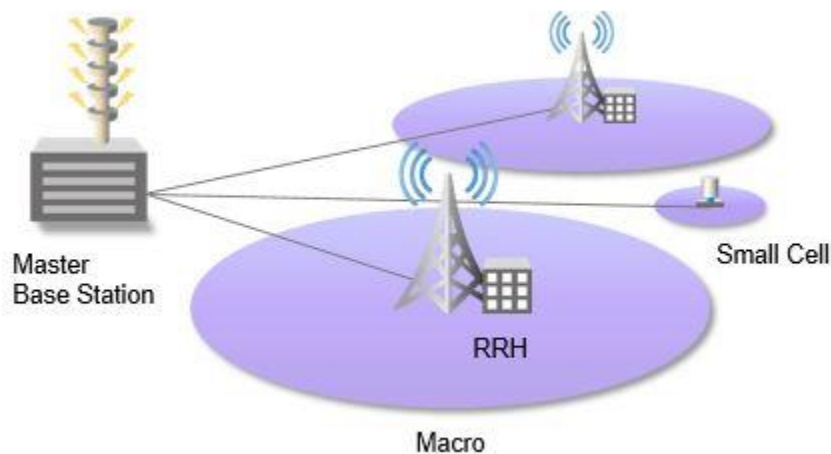
Δεδομένου ότι ο όγκος της κίνησης δεδομένων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας συνεχίζει να αυξάνεται, οι φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων πληρούν τις απαιτήσεις και υιοθετούν τις αρχιτεκτονικές Cloud / Centralized Radio Access Network (C-RAN). Αυτή η νέα προσέγγιση στην αρχιτεκτονική δικτύου έχει δύο σαφή πλεονεκτήματα:

- Μειωμένο CAPEX / OPEX για τους φορείς εκμετάλλευσης.
- Βελτιωμένη εμπειρία χρήστη μέσω λιγότερων παρεμβολών.

4.5.1 Η λύση του C-RAN

Περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις χρηστών του δικτύου, όπως σταθμοί μεταφοράς ή μεγάλα εμπορικά συγκροτήματα, δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στους σταθμούς βάσης (Base Transceiver Station BTS) που τους εξυπηρετούν [20]. Η απλή προσθήκη περισσότερων σταθμών βάσης αυξάνει το κόστος και μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολές σήματος εάν τα eNBs στους σταθμούς βάσης δεν συντονιστούν προσεκτικά.

Ο διαχωρισμός του σταθμού βάσης σε δύο μέρη, τη Baseband Unit (BBU) και το Remote Radio Head (RRH) επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να διατηρούν ή να αυξάνουν τον αριθμό των σημείων πρόσβασης δικτύου (RRH), ενώ συγκεντρώνει τις λειτουργίες επεξεργασίας βάσης σε ένα "κύριο σταθμό βάσης" (βλ. εικόνα παρακάτω). Η χρήση ενός κύριου σταθμού βάσης C-RAN απλοποιεί το radio resource management σε πολύπλοκα περιβάλλοντα λειτουργίας όπως το HetNet ή το Carrier Aggregation. Αυτοί οι κύριοι σταθμοί βάσης και η δημιουργία τους αναφέρονται επίσης ως BBU pooling, ή ξενοδοχεία σταθμού βάσης.



Σχήμα 15. C-RAN Αρχιτεκτονική [20].

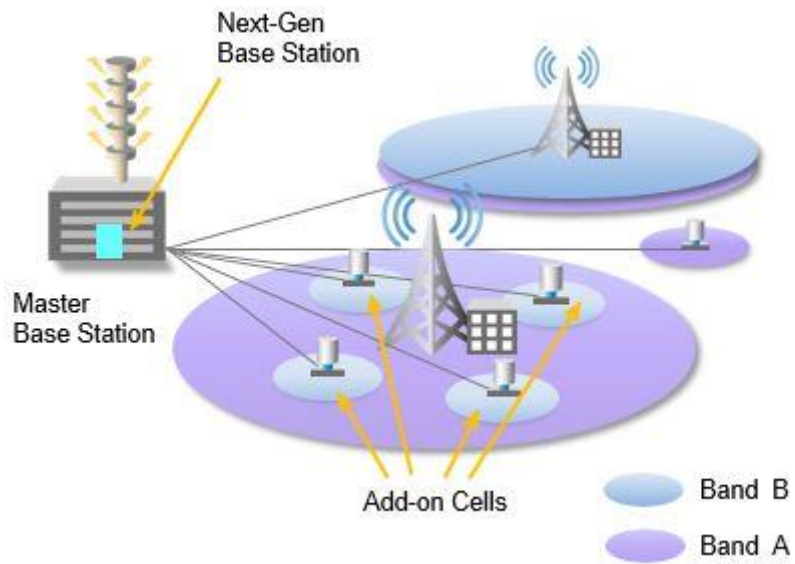
4.5.2 Επίδραση στο κόστος με τη χρήση C-RAN

Κάθε BTS απαιτεί μεγάλη επένδυση πριν την εγκατάσταση και συνεπάγεται επίσης με υψηλό λειτουργικό κόστος. Το κόστος μίσθωσης ενός χώρου, παροχής ψύξης, παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και μιας εφεδρικής μπαταρίας κ.λπ. πολλαπλασιάζεται με κάθε μεμονωμένο BTS. Παρόλο που τα έξοδα αυτά είναι δεδομένα, κατά τη διάρκεια των μη αιχμών τα eNBs σε αυτούς τους σταθμούς βάσης είναι συχνά αδρανή ή λειτουργούν σε ένα κλάσμα της χωρητικότητάς τους. Επιπλέον, το OPEX ανεβάζει το κόστος εξυπηρέτησης και συντήρησης για κάθε BTS[20].

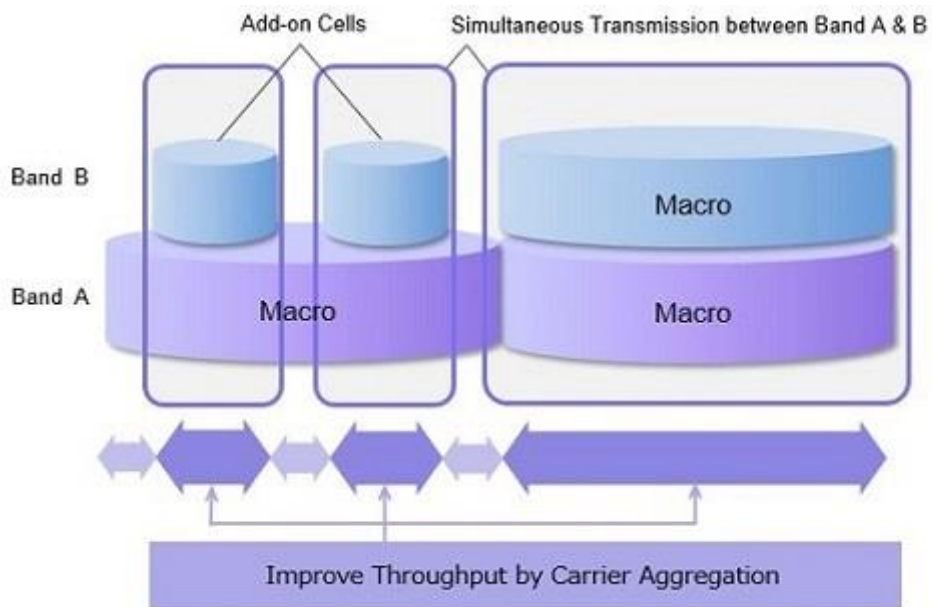
Η συγκέντρωση BBU (BBU pooling) σημαίνει ότι το κόστος που σχετίζεται με κάθε τοποθεσία του BTS μπορεί επίσης να «συγκεντρωθεί» σε έναν ενιαίο χώρο, προσφέροντας σημαντική μείωση τόσο στο CAPEX όσο και στο OPEX. Ο συντονισμός των λειτουργιών επεξεργασίας ζώνης βάσης στον κύριο σταθμό βάσης C-RAN εξαλείφει τη σπατάλη των πόρων των υπολειτουργικών BTS, παρέχοντας ένα "όφελος συγκέντρωσης" σε σύγκριση με μια διασκορπισμένη αρχιτεκτονική BTS.

4.5.3 Μειωμένες παρεμβολές στο δίκτυο και Advanced C-RAN

Η κεντρική επεξεργασία της βάσης ζώνης και ο έλεγχος των radio resources σε έναν μοναδικό σταθμό βάσης καθιστά την εφαρμογή νέων τεχνολογιών, όπως τα small cells και Carrier Aggregation, πολύ πιο απλή. Καθώς περισσότερες συχνότητες μεταδίδονται στον ίδιο γεωγραφικό χώρο, η συντονισμένη διαχείριση των επικαλυπτόμενων μικρών κυψελών και μακροκυψελών καθίσταται απαραίτητη. Η αρχιτεκτονική C-RAN διαχειρίζεται ευέλικτα ποικίλα σενάρια κάλυψης όπως αυτά που παρουσιάζονται στα διαγράμματα αρχιτεκτονικής C-RAN και Advanced C-RAN (C-RAN με CA) [20].



Σχήμα 16. Advanced C-RAN αρχιτεκτονική [20].



Σχήμα 17. Carrier Aggregation (2CC) [20].

5. Αρχιτεκτονική του SDN

5.1 SDN διακόπτες

Στο συμβατικό μοντέλο δικτύωσης, η υποδομή δικτύου θεωρείται το πλέον αναπόσπαστο τμήμα του δικτύου. Κάθε συσκευή δικτύου συγκεντρώνει όλες τις λειτουργίες που θα χρησιμοποιούσε για τη λειτουργία του δικτύου. Για παράδειγμα, ένας δρομολογητής πρέπει να παρέχει το κατάλληλο υλικό όπως μια τριπλή διευθυνσιοδοτούμενη μνήμη (TCAM) για γρήγορη προώθηση των πακέτων, καθώς και ένα εξελιγμένο λογισμικό για την εκτέλεση διανεμημένων δρομολογητικών πρωτοκόλλων όπως το BGP. Ομοίως, ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης πρέπει να διαθέτει το κατάλληλο υλικό για ασύρματη συνδεσιμότητα καθώς και λογισμικό για τη διαβίβαση πακέτων, την επιβολή ελέγχου πρόσβασης κ.λπ. Ωστόσο, η αλλαγή της συμπεριφοράς των συσκευών δικτύου δεν είναι καθόλου τετριμμένη λόγω του κλειστού χαρακτήρα τους.

Η αρχιτεκτονική SDN με την αποσύνδεση του ελέγχου από τις λειτουργίες προώθησης, απλοποιεί τη διαχείριση των συσκευών δικτύου. Όπως ήδη αναφέρθηκε, όλες οι συσκευές προώθησης διατηρούν το υλικό που είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση των πινάκων προώθησης (π.χ. ολοκληρωμένα κυκλώματα ειδικής εφαρμογής (ASICs) με ένα TCAM) αλλά απογυμνώνεται από τη λογική τους. Ο ελεγκτής υπαγορεύει στους διακόπτες τον τρόπο προώθησης των πακέτων εγκαθιστώντας νέους κανόνες προώθησης μέσω μιας αφηρημένης διεπαφής. Κάθε φορά που ένα πακέτο φτάνει σε έναν διακόπτη, συμβουλευείται τον πίνακα προώθησης του και το πακέτο διαβιβάζεται αναλόγως.

Παρόλο που στην προηγούμενη επισκόπηση του SDN παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική των τριών στρωμάτων, παραμένει ασαφές ποια θα πρέπει να είναι τα όρια μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων. Για παράδειγμα, η διαχείριση ενεργών σειρών αναμονής (AQM) και η διαμόρφωση προγραμματισμού είναι λειτουργίες που εξακολουθούν να θεωρούνται μέρος του επιπέδου δεδομένων ακόμη και στην περίπτωση των διακοπών SDN. Ωστόσο, δεν υπάρχει εγγενές πρόβλημα που να εμποδίζει αυτές τις λειτουργίες να γίνουν μέρος του επιπέδου ελέγχου εισάγοντας κάποιο είδος αφαίρεσης, επιτρέποντας τον έλεγχο της συμπεριφοράς χαμηλού επιπέδου στις συσκευές μεταγωγής. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να αποδειχθεί επωφελής, διότι θα απλουστεύσει την ανάπτυξη νέων αποδοτικότερων συστημάτων για τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου διακοπών [21].

Ένα άλλο ζήτημα των διακοπών του SDN είναι ότι οι κανόνες προώθησης που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση του SDN είναι περισσότερο πολύπλοκοι από αυτούς των συμβατικών δικτύων, χρησιμοποιώντας χαρακτήρες μπαλαντέρ για τη διαβίβαση πακέτων, λαμβάνοντας υπόψη πολλά πεδία του πακέτου όπως διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού, θύρες, εφαρμογές κ.λπ. Ως αποτέλεσμα αυτού, το υλικό μεταγωγής δεν μπορεί εύκολα να αντιμετωπίσει τη διαχείριση των πακέτων και των ροών. Προκειμένου η λειτουργία προώθησης να είναι γρήγορη, απαιτείται το ASIC να χρησιμοποιεί το TCAM. Δυστυχώς, ένα τέτοιο εξειδικευμένο υλικό είναι ακριβό και καταναλώνει ενέργεια, και ως εκ τούτου, μπορεί να υποστηρίζεται μόνο ένας περιορισμένος αριθμός

καταχωρήσεων προώθησης για συστήματα προώθησης βάσει ροής σε κάθε διακόπτη, γεγονός που παρεμποδίζει την επεκτασιμότητα του δικτύου.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται οι διακόπτες SDN, πρέπει να καταστεί σαφές ότι για να αποκτήσει δημοτικότητα το νέο πρότυπο, η «συμβατότητα προς τα πίσω» είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας. Ενώ υπάρχουν απλοί διακόπτες SDN που δεν διαθέτουν ολοκληρωμένο έλεγχο, υπάρχει και η υβριδική προσέγγιση (δηλαδή η υποστήριξη του SDN μαζί με την παραδοσιακή λειτουργία και τα πρωτόκολλα) που θα είναι πιθανώς πιο επιτυχημένη σε αυτά τα πρώτα βήματα της SDN [22]. Ο λόγος είναι ότι ενώ τα χαρακτηριστικά του SDN παρουσιάζουν μια συναρπαστική λύση για πολλά ρεαλιστικά σενάρια, η υποδομή στα περισσότερα δίκτυα επιχειρήσεων εξακολουθεί να ακολουθεί τη συμβατική προσέγγιση. Επομένως, μια μορφή ενδιάμεσου υβριδικού δικτύου θα διευκόλυνε πιθανώς τη μετάβαση στο SDN.

5.2 SDN ελεγκτής

Όπως αναφέρθηκε ήδη, μία από τις βασικές ιδέες της φιλοσοφίας SDN είναι η ύπαρξη ενός λειτουργικού συστήματος δικτύου που τοποθετείται μεταξύ της υποδομής δικτύου και του επιπέδου εφαρμογών. Αυτό το λειτουργικό σύστημα δικτύου είναι υπεύθυνο για το συντονισμό και τη διαχείριση των πόρων του συνόλου του δικτύου και για την αποκάλυψη μιας αφηρημένης ενιαίας προβολής όλων των στοιχείων στις εφαρμογές που εκτελούνται πάνω από αυτό. Αυτή η ιδέα είναι ανάλογη με αυτή που ακολουθείται σε ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπου το λειτουργικό σύστημα βρίσκεται μεταξύ του υλικού και του χρήστη και είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των πόρων υλικού και την παροχή κοινών υπηρεσιών για προγράμματα χρηστών. Παρομοίως, οι διαχειριστές δικτύων και οι προγραμματιστές παρουσιάζονται τώρα σε ένα περιβάλλον στο οποίο είναι ευκολότερο να προγραμματίζουν και να ρυθμίζουν όπως ένας τυπικός προγραμματιστής του προγράμματος ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Ο λογικά κεντρικός έλεγχος και η γενικευμένη αφαίρεση δικτύου καθιστούν το μοντέλο SDN εφαρμόσιμο σε ευρύτερο φάσμα εφαρμογών και σε ετερογενείς τεχνολογίες δικτύου σε σύγκριση με το συμβατικό μοντέλο δικτύωσης. Για παράδειγμα, ένα ετερογενές περιβάλλον που αποτελείται από ένα σταθερό και ένα ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό σχετικών συσκευών δικτύου (δρομολογητές, διακόπτες, ασύρματα σημεία πρόσβασης, μεσαίες θυρίδες κ.λπ.). Στο παραδοσιακό παράδειγμα δικτύωσης, κάθε συσκευή δικτύου θα απαιτούσε μεμονωμένες ρυθμίσεις χαμηλού επιπέδου από το διαχειριστή του δικτύου, προκειμένου να λειτουργήσει σωστά. Επιπλέον, δεδομένου ότι κάθε συσκευή στοχεύει σε διαφορετική τεχνολογία δικτύωσης, θα έχει τις δικές της ειδικές απαιτήσεις διαχείρισης και διαμόρφωσης, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται πρόσθετη προσπάθεια από τον διαχειριστή για να λειτουργήσει το σύνολο του δικτύου όπως προβλέπεται. Από την άλλη πλευρά, με τον λογικά κεντρικό έλεγχο του SDN, ο διαχειριστής δεν θα πρέπει να ανησυχεί για λεπτομέρειες χαμηλού επιπέδου. Αντ' αυτού, η διαχείριση του δικτύου θα εκτελεστεί με τον καθορισμό μιας κατάλληλης πολιτικής υψηλού επιπέδου, αφήνοντας το λειτουργικό σύστημα δικτύου υπεύθυνο για την επικοινωνία και τη ρύθμιση της λειτουργίας των συσκευών δικτύου.

5.2.1 Ο κεντρικός έλεγχος του SDN

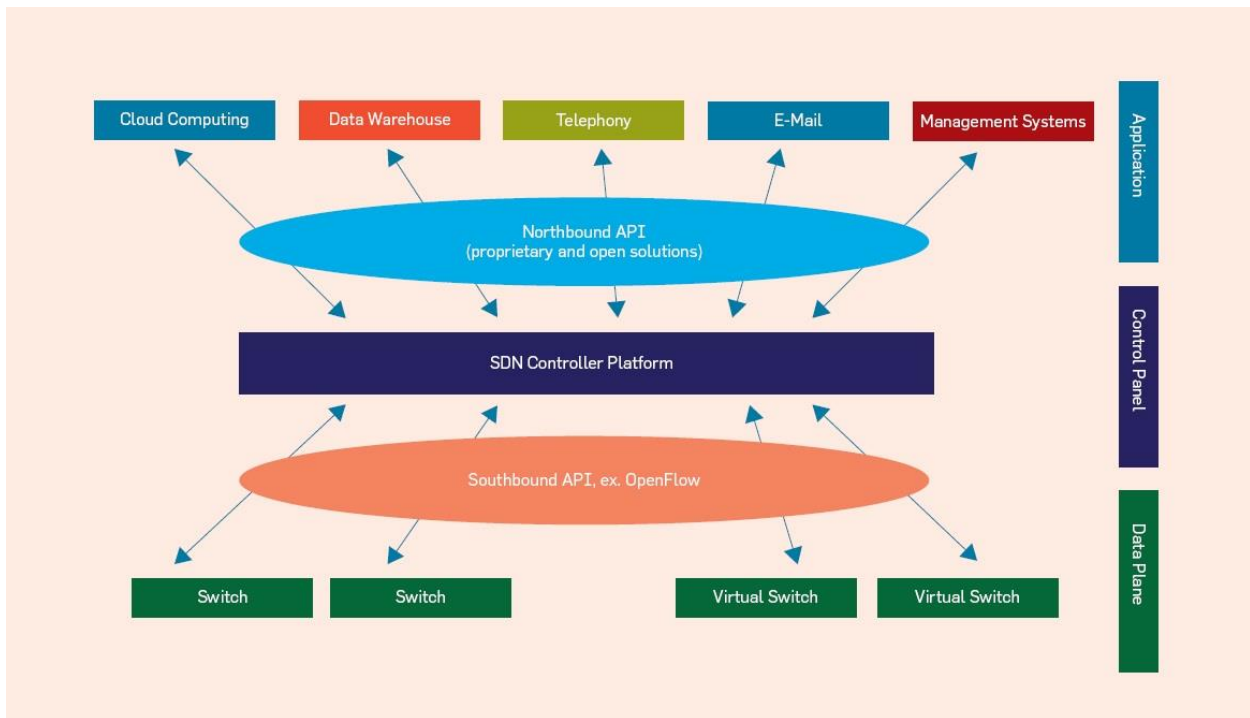
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αρχιτεκτονική SDN διευκρινίζει ότι η δικτυακή υποδομή ελέγχεται λογικά από μια κεντρική οντότητα υπεύθυνη για τη διαχείριση και την εφαρμογή των πολιτικών. Ωστόσο, θα πρέπει να καταστεί σαφές ότι ο λογικά κεντρικός έλεγχος δεν συνεπάγεται κατ'ανάγκη τη φυσική συγκέντρωση.

Έχουν υπάρξει διάφορες προτάσεις για φυσικώς κεντρικούς ελεγκτές, όπως NOX [23] και Maestro [24]. Ένας σχεδιασμός φυσικού κεντρικού ελέγχου απλοποιεί την εφαρμογή του ελεγκτή. Όλοι οι διακόπτες ελέγχονται από την ίδια φυσική οντότητα, πράγμα που σημαίνει ότι το δίκτυο δεν υπόκειται σε θέματα που σχετίζονται με τη συνοχή, με όλες τις εφαρμογές να βλέπουν την ίδια κατάσταση δικτύου (που προέρχεται από τον ίδιο ελεγκτή). Παρά τα πλεονεκτήματά της, αυτή η προσέγγιση πάσχει από την ίδια αδυναμία που έχουν όλα τα κεντρικά συστήματα, δηλαδή ο ελεγκτής λειτουργεί ως ενιαίο σημείο αποτυχίας για ολόκληρο το δίκτυο. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό είναι η σύνδεση πολλαπλών ελεγκτών σε ένα διακόπτη, επιτρέποντας σε έναν εφεδρικό ελεγκτή να αναλάβει σε περίπτωση βλάβης. Σε αυτή την περίπτωση, όλοι οι ελεγκτές πρέπει να έχουν μια συνεπή εικόνα του δικτύου, διαφορετικά οι εφαρμογές ενδέχεται να μην λειτουργούν σωστά. Επιπλέον, η κεντρική προσέγγιση μπορεί να αυξήσει τις ανησυχίες της επεκτασιμότητας, δεδομένου ότι όλες οι συσκευές δικτύου πρέπει να διαχειρίζονται από την ίδια οντότητα.

Μια προσέγγιση που γενικεύει περαιτέρω την ιδέα της χρήσης πολλαπλών ελεγκτών μέσω του δικτύου είναι η διατήρηση ενός λογικά κεντρικού αλλά φυσικά αποκεντρωμένου επιπέδου ελέγχου. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε ελεγκτής είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση μόνο ενός μέρους του δικτύου, αλλά όλοι οι ελεγκτές επικοινωνούν και διατηρούν κοινή προβολή δικτύου. Επομένως, οι εφαρμογές βλέπουν τον ελεγκτή ως μία ενιαία οντότητα, ενώ στην πραγματικότητα οι λειτουργίες ελέγχου εκτελούνται από ένα καταναμημένο σύστημα. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης, εκτός από το γεγονός ότι δεν υπάρχει πλέον κανένα σημείο αποτυχίας, είναι η αύξηση της απόδοσης και της κλιμάκωσης, δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος του δικτύου πρέπει να διαχειρίζεται κάθε μεμονωμένο στοιχείο ελέγχου. Ένα δυνητικό μειονέκτημα του αποκεντρωμένου ελέγχου συνδέεται και πάλι με τη συνεκτικότητα της κατάστασης δικτύου μεταξύ των στοιχείων του ελεγκτή. Μια τελική ανησυχία που τίθεται στην περίπτωση των φυσικώς καταναμημένων ελεγκτών του SDN σχετίζεται με τη συνέπεια της κατάστασης δικτύου που διατηρείται σε κάθε ελεγκτή κατά την εκτέλεση των ενημερώσεων πολιτικής εξαιτίας ζητημάτων ταυτοχρονισμού που μπορεί να προκύψουν από τον επιρρεπή σε σφάλματα καταναμημένο χαρακτήρα του λογικού ελεγκτή.

5.3 SDN: Διεπαφές προγραμματισμού

Όπως έχει αναφερθεί, η επικοινωνία του ελεγκτή με τα άλλα στρώματα επιτυγχάνεται μέσω ενός API southbound για τις αλληλεπιδράσεις ελεγκτή-διακόπτη και μέσω ενός API northbound για τις αλληλεπιδράσεις ελεγκτή-εφαρμογής.



Σχήμα 18. Διεπαφές προγραμματισμού στην αρχιτεκτονική SDN [47].

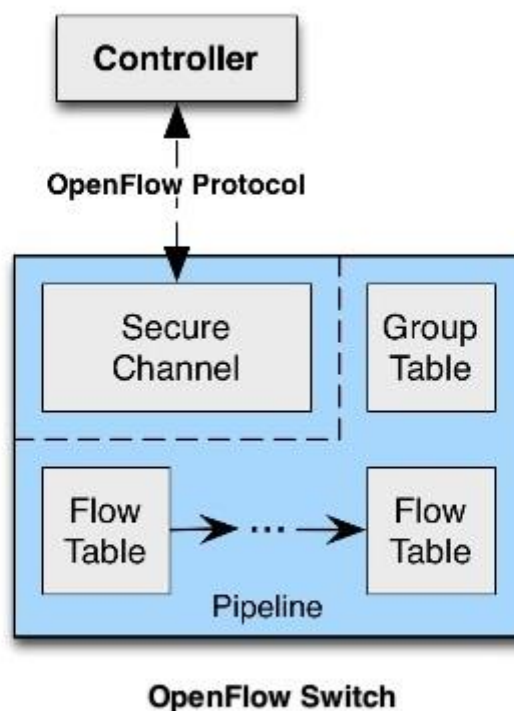
5.3.1 Southbound Επικοινωνία

Η southbound επικοινωνία είναι πολύ σημαντική για τον χειρισμό της συμπεριφοράς των διακοπών του SDN από τον ελεγκτή. Είναι ο τρόπος με τον οποίο το SDN επιχειρεί να "προγραμματίσει" το δίκτυο. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τυποποιημένου API southbound είναι το OpenFlow [25]. Τα περισσότερα έργα που σχετίζονται με το SDN υποθέτουν ότι η επικοινωνία του ελεγκτή με τους διακόπτες είναι βασισμένη στο OpenFlow και επομένως είναι σημαντικό να γίνει μια λεπτομερής παρουσίαση της προσέγγισης OpenFlow. Ωστόσο, θα πρέπει να καταστεί σαφές ότι το OpenFlow είναι ένα μόνο (το πιο δημοφιλές) από πολλές πιθανές εφαρμογές αλληλεπιδράσεων ελεγκτή-διακόπτη. Υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως το DevonFlow [26], που προσπαθούν να επιλύσουν προβλήματα επιδόσεων που αντιμετωπίζει το OpenFlow.

5.3.2 Επισκόπηση του OpenFlow

Πρόκειται για ένα πρότυπο πολλαπλών προδιαγραφών που ορίζει το Open Networking Foundation (ONF) για την υλοποίηση του SDN σε εξοπλισμό δικτύωσης. Το πρωτόκολλο OpenFlow ορίζει τη διεπαφή μεταξύ ενός ελεγκτή OpenFlow και ενός διακόπτη OpenFlow. Το πρωτόκολλο OpenFlow επιτρέπει στον ελεγκτή OpenFlow να καθοδηγήσει τον διακόπτη OpenFlow σχετικά με τον τρόπο διαχείρισης των εισερχόμενων πακέτων δεδομένων.

Οι τρέχουσες εφαρμογές SDN επικεντρώνονται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση του πρωτοκόλλου OpenFlow για τη μεταφορά μηνυμάτων ελέγχου από τον λογικό κεντρικό ελεγκτή στους διακόπτες στο επίπεδο δεδομένων. Ο ελεγκτής αποκτά μια συνολική εικόνα ολόκληρου του δικτύου [27]. Αυτό βοηθά στη διαχείριση του δικτύου από ένα κεντρικό σημείο με πλήρη ορατότητα. Για παράδειγμα ONIX [28] και ONOS [29], αυτοί οι ελεγκτές εξακολουθούν να διατηρούν την παγκόσμια γνώση του δικτύου στο δικό τους τομέα [30].



Σχήμα 19 Το πρωτόκολλο OpenFlow. Πηγή: ONF OpenFlow 1.3.0 Switch Specification

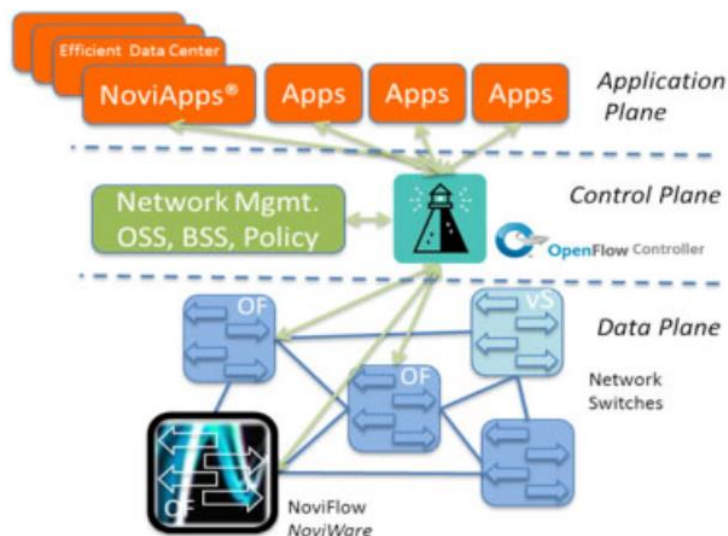
Ο διακόπτης OpenFlow μπορεί να προγραμματιστεί για να:

1. Προσδιορίζει και κατηγοριοποιεί τα πακέτα από μια θύρα εισόδου βασισμένη σε διάφορα πεδία κεφαλίδας πακέτων.
2. Επεξεργαστεί τα πακέτα με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης και της τροποποίησης της κεφαλίδας.
3. Αποσυνδέει ή προωθεί τα πακέτα σε μια συγκεκριμένη θύρα εξόδου ή στον ελεγκτή OpenFlow.

Οι οδηγίες του OpenFlow που μεταδίδονται από έναν ελεγκτή OpenFlow σε ένα διακόπτη OpenFlow είναι δομημένες ως "ροές". Κάθε μεμονωμένη ροή περιέχει πεδία αντιστοίχισης πακέτων, προτεραιότητα ροής, διάφορους μετρητές, οδηγίες επεξεργασίας πακέτων, χρονικά όρια ροής και ένα cookie. Οι ροές οργανώνονται σε πίνακες. Ένα εισερχόμενο πακέτο μπορεί να επεξεργαστεί με ροές σε πολλαπλούς πίνακες "pipelined" πριν προωθηθεί σε μια θύρα εξόδου.

Η αρχιτεκτονική δικτύου του OpenFlow αποτελείται από τρία επίπεδα:

1. Ένας ή περισσότεροι εικονικοί ή / και φυσικοί διακόπτες OpenFlow.
2. Ένας ή δύο ελεγκτές OpenFlow.
3. Μία ή περισσότερες εφαρμογές OpenFlow



Σχήμα 20. Η αρχιτεκτονική του OpenFlow. Πηγή : NoviFlow, Inc.

Ο ελεγκτής OpenFlow διατηρεί τα κανάλια επικοινωνίας του πρωτοκόλλου OpenFlow στους διακόπτες OpenFlow, διατηρεί ένα γράφημα τοπικής κατάστασης των διακοπών OpenFlow και εκθέτει ένα API NorthView στις εφαρμογές OpenFlow. Το northbound API μπορεί να θεωρηθεί ως αφαίρεση του δικτύου και επιτρέπει στις εφαρμογές του OpenFlow να διαβάζουν την κατάσταση του δικτύου και να καθοδηγούν το δίκτυο να εκτελεί διάφορες εργασίες.

Ένα πραγματικό δίκτυο OpenFlow μπορεί να αποτελείται μόνο από διακόπτες OpenFlow ή από ένα μείγμα διακοπών OpenFlow και παραδοσιακών διακοπών και δρομολογητών. Ο τελευταίος τύπος δικτύου ονομάζεται δίκτυο επικάλυψης. Ορισμένες εφαρμογές OpenFlow απαιτούν μόνο μερική ανάπτυξη των διακοπών OpenFlow, ενώ άλλες απαιτούν ένα δίκτυο που αποτελείται μόνο από διακόπτες OpenFlow.

5.3.3 Northbound API

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια από τις βασικές ιδέες που υποστηρίζει το παράδειγμα SDN είναι η ύπαρξη ενός λειτουργικού συστήματος δικτύου, που βρίσκεται μεταξύ της υποδομής δικτύου και των υπηρεσιών και εφαρμογών υψηλού επιπέδου. Υποθέτοντας μια τέτοια κεντρική μονάδα συντονισμού και βασισμένη στις αρχές του βασικού λειτουργικού συστήματος, θα πρέπει να υπάρχει μια σαφώς καθορισμένη διεπαφή στην αρχιτεκτονική SDN για την αλληλεπίδραση του ελεγκτή με τις εφαρμογές. Αυτή η διεπαφή πρέπει να επιτρέπει στις εφαρμογές να έχουν πρόσβαση στο υποκείμενο υλικό, να διαχειρίζονται τους πόρους του συστήματος και να επιτρέπουν την αλληλεπίδρασή τους με άλλες εφαρμογές χωρίς να έχουν γνώση των πληροφοριών δικτύου χαμηλού επιπέδου.

Σε αντίθεση με την Southbound επικοινωνία, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διακοπών και του ελεγκτή είναι καλά καθορισμένες μέσω μιας τυποποιημένης ανοιχτής διεπαφής (δηλ. OpenFlow), δεν υπάρχει σήμερα αποδεκτό πρότυπο για την αλληλεπίδραση του ελεγκτή με τις εφαρμογές [22]. Επομένως, κάθε μοντέλο ελεγκτή πρέπει να παρέχει τις δικές του μεθόδους για την εκτέλεση επικοινωνίας ελεγκτή-εφαρμογής.

5.4 Σχέση του SDN με την εικονικοποίηση δικτύου και του NFV.

Δύο πολύ δημοφιλείς τεχνολογίες που σχετίζονται στενά με το SDN είναι η εικονικοποίηση δικτύων και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV).

5.4.1 SDN και εικονικοποίηση του δικτύου

Η εικονικοποίηση δικτύου είναι ο διαχωρισμός της τοπολογίας δικτύου από την υποκείμενη φυσική υποδομή. Μέσω της εικονικοποίησης, είναι δυνατό να υπάρχουν πολλαπλά "εικονικά" δίκτυα που αναπτύσσονται πάνω στον ίδιο φυσικό εξοπλισμό, με καθένα από αυτά να έχει μια πολύ απλούστερη τοπολογία σε σύγκριση με αυτή του φυσικού δικτύου. Αυτή η αφαίρεση επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να κατασκευάσουν δίκτυα όπως αυτοί κρίνουν κατάλληλα χωρίς να χρειάζεται να παραβιάζουν την υποκείμενη υποδομή, η οποία μπορεί να αποδειχθεί μια δύσκολη ή και αδύνατη διαδικασία.

Η ιδέα για την εικονικοποίηση του δικτύου κατά την οποία αποσυνδέεται το δίκτυο από την υποκείμενη φυσική υποδομή έχει ομοιότητα με αυτήν που υποστηρίζει το SDN για την αποσύνδεση του ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων και ως εκ τούτου φυσικά γίνεται πηγή σύγχυσης. Η αλήθεια είναι ότι καμία από τις δύο τεχνολογίες δεν εξαρτάται από την άλλη. Η ύπαρξη του SDN δεν συνεπάγεται άμεσα την εικονικοποίηση του δικτύου. Ομοίως, το SDN δεν είναι απαραίτητως προϋπόθεση για την επίτευξη virtualization δικτύου. Αντίθετα, είναι δυνατή η ανάπτυξη μιας λύσης virtualization δικτύου μέσω ενός δικτύου SDN, ενώ ταυτόχρονα θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα δίκτυο SDN σε ένα εικονικό περιβάλλον.

Από την εμφάνισή του, το SDN συνυπήρχε στενά με την εικονικοποίηση δικτύου, η οποία αποτέλεσε ως μία από τις πρώτες και ίσως τις σημαντικότερες παραμέτρους χρήσης του SDN. Ο λόγος είναι ότι η αρχιτεκτονική ευελιξία που προσφέρει το SDN ενήργησε ως παράγοντας ενεργοποίησης για την εικονικοποίηση του δικτύου. Με άλλα λόγια, η εικονικοποίηση του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως μια λύση που εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, ενώ το SDN είναι μία (ίσως η καλύτερη αυτή τη στιγμή) αρχιτεκτονική για την επίτευξη αυτού του στόχου. Ωστόσο, η εικονικοποίηση δικτύου πρέπει να εξεταστεί ανεξάρτητα από το SDN. Στην πραγματικότητα, υποστηρίζεται ότι η εικονικοποίηση του δικτύου θα μπορούσε να αποδειχθεί ακόμη μεγαλύτερη τεχνολογική καινοτομία από το SDN [31]

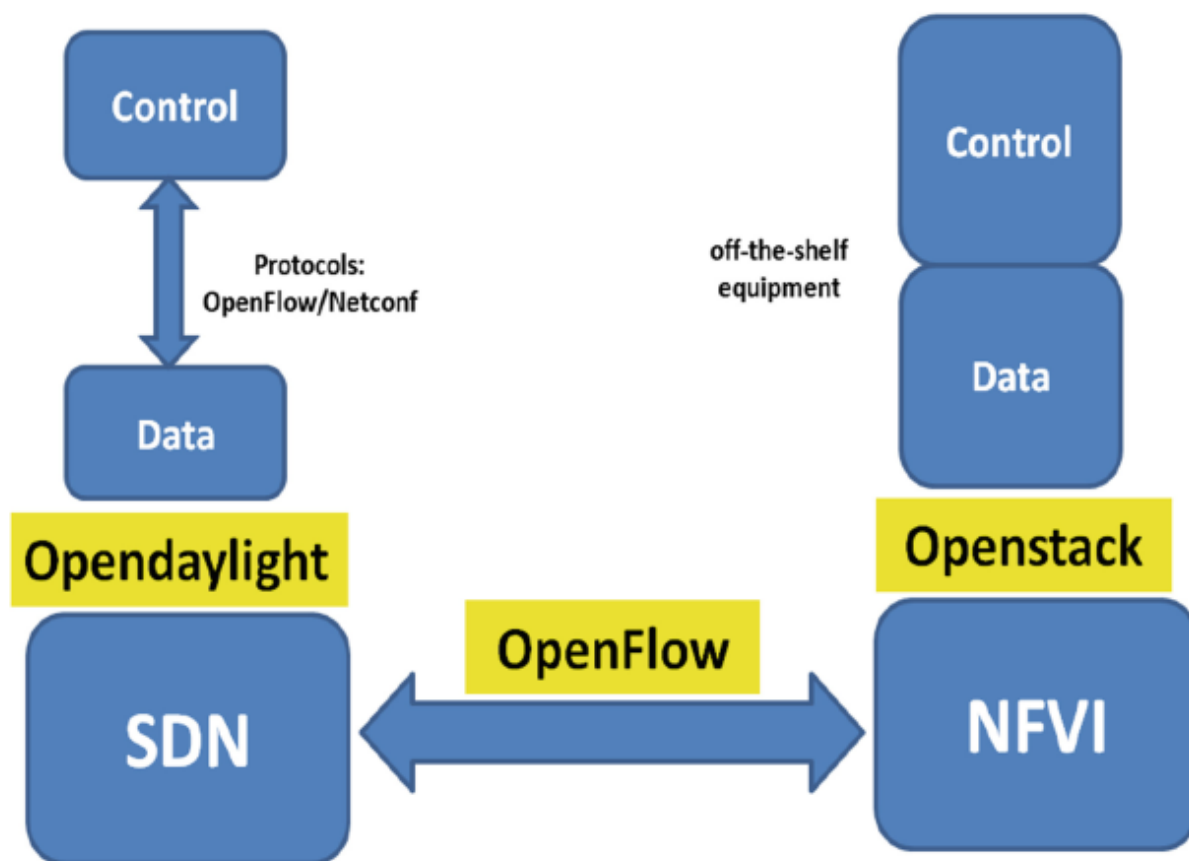
5.4.2 SDN και NFV

Μια άλλη τεχνολογία που συνδέεται στενά αλλά διαφέρει από το SDN είναι το NFV [32]. Το NFV είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου με στόχο να μετασηματιστεί ο τρόπος με τον οποίο οι φορείς εκμετάλλευσης σχεδιάζουν τα δίκτυα, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες που σχετίζονται με την εικονικοποίηση, προκειμένου να δημιουργήσουν λειτουργίες δικτύου όπως ο εντοπισμός εισβολών, η προσωρινή αποθήκευση, η υπηρεσία ονομάτων τομέα (DNS), και την μετάφραση

διεύθυνσης δικτύου (NAT) ώστε να μπορούν να τρέξουν πάνω σε λογισμικό. Μέσω της εισαγωγής του virtualization, είναι δυνατή η εκτέλεση αυτών των λειτουργιών μέσω γενικών εξυπηρετητών μεγάλου όγκου, διακοπών και συσκευών αποθήκευσης υψηλής ευκρίνειας, αντί για τη χρήση αποκλειστικών συσκευών δικτύου. Αυτή η προσέγγιση μειώνει το λειτουργικό κόστος και το κόστος ανάπτυξης, καθώς οι φορείς εκμετάλλευσης δεν χρειάζεται πλέον να βασίζονται σε δαπανηρές ιδιωτικές λύσεις υλικού. Τέλος, η ευελιξία στη διαχείριση δικτύου αυξάνεται καθώς είναι δυνατόν να τροποποιηθούν γρήγορα ή να εισαχθούν νέες υπηρεσίες για την αντιμετώπιση των μεταβαλλόμενων απαιτήσεων.

Η αποσύνδεση των λειτουργιών δικτύου από το υποκείμενο υλικό συνδέεται στενά με την αποσύνδεση του ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων που υποστηρίζει το SDN και ως εκ τούτου η διάκριση των δύο τεχνολογιών μπορεί να είναι κάπως αόριστη. Παρόλο που είναι στενά συνδεδεμένα, το SDN και το NFV αναφέρονται σε διαφορετικούς τομείς. Το NFV είναι συμπληρωματικό του SDN, αλλά δεν εξαρτάται από αυτό, και αντίστροφα. Για παράδειγμα, οι λειτουργίες ελέγχου του SDN θα μπορούσαν να υλοποιηθούν ως εικονικές λειτουργίες βασισμένες στην τεχνολογία NFV. Από την άλλη πλευρά, ένα σύστημα NFV θα μπορούσε να ελέγξει τη συμπεριφορά προώθησης των φυσικών διακοπών μέσω του SDN. Ωστόσο, και οι δύο αρχιτεκτονικές θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η άλλη.

Στην πραγματικότητα, το SDN και το NFV έχουν τους ίδιους στόχους, είναι συμπληρωματικά αλλά δεν εξαρτώνται το ένα από το άλλο, καθώς οι λειτουργίες δικτύου μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς να απαιτείται SDN και αντίστροφα. Όμως, η συγχώνευση των δύο τεχνολογιών θα οδηγήσει σε υψηλές επιδόσεις.



Σχήμα 21. Σχέση του SDN & NFV

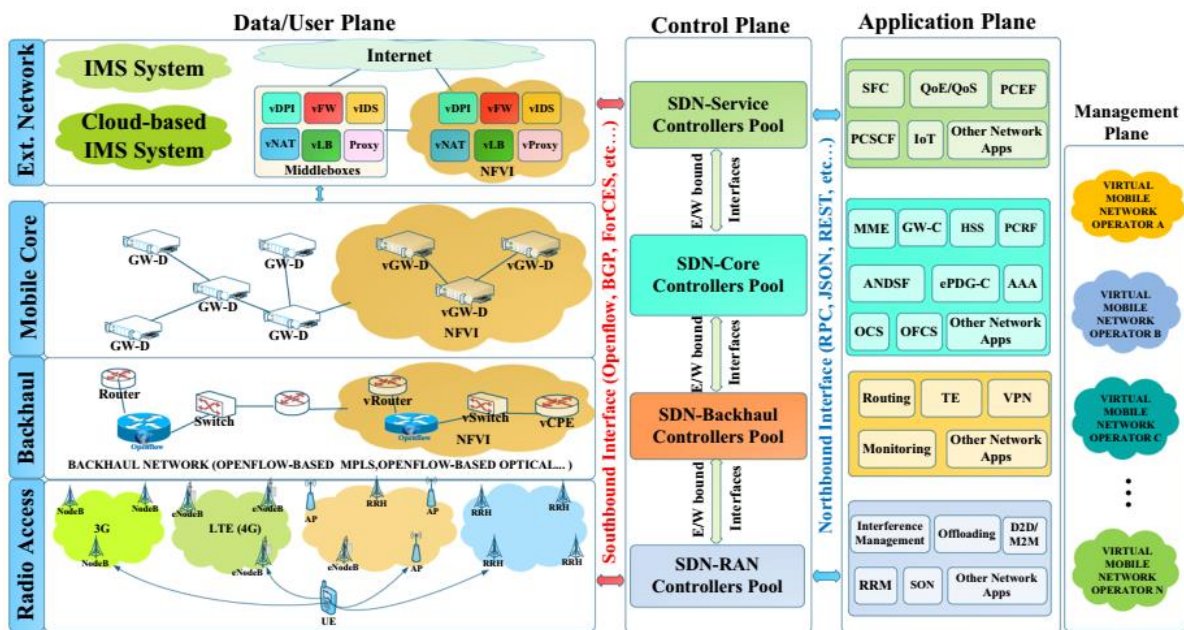
Το σχήμα 21 δείχνει τις διασταυρώσεις μεταξύ SDN και NFV σε όρους προτεινόμενων virtualization, πτυχή που βασίζεται σε ορισμένα έργα ανοιχτού κώδικα. Σε αυτό το σχήμα, το SDN μπορεί να ελέγξει την υποδομή NFV μέσω της έγχυσης ορισμένων API στις συσκευές μεταγωγής, είτε ως υλικό είτε ως λογισμικό όπως το Open Virtual Switch (OVS) [49].

Ο ελεγκτής όπως το Opendaylight [50] διαθέτει δύο διεπαφές επικοινωνίας:

1. Τη διεπαφή Southbound, η οποία χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο OpenFlow [51] για εκτέλεση των ενεργειών των κανόνων ή των ροών μέσα στις συσκευές OpenFlow (δρομολογητής / διακόπτης με δυνατότητα OpenFlow).
2. Τη διεπαφή Northbound που είναι αφοσιωμένη μεταξύ της εφαρμογής και του ελεγκτή. Δεν υπάρχει μέχρι τώρα τυποποίηση για αυτήν τη διεπαφή, αλλά η πλειοψηφία χρησιμοποιεί το API για αυτήν την επικοινωνία.

Χρησιμοποιώντας το OpenFlow, ο διαχειριστής μπορεί να αλλάξει οποιονδήποτε κανόνα δικτύου όταν είναι απαραίτητο σε έναν πίνακα δυναμικών ροών ή ακόμα και να αποκλείσει συγκεκριμένους τύπους πακέτων με πολύ κοκκώδη επίπεδο ελέγχου.

5.4.3 Αρχιτεκτονική SDN και Virtualization-Based Mobile Network (SDVMN)



Σχήμα 22. Γενική αρχιτεκτονική ενός SDN και ενός κινητού δικτύου βασισμένου σε virtualization (SDVMN) [48].

Το σχήμα 22 απεικονίζει τη συνολική αρχιτεκτονική ενός μελλοντικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας που έχει υλοποιήσει την τεχνολογία SDN. Τα βασικά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής SDVMN είναι ο διαχωρισμός του ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων και η εικονικοποίηση των δικτυακών υποδομών, καθώς και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου. Για να γίνει πιο κατανοητή η αρχιτεκτονική, θα παρουσιάσουμε την λεπτομερή αρχιτεκτονική του SDVMN σε δύο κατευθύνσεις: ως κατακόρυφη περιγραφή από κάτω προς τα πάνω και στη συνέχεια σε οριζόντια περιγραφή από αριστερά προς τα δεξιά. Κάθετα, ακολουθούμε το μοντέλο αναφοράς του τρέχοντος πακέτου εξέλιξης 3GPP, το οποίο αποτελείται από τρία βασικά μέρη: ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN), κινητό backhaul και το δίκτυο core packet core. Το UE χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες από εξωτερικά δίκτυα (σύστημα IMS, Internet, κ.λπ.) μέσω διεπαφής SGI-LAN, όπως ορίζεται στο [33], όπου αναπτύσσεται ένα σύνολο μεσαίων κιβωτίων.

Οριζόντια περιγράφονται τέσσερα επίπεδα αρχιτεκτονικών SDN: το επίπεδο δεδομένων, το επίπεδο ελέγχου, το επίπεδο εφαρμογής και το επίπεδο διαχείρισης. Ένας από τους κύριους στόχους είναι να γίνει κατανοητό ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο για το SDVMN και να χαρτογραφηθεί στην αρχιτεκτονική αναφοράς του SDN. Χρησιμοποιώντας αυτό το γενικό μοντέλο, μπορεί εύκολα να κατανοηθεί πώς χρησιμοποιείται η τεχνολογία SDN και η εικονικοποίηση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και πώς γίνεται η ιεραρχική ταξινόμηση σύμφωνα με αυτό το μοντέλο.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 22, το τμήμα RAN είναι το ετερογενές περιβάλλον δικτύου πρόσβασης το οποίο περιλαμβάνει διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης όπως GSM, UMTS, LTE και Wi-Fi. Αυτά τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης μπορούν να προγραμματιστούν και υπό την επίβλεψη μίας ομάδας ελεγκτών SDNRAN. Το δεύτερο μέρος του SDVMN είναι το δίκτυο backhaul το οποίο συνδέει ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης και ένα core network δίκτυο. Το MPLS και οι οπτικές τεχνολογίες είναι δύο τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Μέσα στην έννοια SDN, ο εξοπλισμός δικτύου που χρησιμοποιείται σε MPLS ή οπτικά δίκτυα ενισχύεται με δυνατότητα προγραμματισμού. Αυτός ο εξοπλισμός δικτύου μπορεί να είναι εξειδικευμένοι διακόπτες, δρομολογητές ή εικονικοί διακόπτες που βασίζονται σε υλικό, είναι προγραμματισμένοι και υλοποιούνται ως εικονικές μηχανές (VM) που εκτελούνται σε ένα σύστημα υπολογιστικού νέφους ή το NFVI.

Το τρίτο μέρος του SDVMN είναι το δίκτυο κινητού πυρήνα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά core networks κινητής τηλεφωνίας, το core network του SDVMN αποτελείται από απλές πύλες δικτύου που ονομάζονται GW-Ds, οι οποίες μπορούν είτε να είναι αποκλειστικοί διακομιστές υλικού είτε συσκευές λογισμικού που εκτελούνται στο περιβάλλον NFVI. Το κεντρικό δίκτυο του SDVMN μπορεί επίσης να προγραμματιστεί με ελεγκτές πυρήνα SDN μέσω ανοικτών API [48]. Τα GW-Ds λειτουργούν ως σημείο αγκυροβόλησης για intra-/ inter-handover στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και αποτελούν σημείο σύνδεσης με εξωτερικά δίκτυα (π.χ. IMS, Internet, κλπ.). Με τη χρήση καταναμημένων GW-Ds, το SDVMN μπορεί να εξαλείψει το ζήτημα μιας αποτυχίας, να παρέχει δυνατότητα κλιμάκωσης και να εγγυάται διαθεσιμότητα υπηρεσιών για τους χρήστες.

Το τελευταίο μέρος είναι το external network που βρίσκεται στην κορυφή της αρχιτεκτονικής του SDVMN. Το external network είναι ένα σύστημα IMS ή Internet, το οποίο παρέχει τις υπηρεσίες για UEs. Πριν από τη ροή στο Internet, η κυκλοφορία δεδομένων χρήστη πρέπει να περάσει από ένα σύνολο μεσαίων θυρίδων τοποθετημένων πίσω από τη διασύνδεση SGi-LAN [48]. Αυτά τα μεσαία πλαίσια βοηθούν στην ασφάλεια, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη διευκόλυνση της απομακρυσμένης πρόσβασης. Μερικά παραδείγματα μεσαίων θυρίδων περιλαμβάνουν τείχη προστασίας, αντισταθμιστές φορτίου και βελτιστοποίηση WAN. Με την υλοποίηση της έννοιας του NFV, αυτά τα μεσαία κιβώτια μπορούν να αναπτυχθούν ως συσκευές λογισμικού που λειτουργούν σε περιβάλλον NFVI.

Στην οριζόντια πλευρά της αρχιτεκτονικής του SDVMN υπάρχουν τέσσερα στρώματα της γενικής αρχιτεκτονικής του SDN και διαχωρίζονται ρητά στο σχήμα 22. Το πρώτο στρώμα (επίπεδο δεδομένων ή χρήστη) επιτρέπει την παράδοση της κίνησης δεδομένων χρήστη μέσω του RAN στο εξωτερικό δίκτυο. Το δεύτερο στρώμα είναι το στρώμα ελέγχου, όπου μπορεί να αναπτυχθεί μια συλλογή ελεγκτών του SDN για κάθε τμήμα του SDVMN. Στην πραγματικότητα, ολόκληρη η αρχιτεκτονική του SDVMN μπορεί να ελεγχθεί και να διαχειριστεί από έναν ελεγκτή super-SDN. Ωστόσο, αυτό καθιστά την αρχιτεκτονική πολύ δύσκολη και πολύπλοκη. Επομένως, διαιρείται αυτός ο ελεγκτής super-SDN σε τέσσερα επίπεδα ελεγκτή, σύμφωνα με το μοντέλο 4 επιπέδων των κινητών δικτύων, προκειμένου να διευκολυνθεί η κατανόηση: τον ελεγκτή SDN-RAN, τον ελεγκτή SDN-Backhaul, τον ελεγκτή SDN-Core και τον ελεγκτή υπηρεσίας του SDN. Από μια συνολική άποψη των πληροφοριών κατάστασης δικτύου, αυτοί οι ελεγκτές του SDN μπορούν να εκτελέσουν πολλές ενέργειες για τον έλεγχο και τη διαχείριση του RAN, του κινητού backhaul, του πυρήνα του πακέτου κινητής τηλεφωνίας και του εξωτερικού δικτύου, αντίστοιχα. Για παράδειγμα, ο ελεγκτής SDN-RAN είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και τη διαχείριση των ραδιοφωνικών πόρων [48].

Αυτοί οι ελεγκτές συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω διασυνδέσεων east/westbound. Παρόμοια με τις συσκευές δικτύου στο επίπεδο δεδομένων, οι ελεγκτές SDN μπορούν επίσης να αναπτυχθούν ως ελεγκτές που βασίζονται είτε σε υλικό είτε σε λογισμικό που εκτελείται σε περιβάλλον NFVI.

Το επόμενο επίπεδο είναι το application layer ή application plane. Σε όλο το RAN στο external network, το επίπεδο εφαρμογής αποτελείται από μια σειρά λειτουργιών ελέγχου δικτύου που τοποθετούνται στην κορυφή των ελεγκτών SDN. Αντίστοιχα προς το τμήμα RAN, οι λειτουργίες ελέγχου δικτύου μπορούν να περιλαμβάνουν διαχείριση παρεμβολών, διαχείριση ραδιοφωνικών πόρων και εκφόρτωση. Αντίστοιχα με το τμήμα του backhaul δικτύου, οι λειτουργίες που μπορούν να ωθηθούν στον ελεγκτή περιλαμβάνουν τη διαχείριση των πόρων, τη μηχανική κυκλοφορίας και την παρακολούθηση. Αντίστοιχα στο core network, όλες οι λειτουργίες ελέγχου του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των MME, GW-C, PCRF, HSS και συστημάτων αυθεντικοποίησης (AAA), μπορούν να συσκευάζονται ως εφαρμογές που εκτελούνται σε ελεγκτές πυρήνα SDN ή VM που λειτουργούν σε περιβάλλον NFVI.

Το τελευταίο στρώμα στην οριζόντια πλευρά του αρχιτεκτονικού μοντέλου SDVMN είναι το management layer ή management plane. Όπως ορίζεται στο [34], το management plane θεωρείται ένα άλλο επίπεδο στην αρχιτεκτονική SDN, το οποίο καλύπτει στατικά καθήκοντα τα οποία μπορούν να γίνουν καλύτερα διαχειρίσιμα εκτός των επιπέδων εφαρμογής, ελέγχου και δεδομένων και αναφέρονται στην αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο. Στην αρχιτεκτονική SDVMN, ο όρος " επίπεδο διαχείρισης " αναφέρεται στη διαχείριση του φορέα. Η τεχνολογία virtualization δικτύου επιτρέπει σε πολλούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύου να μοιράζονται την ίδια υποκείμενη υποδομή SDVMN. Με άλλα λόγια, η υποκείμενη υποδομή SDVMN μπορεί να χωριστεί σε πολλά εικονικά δίκτυα, από το RAN στο βασικό μέρος, σύμφωνα με τις προσαρμοσμένες απαιτήσεις διαφόρων φορέων κινητής εικονικής δικτύωσης (MVNO).

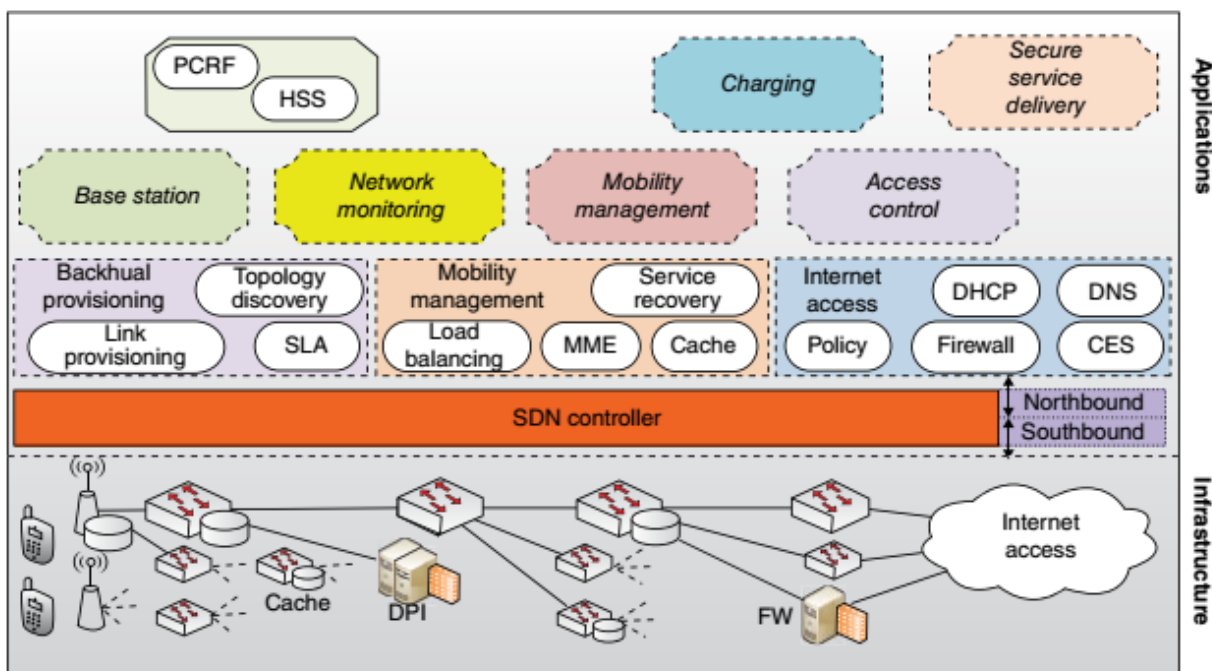
Η διεπαφή Southbound χρησιμοποιείται από τους ελεγκτές SDN για τον προγραμματισμό του επιπέδου δεδομένων κινητού δικτύου σύμφωνα με διάφορες πολιτικές και αιτήματα από τους εικονικούς φορείς. Οι Southbound Interface περιλαμβάνει Openflow, ForCES, PCEP και BGP. Η Northbound Interface [36] είναι μια προγραμματιστική διασύνδεση που βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του ελεγκτή. Συνήθως, μια διασύνδεση στο βορρά περιγράφει τα σύνολα εντολών χαμηλού επιπέδου που χρησιμοποιούνται από τις διασυνδέσεις Southbound προς τις συσκευές προώθησης προγραμμάτων. Ορισμένες τυπικές διασυνδέσεις στο Northbound που εξετάζονται στο SDVMN περιλαμβάνουν τα API REST API, RPCJSON και Java API. Οι East/Westbound Interfaces χρησιμοποιούνται για διασύνδεση μεταξύ των ελεγκτών προκειμένου να επιτευχθεί επεκτασιμότητα σε ένα δίκτυο πολλαπλών τομέων. Μια τυπική East/Westbound Interface είναι το SDNi, το οποίο υλοποιείται στον ελεγκτή OpenDaylight [35]. Στο SDVMN, ο ρόλος των East/Westbound Interfaces δεν είναι μόνο η αντιμετώπιση προβλημάτων κλιμάκωσης αλλά και ο συγχρονισμός μεταξύ των τμημάτων ενός SDVMN, ώστε να μπορεί να παρέχει μια ομαλή σύνδεση end-end για τους χρήστες.

6. Ανάλυση της αρχιτεκτονικής του SDMN

Το 2015, η κίνηση δεδομένων έφτασε περίπου το 30% της συνολικής κίνησης στο διαδίκτυο [52] και η αύξηση της κυκλοφορίας κατά 66% εκτιμάται στο 2017 [53]. Η εκθετική χρήση των υπηρεσιών του MCC προκαλεί αρκετά προβλήματα όσον αφορά τη διαμόρφωση και τη διαχείριση, επειδή τα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι πολύπλοκα και δύσκολα διαχειρίσιμα και πρέπει να ρυθμιστεί κάθε μεμονωμένη συσκευή δικτύου χωριστά. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, οι έρευνες επικεντρώθηκαν στην εξεύρεση ενός συστήματος αυτόματης ρύθμισης και αντίδρασης, ικανό να ελέγχει ολόκληρο το δίκτυο, προσφέροντας ευκινησία, απλότητα, διακριτικότητα, καινοτομία και να χρησιμοποιεί την λειτουργία της αφαίρεσης. Το Software-Defined Mobile Networking προτείνεται ως ένα αναδυόμενο μοντέλο δικτύωσης, το οποίο προέρχεται από το SDN, για να αλλάξει τους περιορισμούς των υφιστάμενων υποδομών κινητής τηλεφωνίας. Η ενσωμάτωση του SDN σε κινητά δίκτυα για να γίνει SDMN θέτει διάφορες αρχιτεκτονικές εναλλακτικές λύσεις.

6.1 Όραμα του SDN στα δίκτυα LTE

Ξεκινώντας από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, το 3GPP έχει κάνει βήματα προς έναν σαφή διαχωρισμό των δεδομένων και των επιπέδων ελέγχου και των αντίστοιχων στοιχείων στην αρχιτεκτονική. Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται ο έλεγχος ενός κινητού δικτύου 5G ως ομάδα εφαρμογών SDN. Πρόκειται για το Base Station App, Backhaul App, MM App, Monitoring App, Access App, and Secure Service Delivery App. Οι εφαρμογές δικτύου είναι εννοηστρομμένες μέσω του Controller Northbound API.



Σχήμα 23. Ομάδες εφαρμογών του SDMN σε 5G δίκτυο [54].

Το Base Station App εκτελεί το λογισμικό ελέγχου που είναι πλέον κάθετα ενσωματωμένο στο eNB. Οι φυσικοί σταθμοί βάσης υπό τον έλεγχό του αποτελούνται από μια κεραία, ένα φίλτρο ζώνης διέλευσης και μια κάρτα Ethernet για συνδεσιμότητα backhaul.

6.1.1 MM App

Το MM App υλοποιεί την κινητικότητα ως υπηρεσία (MaaS) και είναι μια διαδραστική λειτουργία. Το MaaS εμφανίζεται στην ανάντη διεπαφή του διακόπτη OF (mOFS) που προσφέρει την υπηρεσία του στο Access App. Όταν μια κινητή συσκευή μετακινείται από την περιοχή ενός eNB σε μια περιοχή άλλου, ο κανόνας στο mOFS για τη συσκευή μπορεί να χρειαστεί να τροποποιηθεί και ίσως χρειαστεί να δημιουργηθεί ένας νέος κανόνας στο νέο eOFS όπου το eOFS είναι το πρώτο σημείο συσσωμάτωσης για τα συνδεδεμένα eNB. Εάν το νέο eNB βρίσκεται κάτω από το ίδιο eOFS με το προηγούμενο, τότε αρκεί να τροποποιηθεί ένας υπάρχον κανόνας στο eOFS. Πρέπει επίσης να εξισορροπηθεί το φορτίο στις εναλλακτικές διαδρομές μεταξύ ενός eNB και ενός συγκεκριμένου mOFS. Το MM App επιλέγει τη διαδρομή για μια συσκευή. Η απόφαση εξισορρόπησης φορτίου γίνεται με βάση την είσοδο από το Network Monitoring App. Σε κάθε περίπτωση, είναι επιθυμητό το σημείο σύνδεσης ενός κινητού στο Internet να είναι σταθερό ενώ παραμένει κάτω από την κάλυψη του τρέχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Για να καταστεί αυτό δυνατό, κάθε eNB σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας έχει πολλές προεπιλεγμένες διαδρομές σε κάθε mOFS.

Το MM App ενσωματώνει το MME. Επιπλέον, πρέπει να διαχειρίζεται την ποιότητα της υπηρεσίας για κάθε χρήστη, να εξισορροπεί το φορτίο μεταξύ των εναλλακτικών διαδρομών σε όλο το δίκτυο συσσωμάτωσης και να κατευθύνει το χρήστη σε μια προσωρινή μνήμη, όταν είναι δυνατόν. Μεταξύ των σημερινών δημοφιλών ιδεών του SDN, το OpenFlow είναι το πιο σημαντικό. Δεν υποστηρίζει το GTP tunneling. Ως εκ τούτου, είναι λογικό να μελετηθούν εναλλακτικοί τρόποι μεταφοράς της κίνησης δεδομένων του χρήστη από τα eNBs στο διαδίκτυο και από το διαδίκτυο στα eNBs.

6.1.2 Access App

Σε ένα φυσικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, ενδέχεται να υπάρχουν πολλές εφαρμογές πρόσβασης (Access Apps). Στην περίπτωση αυτή, μια εφαρμογή πρόσβασης ανήκει και λειτουργεί από έναν συγκεκριμένο πάροχο κινητού εικονικού δικτύου (MVNO). Μη λαμβάνοντας υπόψιν την κινητικότητα, το Access App είναι υπεύθυνο για την παροχή των υπηρεσιών δεδομένων σε χρήστες κινητών τηλεφώνων. Βασικές ιδιότητες του Access App περιλαμβάνουν την παροχή πρόσβασης στο Internet, την αποτροπή ανεπιθύμητης επισκεψιμότητας και την παροχή πρόσβασης σε περιεχόμενο υψηλής ποιότητας.

Ένα έργο του Access App είναι η αντιστοίχιση μιας διεύθυνση IP για μια κινητή συσκευή. Αυτή μπορεί να είναι ιδιωτική διεύθυνση. Έτσι, η εφαρμογή Access παρέχει το σημείο σύνδεσης στο Internet και στα δίκτυα παροχής υπηρεσιών σε κάθε κινητή συσκευή ελέγχοντας ένα διακόπτη OF (iOFS) που συνδέει το mOFS με το Internet. Το σημείο σύνδεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερό, καθώς το κινητό μετακινείται ή ακόμα περνάει σε ξένα δίκτυα. Για μια εισερχόμενη

ροή, το Access App θα χειριστεί τείχους προστασίας και θα ζητήσει εξισορρόπηση φορτίου κατάντη από την εφαρμογή MM. Για μια εισερχόμενη ροή, το Access App θα χειριστεί λειτουργίες τείχους προστασίας και θα ζητήσει εξισορρόπηση φορτίου κατάντη από την εφαρμογή MM. Η εισαγωγή όλων των ροών πρέπει να γίνεται από μια πολιτική που αποτελεί μέρος των πληροφοριών συνδρομής του χρήστη. Οι πολιτικές αυτές θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με μια εκτεταμένη πολιτική του 3GPP και με μία αρχιτεκτονική διαχείρισης χρέωσης. Οι πολιτικές μπορούν να είναι δυναμικές, δηλαδή να αντιμετωπίζουν διαφορετικούς απομακρυσμένους κεντρικούς hosts με διαφορετικό τρόπο, με βάση τη φήμη που παράγεται από ένα σύστημα διαχείρισης εμπιστοσύνης.

6.1.3 Secure Service Delivery App

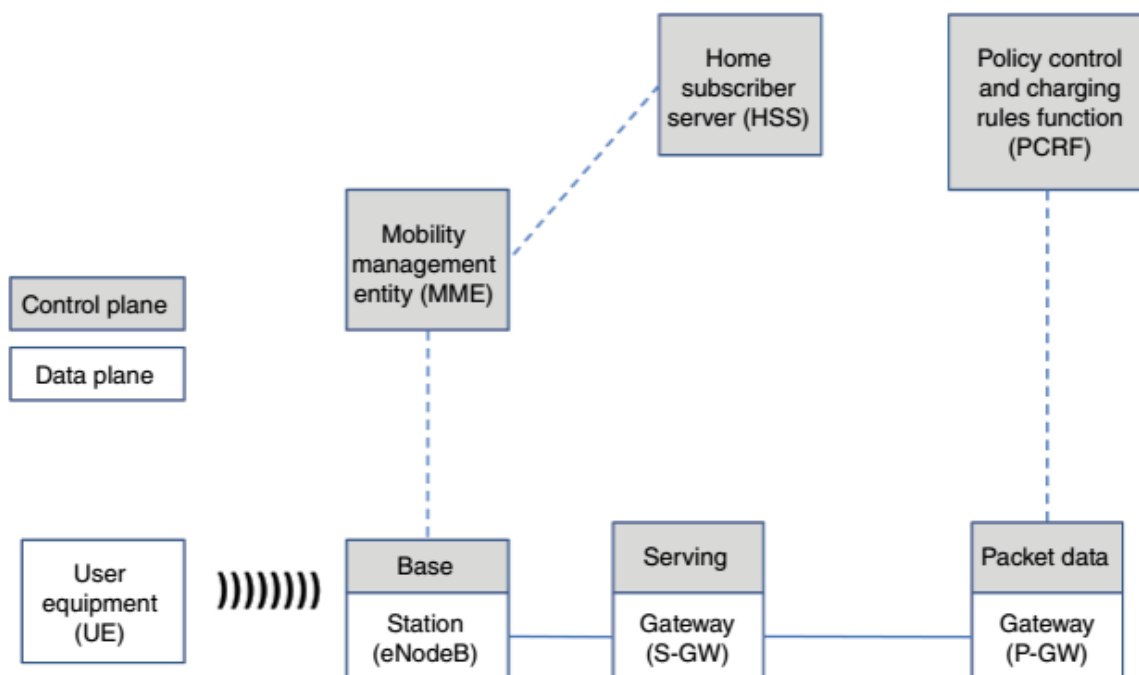
Με το service delivery network, εννοούμε το δίκτυο που συνδέει δύο δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ή ένα κινητό δίκτυο με ένα σταθερό δίκτυο ή με ένα κέντρο δεδομένων που έχει τις επιθυμητές εφαρμογές ή περιεχόμενο. Εφαρμόζοντας τις έννοιες SDN στην παροχή υπηρεσιών, μπορούμε να επιδιώξουμε οφέλη όπως η εξασφάλιση της διαδικασίας παροχής υπηρεσιών και η μέγιστη αξιοποίηση των οικονομιών κλίμακας όπως φθηνών διακοπών και γενικού υλικού για την επεξεργασία ελέγχου. Οι πιο απλοί στόχοι του δικτύου παροχής υπηρεσιών είναι η αποφυγή της αλλοίωσης της διεύθυνσης πηγής και του DDoS και η αναγνώριση μόνο της θεμιτής κυκλοφορίας.

6.2 Επιλογές για την τοποθέτηση του ελεγκτή SDMN

Πρέπει πρώτα να οριστεί η σωστή θέση του ελεγκτή SDMN. Μπορεί να ενσωματωθεί στο Mobility Management Entity (MME) κάνοντας τον ελεγκτή ενήμερο για τα γεγονότα της κινητικότητας ή μπορεί να εντοπιστεί στο Serving/Package Gateway (S/P-GW) για τον έλεγχο του δικτύου μεταφορών. Η ενσωμάτωση του ελέγχου SDN με τα στοιχεία του δικτύου LTE θα πρέπει να ακολουθεί μια διαδοχική διαδικασία, με ιδέα την ομαλή ανάπτυξη του SDN σε ένα ζωντανό κινητό δίκτυο. Στην καλύτερη περίπτωση, η ενσωμάτωση του SDN με το LTE ανοίγει το δρόμο για δίκτυα 5G. Προς το παρόν, ο στόχος είναι να συνεχίσουμε να χρησιμοποιούμε τα τρέχοντα δίκτυα που βασίζονται στην IP και να προσθέσουμε ευελιξία με βάση το SDMN στην αρχιτεκτονική του δικτύου LTE [54].

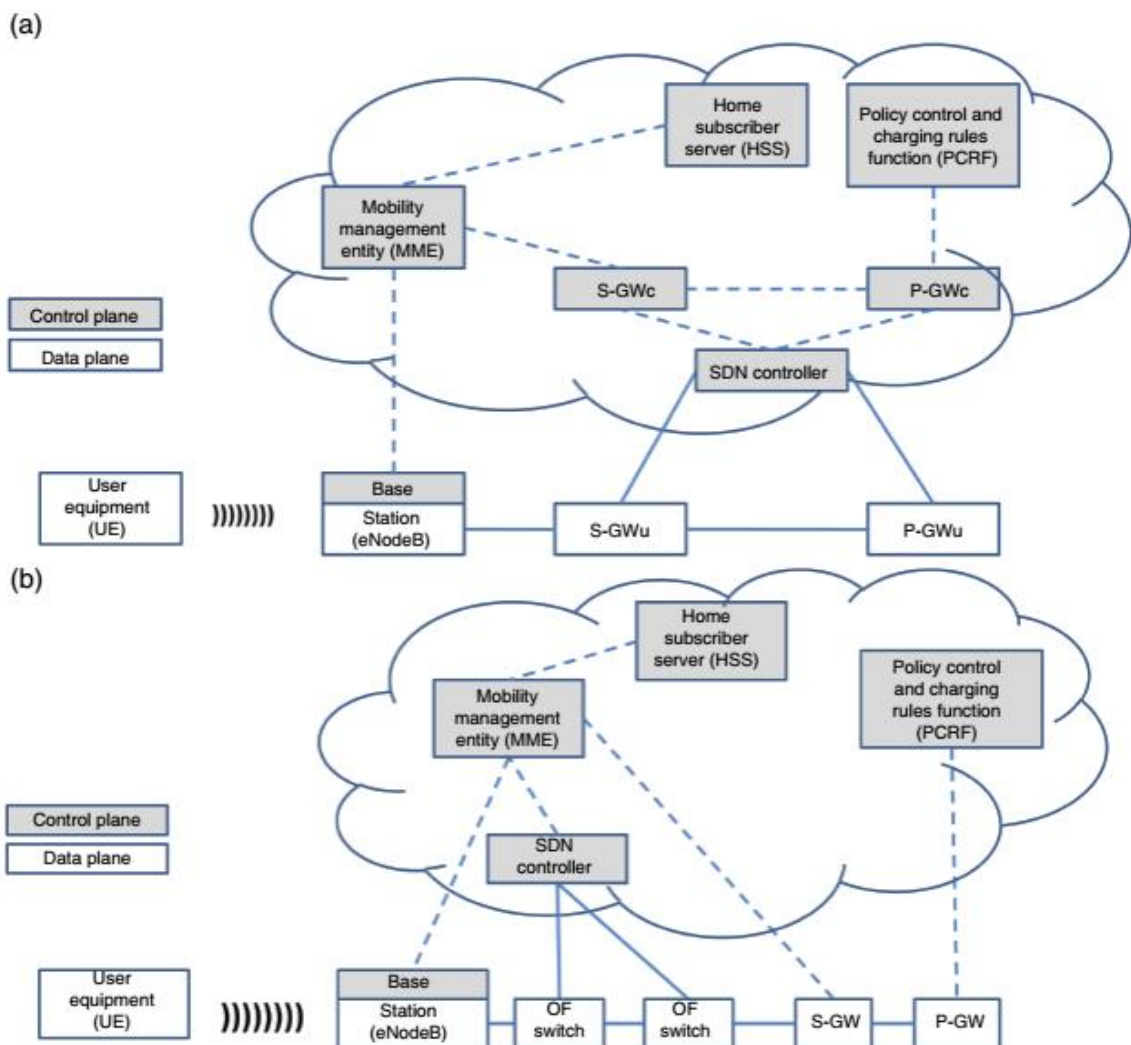
Η ενσωμάτωση του SDN σε κινητά δίκτυα για να γίνει SDMN μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

1. Ο ελεγκτής μπορεί να ενσωματωθεί στο MME προκειμένου να γνωρίζει τα γεγονότα κινητικότητας.
2. Ο ελεγκτής μπορεί να ενσωματωθεί με το S / P-GW για τον έλεγχο του δικτύου μεταφοράς.



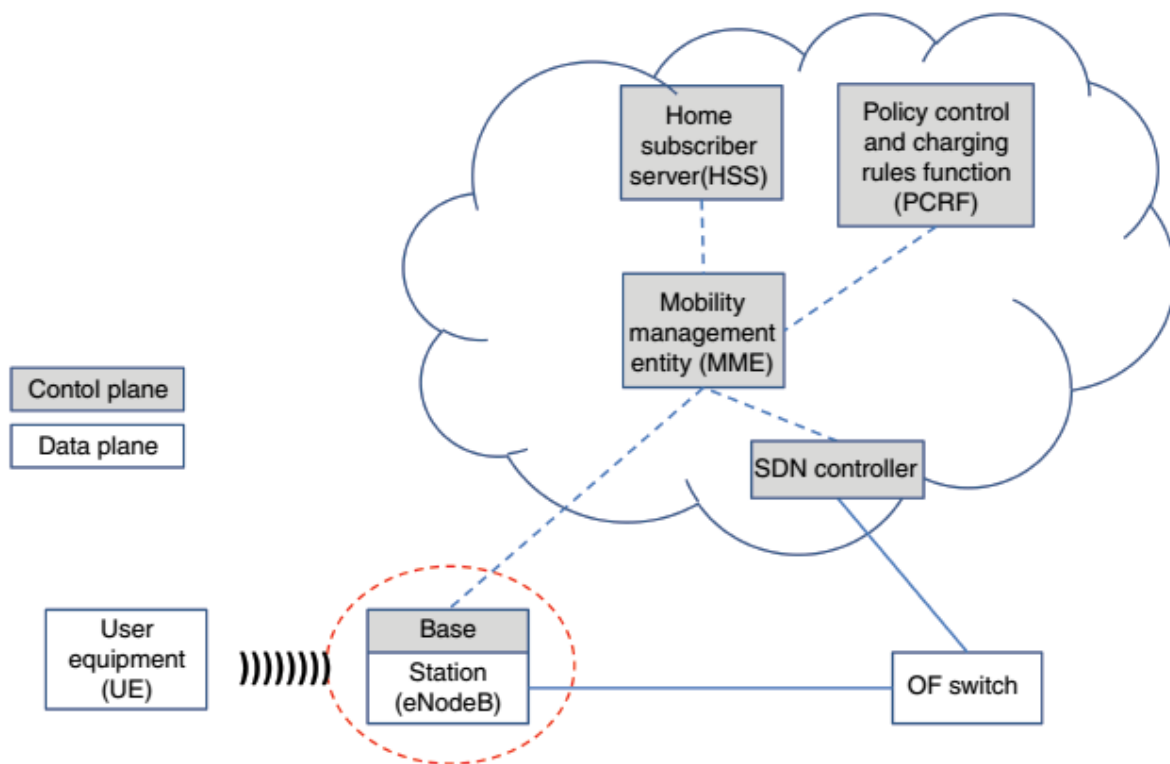
Σχήμα 24. Αρχιτεκτονική δικτύου LTE [54].

Το σχήμα 24 δείχνει την τρέχουσα αρχιτεκτονική LTE, η οποία επιτρέπει πολλές επιλογές για την ενσωμάτωση του ελεγκτή SDN. Το Σχήμα 25 περιγράφει μια επιλογή ενσωμάτωσης του SDN στην αρχιτεκτονική LTE. Αυτή η επιλογή αποτελείται από την αποσύνδεση του S/P-GW στο επίπεδο ελέγχου και δεδομένων. Το τμήμα ελέγχου του S/P-GW (δηλ. S/P-GWc) παρέχει κατανομή διεύθυνσης IP για το UE και είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή του TFT στις ροές δεδομένων χρήστη. Το επίπεδο δεδομένων του S/P-GW (δηλ. S/P-GWu) παρέχει το τελικό σημείο τερματισμού του GTP tunneling και την αγκύρωση των GTP tunnels κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παράδοσης. Το τμήμα ελέγχου του S/P-GW είναι ενσωματωμένο στον ελεγκτή SDN και στέλνει το TFT στο S/P-GWu, το οποίο στη συνέχεια το επιβάλλει ως φίλτρο δεδομένων. Τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου δεν αλλάζουν και το MME αλληλεπιδρά με το S/P-GWc.



Σχήμα 25. (a) Ενσωμάτωση του SDN με το S/P-GW (b) Ενσωμάτωση του SDN με το MME [54].

Η δεύτερη επιλογή ενσωμάτωσης SDN στην αρχιτεκτονική LTE αποτελείται από την ενσωμάτωση του ελεγκτή SDN με το MME όπως φαίνεται στο σχήμα 25(b). Αυτή η επιλογή επιτρέπει στον ελεγκτή SDN να μάθει άμεσα για τα γεγονότα της κινητικότητας από το MME, επιτρέποντας την εφαρμογή νέων κανόνων στους κόμβους μεταγωγής για την επαναφορά των διαδρομών δρομολόγησης με βέλτιστο τρόπο. Στο Σχήμα 25(b), το DP που βασίζεται στο OF μεταξύ eNB και S/P-GW πρέπει να κατανοήσει το GTP. Η ενσωμάτωση της λειτουργικότητας του ελεγκτή SDN με το MME παρέχει μια ομαλή ενσωμάτωση μακροπρόθεσμα, καθώς και μια καταστροφική λύση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το ζήτημα της ενσωμάτωσης του SDN είναι ο τρόπος υποστήριξης των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων για κινητά με το OpenFlow. Δεδομένου ότι το OpenFlow δεν υποστηρίζει το GTP και με η τροποποίηση του OpenFlow για τέτοια υποστήριξη θα οδηγήσει σε απώλεια οικονομικών μεγεθών στα στοιχεία μεταγωγής, αλλά και θα καταστήσει πιο δαπανηρή και δυσκίνητη την ενσωμάτωση των λειτουργιών κρυφής μνήμης και παρακολούθησης δικτύου στο δίκτυο, είναι λογικό να μελετήσουμε τις επιλογές αντικατάστασης του GTP-u με πρότυπα πρωτόκολλα επικοινωνίας δεδομένων όπως παραλλαγές Ethernet και MPLS. Η λύση που προκύπτει για την κινητικότητα, αντί του tunneling μέσω IP, θα βασίζεται σε διαδρομές ελεγχόμενες από το SDN.



Σχήμα 26. Ενσωμάτωση του SDN με το MME [54].

Στο SDMN, το επίπεδο ελέγχου μετακινείται από τα βασικά στοιχεία δικτύωσης σε κεντρικούς διακομιστές - αυτοί οι διακομιστές μοιάζουν με τα κλασικά σημεία αγκύρωσης (anchor points) που χρησιμοποιούνται σε πολλά πρωτόκολλα κινητικότητας. Επομένως, είναι λογικό να ομαδοποιηθεί ο ελεγκτής και η τρέχουσα λειτουργικότητα S/P-GW στην ίδια εφαρμογή δικτύου μαζί με τη

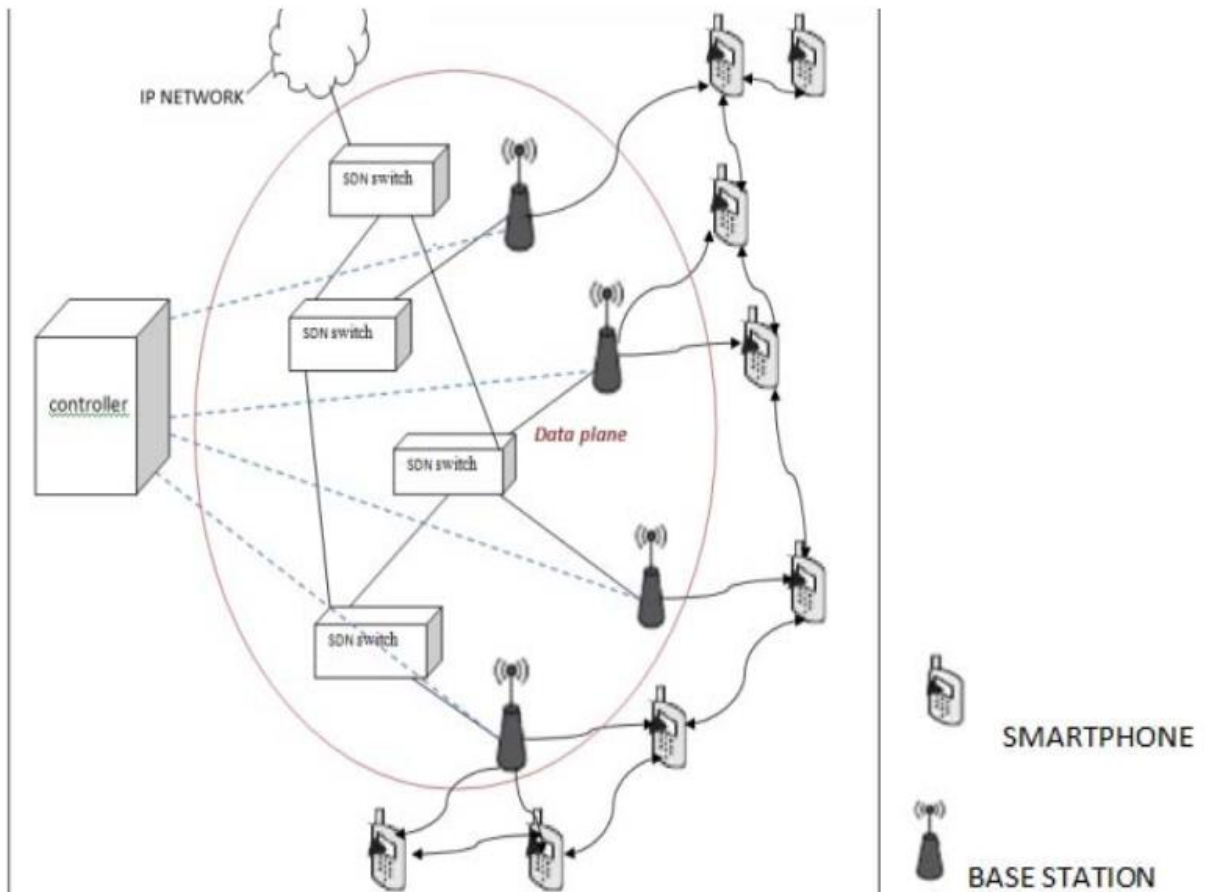
λειτουργικότητα MME [54]. Αυτή η εφαρμογή ονομάζεται Mobility Management App (MM App). Στην προσέγγιση αυτή, τα επί του παρόντος ανεξάρτητα στοιχεία S/P-GW εξαφανίζονται και αντί αυτού, χρησιμοποιούν ένα δίκτυο πακέτων με ελεγχόμενο SDN. Αυτή η προσέγγιση θα προσθέσει ευελιξία (π.χ. ευκολότερη παροχή προσωρινής αποθήκευσης και παρακολούθησης) και αξία στη δικτύωση (μειωμένη γενική κάλυψη πακέτων) με διαφορετικές αυξήσεις και θα υποστηρίξει τη σταδιακή εισαγωγή υψηλών δυνατοτήτων δικτύου, βέλτιστης διαχείρισης ροής και δυνατότητες μηχανικής κυκλοφορίας [54]. Το σχήμα 26 δείχνει την ενσωμάτωση της διαχείρισης της κινητικότητας με τον ελεγκτή SDN. Η πρόκληση για τον έλεγχο SDN είναι να ικανοποιήσει την απαιτούμενη καθυστέρηση προκειμένου να επιτευχθεί απρόσκοπτη τερματική κινητικότητα χωρίς υπερβολική σηματοδότηση. Μια άλλη πρόκληση είναι να ικανοποιηθούν όλες οι λειτουργικές απαιτήσεις με τους περιορισμούς που θέτει το πρωτόκολλο OpenFlow.

Η κινητικότητα είναι μια κρίσιμη πτυχή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, η οποία απαιτεί συγκεκριμένη λειτουργικότητα στα στοιχεία του δικτύου. Η στενή σύνδεση μεταξύ του MME και του SDN ελεγκτή δίνει την καλύτερη πιθανότητα ότι οι χρονικά περιορισμένες λειτουργίες της κινητικότητας, όπως τα απρόσκοπτα handovers, αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά από τον ελεγκτή SDN.

6.3 Το δίκτυο κινητής πρόσβασης που βασίζεται σε SDN

Στο δίκτυο κινητής πρόσβασης που βασίζεται σε SDN ο μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης κανόνων χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των κανόνων. Ακολουθώντας αυτή τη στρατηγική, αποθηκεύονται οι κανόνες που χρησιμοποιούν το TCAM ως προσωρινή αποθήκευση, ενώ οι υπόλοιποι αποθηκεύονται στην κρυφή μνήμη [55]. Ο αλγόριθμος αντικατάστασης κανόνα χρησιμοποιείται για να βρεθεί ο απαιτητικός κανόνας για τη βελτίωση της απόδοσης και της κλιμάκωσης του δικτύου κινητής πρόσβασης.

Το δίκτυο κινητής πρόσβασης που βασίζεται σε SDN παρέχει προγραμματική διασύνδεση για τη διαχείριση δικτύου [55]. Το SDN είναι ικανό να παρέχει καλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης για τον χειρισμό πολλών χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 27, το δίκτυο κινητής πρόσβασης SDN ακολουθεί την ίδια ιδέα του SDN με το αποσυνδεδεμένο επίπεδο δεδομένων και ελέγχου. Υπάρχει ένας σταθμός βάσης για να διευκολύνει το SDN στην εύρεση διαδρομής.



Σχήμα 27. Το δίκτυο κινητής πρόσβασης που βασίζεται σε SDN [55].

Σε αυτήν την αρχιτεκτονική ο σταθμός βάσης συνδέει τον ελεγκτή SDN με τους καταναμημένους χρήστες κινητών και τους διακόπτες SDN και οι σταθμοί βάσης συνδέονται μαζί στο δίκτυο για τη διαβίβαση του πακέτου δεδομένων μεταξύ χρηστών κινητής τηλεφωνίας και πακέτου IP. Η ασφαλής σύνδεση δημιουργείται μεταξύ των συσκευών SDN και του ελεγκτή στον πίνακα ελέγχου.

Πώς λειτουργεί;

1. Οι κανόνες προώθησης εγκαθίστανται σε διακόπτες SDN.
2. Για να παρακολουθούνται τα πακέτα, οι μετρητές συνδέονται με κανόνες για την παροχή πληροφοριών σχετικών με τα πακέτα, τον αριθμό των πακέτων και το μέγεθος του πακέτου στον ελεγκτή. Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για όλη τη ρύθμιση δικτύου (αριθμός ταχύτητας hop, χρόνος καθυστέρησης).
3. Όταν ο χρήστης του κινητού στείλει ένα πακέτο στον άλλο χρήστη του κινητού στο δίκτυο IP, οι συσκευές SDN έρχονται στη διαδρομή προώθησης να ενεργοποιηθούν και να

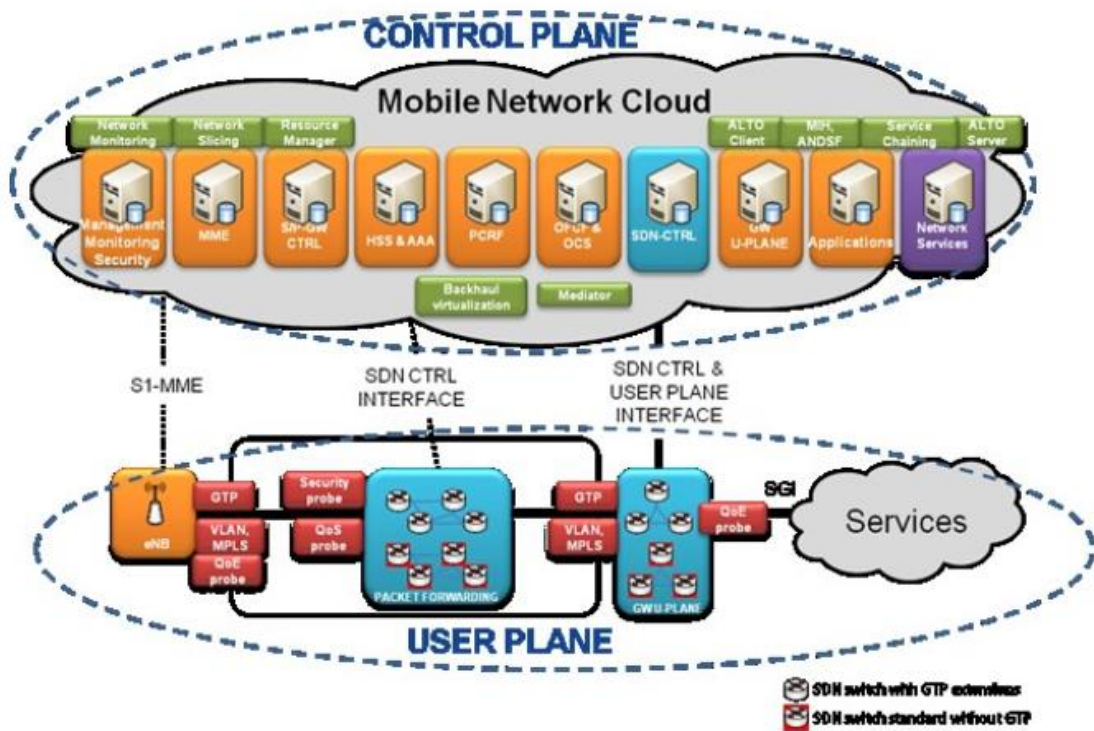
ελέγξουν τη μνήμη τους για να βρουν τους αντίστοιχους κανόνες για τη διεκπεραίωση του πακέτου. Υπάρχουν πιθανότητες να προκύψουν τρεις καταστάσεις:

- α) αν βρεθεί αντιστοιχία τότε το πακέτο προωθείται σύμφωνα με τον κανόνα
- β) αν οι πολλαπλοί κανόνες ταιριάζουν με το πακέτο, αυτό προωθείται από τον κανόνα υψηλότερης προτεραιότητας
- γ) εάν κανένας κανόνας δεν ταιριάζει, τότε οι συσκευές SDN θα ενημερώσουν τον ελεγκτή για περαιτέρω επεξεργασία.

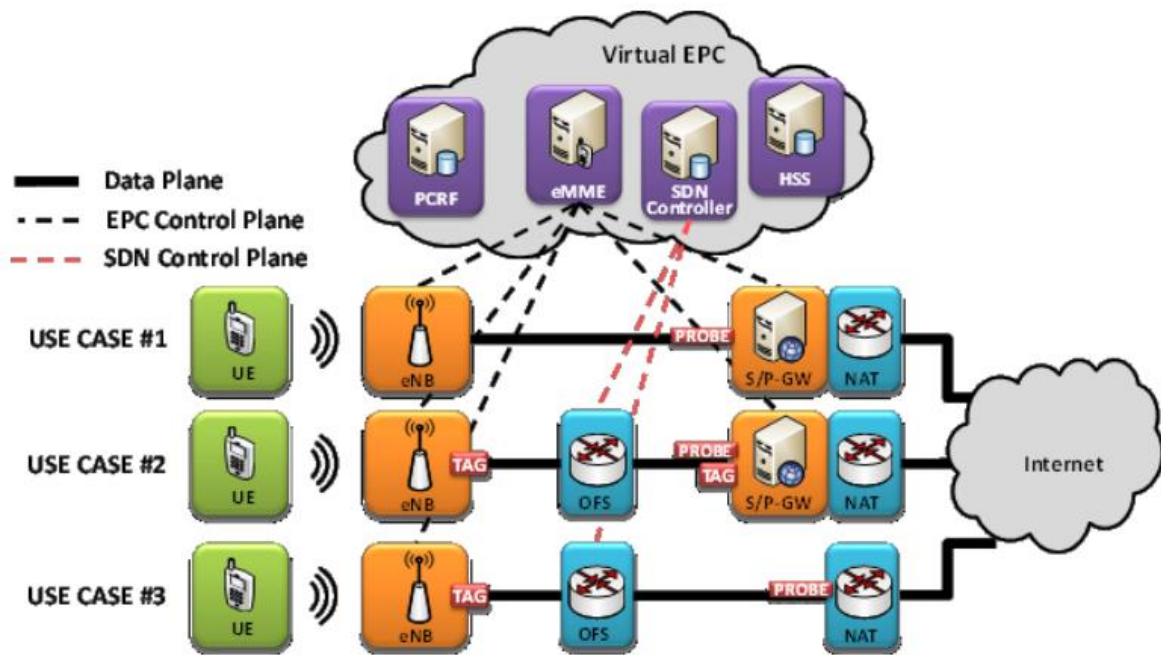
Δυστυχώς, οι διακόπτες SDN έχουν περιορισμένο χώρο για να εγκαταστήσουν όλους τους κανόνες ταυτόχρονα, και έτσι εισάγεται ένας μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης κανόνων για την επέκταση του χώρου κανόνων χρησιμοποιώντας το TCAM ως προσωρινή μνήμη κανόνων υψηλής ταχύτητας που αποθηκεύει τους συχνά χρησιμοποιούμενους κανόνες.

6.4 Αρχιτεκτονική με βάση το SDN

Επί του παρόντος, υπάρχουν μόνο λίγες σε βάθος επιστημονικές συμβολές που ασχολούνται με τις αρχιτεκτονικές δικτύων κινητής τηλεφωνίας που συνδυάζουν τις έννοιες του cloud computing, του SDN και του NFV. Οι πρώτες προτάσεις για την αρχιτεκτονική - ειδικά στο πλαίσιο του Cloud-RAN - περιλαμβάνουν τη χαρτογράφηση των λειτουργιών δικτύου που απαιτούνται για την ενοποίηση των κινητών δικτύων με την τεχνολογία SDN. Αυτές οι λειτουργίες είναι μόνο οι λειτουργίες ελέγχου δικτύου κινητής τηλεφωνίας, δηλ. MME, HSS, PCRF και τα επίπεδα ελέγχου του S/P-GW. Επιπλέον λειτουργίες περιλαμβάνουν τη μεταφορά, εξισορρόπηση φορτίου, ασφάλεια, πολιτική, χρέωση, παρακολούθηση, QoE ή βελτιστοποίηση πόρων. Αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται στο Cloud Mobile Network ως εφαρμογές SDN και επιβάλλουν την επιθυμητή λειτουργία μέσω τεχνολογίας SDN. Με αυτήν την προσέγγιση, το επίπεδο χρήστη αποτελείται μόνο από στρατηγικά τοποθετημένους διακόπτες με δυνατότητα SDN και απλούς διακόπτες. Οι διακόπτες με SDN θα μπορούσαν είτε να αντικαταστήσουν εν μέρει είτε εξ ολοκλήρου το τρέχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας [56-57]. Αυτή η ενοποιημένη αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα 28.



Σχήμα 28. SDMN αρχιτεκτονική προς το 5G



Σχήμα 29. Ομαλή μετεγκατάσταση 3 βημάτων προς το SDMN

Τα απαιτούμενα στοιχεία του δικτύου EPC εκτελούνται στο σύννεφο (cloud) για να επωφεληθούν από την εικονικοποίηση. Οι περιορισμοί της καθυστέρησης θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τοποθεσία ανάπτυξης ορισμένων υπολογιστικών κόμβων που εκτελούνται εικονικά. Ορισμένες στρατηγικές λειτουργίες θα μπορούσαν να τοποθετηθούν κοντά στα eNB ή ακόμα και σε ορισμένους διακόπτες, δημιουργώντας ένα αποκεντρωμένο σύννεφο.

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, τα στοιχεία του δικτύου EPC διατηρούν τις τρέχουσες διεπαφές 3GPP για να ευνοήσουν τη μετάβαση από τα κινητά δίκτυα παλαιού τύπου. Το σχήμα 29 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο μετάβασης σε 3 βήματα χρησιμοποιώντας το OpenFlow ως πρωτόκολλο επικοινωνίας SDN. Η πρώτη περίπτωση χρήσης (δηλ. UC1) ακολουθεί μια παραδοσιακή δρομολογημένη αρχιτεκτονική LTE, με κληροδοτημένους κόμβους. Η δεύτερη περίπτωση χρήσης (δηλ. UC2) εισάγει την τεχνολογία SDN για τη διαχείριση διαδρομών μεταγωγής στο δίκτυο κινητού πυρήνα, διατηρώντας παράλληλα τους κληρονομικούς κόμβους. Αυτό το σενάριο αποτελεί μια υβριδική προσέγγιση που επιτρέπει την απομόνωση των δικτύων ενοικιαστών χρησιμοποιώντας τυπικές τεχνολογίες εγκαψούλωσης, δηλαδή VLAN ή MPLS. Τέλος, η τρίτη περίπτωση χρήσης (δηλ. UC3) απεικονίζει ένα πλήρως συμβατό δίκτυο SDN. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι προδιαγραφές του 3GPP tunneling δεν υποστηρίζονται από τις τρέχουσες προδιαγραφές του OpenFlow και επομένως έχουν αντικατασταθεί από συμμορφούμενες και αποτελεσματικότερες ενθυλακώσεις (encapsulations). Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης μπορούν να συνυπάρξουν, επιτρέποντας στις υβριδικές εφαρμογές να επωφεληθούν από τις υπάρχουσες συσκευές δικτύου.

6.5 Η αρχιτεκτονική του SDMN

Τα κινητά δίκτυα χρειάζονται μια αρχιτεκτονική SDN που προσφέρει πλούσιο σε πραγματικό χρόνο έλεγχο χωρίς να θυσιάζεται η δυνατότητα κλιμάκωσης. Προχωρώντας προς τα κάτω από τις πλατφόρμες ελέγχου προς τους σταθμούς βάσης, προτείνονται τέσσερις κύριες επεκτάσεις για να δοθεί τη δυνατότητα στο SDN σε κυψελοειδή δίκτυα. Πρώτον, οι εφαρμογές ελεγκτή θα πρέπει να είναι σε θέση να εκφράζουν την πολιτική όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των συνδρομητών, αντί των διευθύνσεων IP ή των φυσικών τοποθεσιών, όπως καταγράφονται στη βάση πληροφοριών των συνδρομητών. Δεύτερον, για να βελτιωθεί η δυνατότητα κλιμάκωσης του επιπέδου ελέγχου, κάθε διακόπτης πρέπει να εκτελεί έναν τοπικό έλεγχο που εκτελεί απλές ενέργειες (όπως μετρητές κυκλοφορίας και σύγκρισή τους με ένα όριο), κατόπιν εντολής του ελεγκτή. Τρίτον, οι διακόπτες θα πρέπει να υποστηρίζουν πιο ευέλικτη λειτουργικότητα του επιπέδου δεδομένων, όπως η βαθιά επιθεώρηση πακέτων και η συμπίεση κεφαλίδας. Τέταρτον, οι σταθμοί βάσης πρέπει να υποστηρίζουν τον απομακρυσμένο έλεγχο των εικονικοποιημένων ασύρματων πόρων για να επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση των κυψελών.

6.5.1 Ο ελεγκτής

Ο ελεγκτής του SDN αποτελείται από ένα λειτουργικό σύστημα δικτύου (NOS) που εκτελεί μια συλλογή ενοτήτων των εφαρμογών, όπως το radio resource management, η διαχείριση της κινητικότητας και η δρομολόγηση. Ο χειρισμός μεμονωμένων πακέτων εξαρτάται συχνά από πολλαπλές μονάδες. Για παράδειγμα, η ροή της κίνησης μέσω του δικτύου εξαρτάται από την τοποθεσία του συνδρομητή (καθορίζεται από τον διαχειριστή κινητικότητας) και τις διαδρομές μεταξύ ζευγών στοιχείων δικτύου (καθορίζεται από τη δρομολόγηση υποδομής) και η παρακολούθηση της κυκλοφορίας και ο προγραμματισμός πακέτων εξαρτώνται από τον κανόνα πολιτικής και την λειτουργία κανόνων χρέωσης. Ως εκ τούτου, το NOS θα πρέπει να υποστηρίξει τη σύνθεση ώστε να συνδυάσει τα αποτελέσματα των πολλαπλών ενοτήτων σε ένα ενιαίο σύνολο κανόνων χειρισμού πακέτων σε κάθε διακόπτη [58].

Πολλές από τις ενότητες της εφαρμογής του ελεγκτή πρέπει να εφαρμόζουν πολιτική βασισμένη στις ιδιότητες των συνδρομητών, συμπεριλαμβανομένου και του παρόχου του δικτύου (π.χ. αν ο χρήστης βρίσκεται σε περιαγωγή ή όχι), τύπου συσκευής (π.χ., εάν ο χρήστης έχει ένα παλαιό τηλέφωνο που απαιτεί echo ακύρωση), είδους συνδρομητή (π.χ. ανώτατο όριο χρήσης, γονικός έλεγχος κ.λπ.) και πρόσφατης χρήσης (π.χ., εάν ο χρήστης πλησιάζει το όριο χρήσης). Ωστόσο, οι διακόπτες αντιστοιχούν σε πακέτα και εκτελούν ενέργειες βάσει πεδίων κεφαλίδων πακέτων, με βάση εφήμερα αναγνωριστικά στοιχεία όπως η τρέχουσα διεύθυνση IP και η τοποθεσία του συνδρομητή. Για να γεφυρωθεί το κενό, ο ελεγκτής μπορεί να διατηρεί μια βάση των πληροφοριών των συνδρομητών (SIB), η οποία αποθηκεύει και διατηρεί πληροφορίες συνδρομητών, συμπεριλαμβανομένων σχετικώς στατικών χαρακτηριστικών συνδρομητών καθώς και δυναμικών δεδομένων, όπως η τρέχουσα διεύθυνση IP, η τοποθεσία και η συνολική κατανάλωση δεδομένων του χρήστη. Το NOS μπορεί να μεταφράσει τις πολιτικές που εκφράζονται με όρους ιδιοτήτων συνδρομητών σε κανόνες μεταγωγής που ταιριάζουν στις κεφαλίδες των πακέτων.

Ομοίως, το NOS μπορεί να μεταφράσει μετρήσεις δικτύου (όπως μετρητές κυκλοφορίας) στους κατάλληλους συνδρομητές (σύνολα), ώστε οι ενότητες εφαρμογής να επικεντρωθούν στους συνδρομητές και τα χαρακτηριστικά τους παρά στα εφήμερα αναγνωριστικά δικτύου. Ο ελεγκτής μπορεί επίσης να διαιρέσει δυναμικά το δίκτυο σε "κομμάτια" που χειρίζονται όλη την κυκλοφορία ταιριάζοντας κάποιο κατηγορημα στα χαρακτηριστικά του συνδρομητή. Αυτό επιτρέπει στον πάροχο κινητής τηλεφωνίας να απομονώνει την κυκλοφορία δεδομένων της περιαγωγής, και την κίνηση δεδομένων του τηλεφώνου που χρησιμοποιεί πρωτόκολλα παλαιού τύπου. Για να ενεργοποιηθεί το κομμάτι της κλιμάκωσης, ο ελεγκτής μπορεί να καθοδηγήσει τους διακόπτες εισόδου για να επισημάνει τα εισερχόμενα πακέτα (π.χ. χρησιμοποιώντας μια ετικέτα MPLS ή ετικέτα VLAN) που αποστέλλονται προς ή από συνδρομητές με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

6.5.2 Οι λειτουργίες των διακοπών

Τα κινητά δίκτυα αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις κλιμάκωσης όσον αφορά τον αριθμό των συνδρομητών, τις συχνές αλλαγές στη θέση των χρηστών, τις πολιτικές ελέγχου πρόσβασης, τις πολιτικές ποιότητας υπηρεσιών και την προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο στις συνθήκες δικτύου. Για παράδειγμα, οι μεταγωγείς μπορεί να χρειαστεί να κατευθύνουν μια ροή βίντεο μέσω ενός διακομιστή μεσολάβησης, εάν στο δίκτυο γίνει συμφόρηση ή να δώσουν χαμηλότερη προτεραιότητα σε κάποια κίνηση. Αυτές οι λειτουργίες μέτρησης και ελέγχου θα μπορούσαν εύκολα να κατακλύσουν έναν λογικά κεντρικό ελεγκτή. Επιπλέον, ο ελεγκτής μπορεί να μην είναι σε θέση να ανταποκριθεί τόσο γρήγορα σε τοπικά γεγονότα, όπως οι βασικοί διακόπτες.

Συγκεκριμένα, κάθε διακόπτης μπορεί να εκτελεί απλές τοπικές ενέργειες, υπό την εντολή του ελεγκτή. Η εκτέλεση αυτών των λειτουργιών στους τοπικούς διακόπτες θα μείωνε το φορτίο στον ελεγκτή και θα επέτρεπε ταχύτερες απαντήσεις σε κρίσιμα συμβάντα.

6.5.3 Ευέλικτη επεξεργασία πακέτων των διακοπών

Οι σημερινοί διακόπτες OpenFlow [59] υποστηρίζουν ήδη πολλά χαρακτηριστικά που απαιτούνται σε κυψελοειδή δίκτυα. Η ευέλικτη ταξινόμηση πακέτων που βασίζεται στα πεδία επικεφαλίδων Ethernet, IP και TCP και UDP επιτρέπει την βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών, τον έλεγχο πρόσβασης και την παρακολούθηση. Οι ενέργειες προώθησης στους σημερινούς διακόπτες OpenFlow θα επιτρέψουν στους μεταφορείς να κατευθύνουν επιλεκτική κυκλοφορία μέσω των μεσαίων γραμμών, να αλλάξουν τις διαδρομές από και προς έναν χρήστη κινητής τηλεφωνίας και να επισημάνουν και να προγραμματίσουν την κυκλοφορία σύμφωνα με τις πολιτικές του QoS. Οι μετρητές byte και πακέτων που σχετίζονται με κάθε κανόνα θα υποστηρίξουν τη μέτρηση της κυκλοφορίας, την προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο με βάση τη συμφόρηση ή την υπέρβαση του ορίου χρήσης του συνδρομητή και τη χρέωση βάσει χρήσης. Παρόλα αυτά, αυτοί οι διακόπτες ίσως να χρειαστούν μεγαλύτερους πίνακες κανόνων ή περισσότερα στάδια των πινάκων από τους σημερινούς διακόπτες για να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τις λεπτές πολιτικές.

Τα καθορισμένα από το λογισμικό κινητά δίκτυα θα ωφεληθούν από τις νέες δυνατότητες μεταγωγής. Τα πρωτόκολλα TCP / UDP δεν είναι πλέον ένας επαρκώς αξιόπιστος τρόπος για τον εντοπισμό εφαρμογών. Αντ' αυτού, η υποστήριξη για βαθιά επιθεώρηση πακέτων (DPI) θα

επέτρεπε την λεπτομερή ταξινόμηση βάσει της εφαρμογής, όπως το Web, το peer-to-peer, το βίντεο και την κίνηση VoIP. Για αυτό είναι σημαντικό να διαιρεθεί η κυκλοφορία σε ξεχωριστές κατηγορίες κυκλοφορίας για διαφορετικές πολιτικές προγραμματισμού και δρομολόγησης πακέτων, όπως συνήθως συμβαίνει στα σημερινά κυψελοειδή δίκτυα [60]. Το DPI θα βοηθούσε επίσης, στην υποστήριξη συστημάτων ανίχνευσης και πρόληψης εισβολών που αναλύουν τα περιεχόμενα πακέτων για τον εντοπισμό κακόβουλης κίνησης. Για την υποστήριξη του DPI, το πρωτόκολλο OpenFlow πρέπει να επεκταθεί για να προσθέσει και να καταργήσει κανόνες. Για να αποφευχθεί η επιθεώρηση κάθε μονάδας DPI σε κάθε πακέτο, ο ελεγκτής SDN μπορεί να διαχειριστεί από κοινού τον πίνακα ροής και τον πίνακα κανόνων DPI.

6.5.4 Σταθμός βάσης: Απομακρυσμένος έλεγχος και εικονικοποίηση

Απομακρυσμένος έλεγχος: Στο LTE, οι σταθμοί βάσης συμμετέχουν σε πρωτόκολλα καταναμημένου ελέγχου για τη διαχείριση της κατανομής των radio resources, της ρύθμισης της περιόδου λειτουργίας / αναδιάταξης / τερματισμού λειτουργίας, της μεταβίβασης και της τηλεειδοποίησης. Τα radio resources είναι εγγενώς κοινόχρηστοι μεταξύ των σταθμών βάσης. Η έλλειψη κεντρικού ελέγχου καθιστά δύσκολη τη βελτιστοποίηση των καθηκόντων που σχετίζονται με το radio access. Το SDN εκθέτει ένα καλά καθορισμένο API το οποίο μπορεί να ελεγχθεί από το επίπεδο ελέγχου. Εκτελώντας το Radio Resource Management (RRM) στην κορυφή ενός λογικά κεντρικού ελεγκτή καθιστά πολύ πιο εύκολη την καινοτομία στον έλεγχο εισαγωγής, την κατανομή των radio resources και τη διαχείριση παρεμβολών. Για παράδειγμα, το RRM μπορεί να ανακατευθύνει ένα UE σε έναν κοντινό ελαφρά φορτισμένο σταθμό βάσης ή να αυξήσει την ισχύ εκπομπής ενός σταθμού βάσης με συμφόρηση. Εάν ο σταθμός βάσης έχει πολλαπλές κεραίες, το επίπεδο ελέγχου μπορεί να αποφασίσει αν οι κεραίες θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση των σημάτων (συνδυασμός ποικιλίας για την ενίσχυση των σημάτων για εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση) ή για χωρική πολυπλεξία (πολλαπλές παράλληλες μεταδόσεις). Παρόλο που οι σταθμοί βάσης 3G ελέγχονται από μια κεντρική οντότητα, ο ελεγκτής ασύρματου δικτύου (RNC) συνδέει τη λειτουργικότητα του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των εργασιών όπως ο προγραμματισμός των πακέτων. Αντίθετα, η ενότητα RRM θα πρέπει να εκτελεί μόνο λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου και να καθοδηγεί το σταθμό βάσης να εκτελεί οποιαδήποτε ενέργεια επιπέδου δεδομένων.

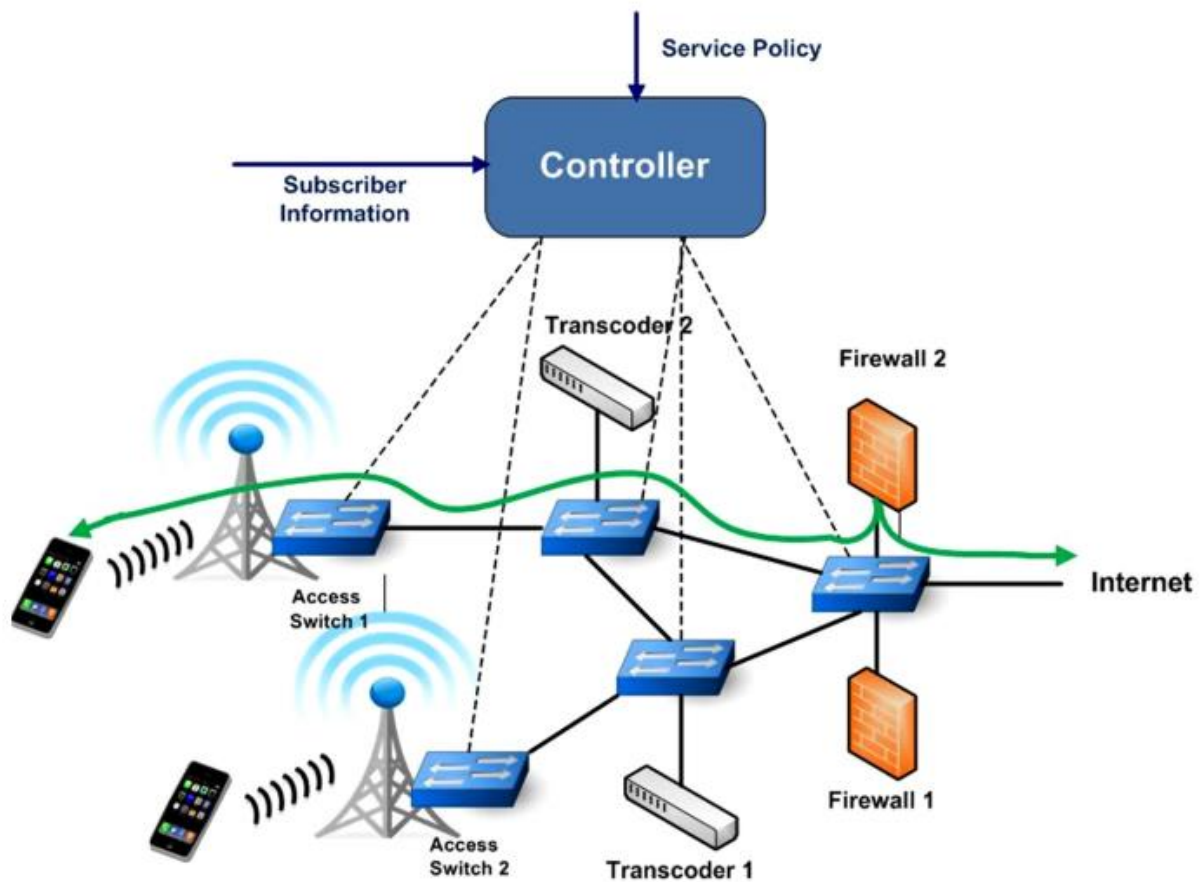
Εικονικοποίηση: Οι σημερινές λύσεις απεικόνισης του SDN όπως το FlowVisor [61] μπορούν να μοιράζονται ένα ενιαίο επίπεδο δεδομένων μεταγωγής μεταξύ πολλών εικονικών δικτύων. Όπως συμβαίνει μεταξύ του λογισμικού και του υλικού σε έναν υπολογιστή, το FlowVisor χρησιμοποιεί το OpenFlow ως στρώμα αφαίρεσης υλικού για να "καθίσει" λογικά μεταξύ διαδρομών ελέγχου και προώθησης σε μια συσκευή δικτύου. Το FlowVisor είναι "διαφανές" τόσο στο υλικό του δικτύου όσο και στον ελεγκτή που διαχειρίζεται τα εικονικά δίκτυα. Το FlowVisor ορίζει ένα τμήμα ως σύνολο ροών που τρέχει σε μια τοπολογία διακόπτη. Το στρώμα εικονικοποίησης ενισχύει την ισχυρή απομόνωση μεταξύ των τμημάτων. Οι πόροι που μπορούν να τμηματοποιηθούν είναι το εύρος ζώνης, η τοπολογία, η κυκλοφορία, η CPU της συσκευής και οι πίνακες προώθησης.

Οι τεχνολογίες όπως το FlowVisor μπορούν να επεκταθούν σε πόρους σταθμού βάσης, για παράδειγμα, για τη δημιουργία εικονικών σταθμών βάσης. Ο πόρος του εικονικού σταθμού βάσης μπορεί να είναι ένας συνδυασμός χρονικών θυρίδων, subcarriers και ισχύος. Για παράδειγμα, ένας εικονικός σταθμός βάσης μπορεί να διαθέτει ένα υποσύνολο χρονικών θυρίδων και η μετάδοση σε κάθε χρονική θυρίδα μπορεί να χρησιμοποιήσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής ή ένα υποσύνολο υποφορέων σε όλες τις χρονικές θυρίδες και η μετάδοση σε κάθε χρονική θυρίδα χρησιμοποιεί ένα κλάσμα της μέγιστης μετάδοσης ισχύος. Ένα τμήμα μπορεί να ζητήσει σταθμούς βάσης με ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο MAC. Για να υποστηρίξει την εικονικοποίηση του σταθμού βάσης, χωρίς να τροποποιεί τα πρωτόκολλα φυσικού επιπέδου, ο ελεγκτής μπορεί να μεταδώσει πληροφορίες υψηλού επιπέδου όπως η ταυτότητα του εικονικού παροχέα μέσω του επιπέδου ελέγχου. Αυτό θα επέτρεπε στο λογισμικό του UE να εμφανίζει τον εικονικό πάροχο (αντί των πληροφοριών φυσικής εκπομπής του παρόχου) χωρίς να απαιτείται ρητή μετάδοση των πληροφοριών του παρόχου και του αναγνωριστικού της κυψέλης.

6.6 Προτάσεις αρχιτεκτονικής για κινητά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασισμένα σε SDN

Αν και η αρχιτεκτονική SDN σχεδιάστηκε για ενσύρματα δίκτυα, η εφαρμογή της τεχνολογίας SDN στον τομέα των κινητών τηλεφώνων κερδίζει όλο και περισσότερη προσοχή από τις ερευνητικές κοινότητες. Η ανάπτυξη "προγραμματιζόμενων κινητών δικτύων", που επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση και τη διαμόρφωση, θεωρείται ένα βήμα προς τη σωστή κατεύθυνση για την αντιμετώπιση των ελλείψεων των παραδοσιακών κινητών δικτύων. Ως εκ τούτου, στο υπόλοιπο αυτής της ενότητας παρέχετε μια επισκόπηση των διαφόρων projects που ασχολούνται με κινητά κυψελοειδή δίκτυα που ενσωματώνουν την έννοια SDN.

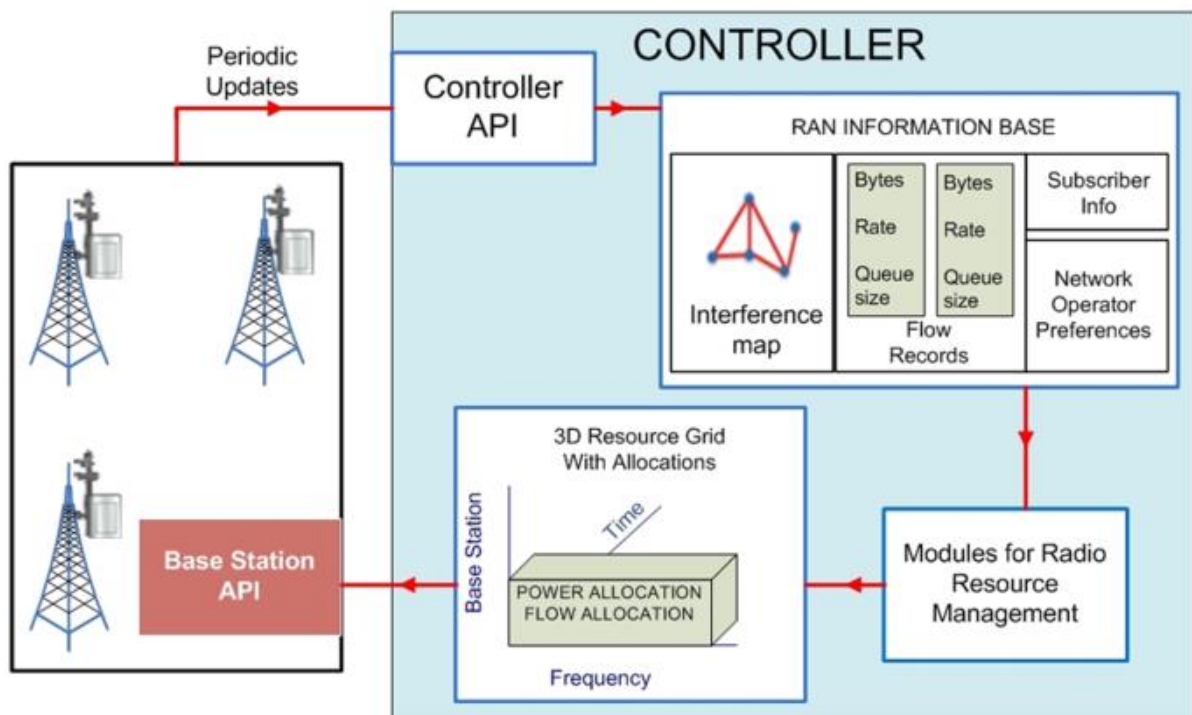
Ένα από αυτά τα projects είναι το SoftCell [63], το οποίο παρέχει ένα πλαίσιο για την ενσωμάτωση των αρχών SDN σε δίκτυα πυρήνα 4G LTE (Long Term Evolution). Η βασική ιδέα είναι να δημιουργηθεί ένα κινητό δίκτυο που αποτελείται από απλούς προγραμματιζόμενους κεντρικούς διακόπτες, με τις περισσότερες λειτουργίες τους να μετακινούνται στους διακόπτες πρόσβασης (κοντά στον σταθμό βάσης). Αυτό γίνεται επειδή η εφαρμογή της καθαρής αρχιτεκτονικής του SDN (που συνεπάγεται με την εντελώς απουσία λειτουργιών ελέγχου στο επίπεδο δεδομένων) στα κινητά κυψελοειδή δίκτυα εισάγει ορισμένες μεγάλες προκλήσεις κλιμάκωσης. Για παράδειγμα, λόγω της κινητικότητας των χρηστών, το επίπεδο δεδομένων θα δημιουργήσει έναν μεγάλο αριθμό ενημερώσεων της κατάστασης των χρηστών, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει συμφόρηση στον ελεγκτή. Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική καθυστέρηση μέσης απόκρισης, είναι απαραίτητο να μειωθεί η ποσότητα της κυκλοφορίας ελέγχου που ανταλλάσσουν ο ελεγκτής και οι συσκευές δικτύου. Εξαιτίας αυτού, στο SoftCell, η λεπτομερής ταξινόμηση πακέτων για την κίνηση από τους UE πραγματοποιείται μόνο στους διακόπτες πρόσβασης. Δεδομένου ότι ο διακόπτης πρόσβασης πρέπει να χειρίζεται μόνο την κίνηση από τον σταθμό βάσης που συνδέεται με αυτό, η λύση αυτή είναι πολύ πιο κλιμακωτή από την παραδοσιακή σχεδίαση LTE, όπου μερικοί PGWs διαχειρίζονται την κυκλοφορία από όλους τους σταθμούς βάσης. Επίσης, οραματίζεται να εκτελούν κάποιες απλές λειτουργίες επιπέδου ελέγχου, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η αλληλεπίδραση με τον κεντρικό ελεγκτή.



Σχήμα 30. Αρχιτεκτονική SoftCell [63]

Αντίθετα από το SoftCell που επικεντρώνεται στον επανασχεδιασμό του κεντρικού δικτύου, το SoftRAN [62] χρησιμοποιεί τις αρχές SDN για τον επανασχεδιασμό του δικτύου πρόσβασης LTE. Επί του παρόντος, τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης χρησιμοποιούν διανεμημένα πρωτόκολλα για τη διαχείριση των παρεμβολών και την εκτέλεση των παραδόσεων (handovers). Ενώ αυτή η λύση είναι αποδεκτή σε αραιό περιβάλλον, σε πυκνά δίκτυα οδηγεί σε κακές επιδόσεις, καθώς η επικοινωνία μεταξύ μεγάλου αριθμού σταθμών βάσης, που είναι απαραίτητη για αποτελεσματικό χειρισμό παρεμβολών και κινητικότητας, προκαλεί σοβαρή καθυστέρηση. Στο SoftRAN ολόκληρο το δίκτυο LTE ελέγχεται με κεντρικό τρόπο: όλοι οι σταθμοί βάσης που αναπτύσσονται σε τοπική γεωγραφική περιοχή αντιμετωπίζονται ως ένας εικονικός σταθμός μεγάλης βάσης, ο οποίος αποτελείται από τους φυσικούς σταθμούς βάσης και διαχειρίζεται από τον ελεγκτή του SDN. Τα radio resources που διαθέτει το δίκτυο στη διάθεσή του εξάγονται ως τρισδιάστατο πλέγμα χωρητικότητας χώρου, χρόνου και συχνότητας. Ο ελεγκτής SDN λαμβάνει περιοδικά πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του τοπικού δικτύου από όλα τα radio elements και βάσει αυτού αποφασίζει πού να εκχωρήσει ποιο μπλοκ συχνοτήτων και καθορίζει την ισχύς της μετάδοσης για

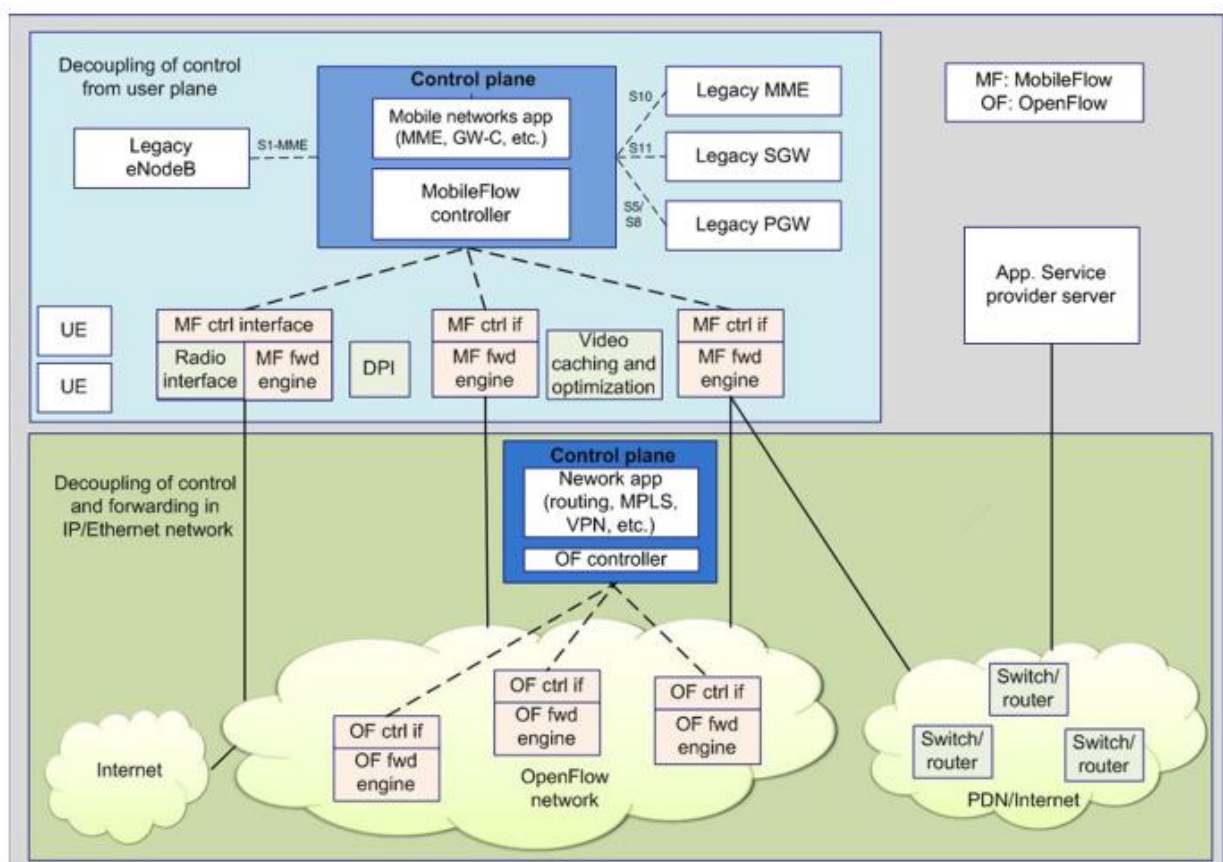
καθένα από αυτά. Όπως φαίνεται στο σχήμα 31, ενώ λαμβάνει μια απόφαση, ο ελεγκτής λαμβάνει υπόψη το επίπεδο παρεμβολής στα κανάλια επικοινωνίας, τα στατιστικά στοιχεία ροής, το προφίλ του συνδρομητή και τις προτιμήσεις του παρόχου του δικτύου. Το SoftRAN αντιμετωπίζει την εγγενή καθυστέρηση μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των επιμέρους radio elements μεταβάλλοντας τα στοιχεία ελέγχου των radio elements για τα οποία είναι απαραίτητη μόνο η γνώση των τοπικών παραμέτρων του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, όλες οι αποφάσεις ελέγχου που επηρεάζουν την κατάσταση του παγκόσμιου δικτύου (π.χ. handovers, ρυθμίσεις μετάδοσης ισχύος) πραγματοποιούνται από τον κεντρικό ελεγκτή. Αυτή η οργάνωση του επιπέδου ελέγχου επιτρέπει στο δίκτυο να προσαρμόζεται σε ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού.



Σχήμα 31. SoftRAN αρχιτεκτονική [62]

Η αρχιτεκτονική του MobileFlow [64] έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να διευκολύνει τη μετάβαση από παραδοσιακά σε δίκτυα που έχουν καθοριστεί από λογισμικό. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 32, αποτελείται από forwarding engines του MobileFlow (MFFE), οι οποίοι είναι διασυνδεδεμένοι με δίκτυο μεταφοράς IP/Ethernet και ενός ελεγκτή MobileFlow (MFC). Σύμφωνα με τις βασικές αρχές SDN, ο έλεγχος του δικτύου κινητής τηλεφωνίας συγκεντρώνεται στο MFC και διαχωρίζεται από τα στοιχεία του επιπέδου δεδομένων (MFFEs). Τα MFFEs οδηγούνται πλήρως από το λογισμικό, δηλαδή η συμπεριφορά τους καθορίζει το MFC μέσω του κατάλληλου API (Application Programming Interface). Για παράδειγμα, οι εφαρμογές που λειτουργούν πάνω από το MFC μπορούν να εφαρμόσουν τη λειτουργία ελέγχου για κάθε στοιχείο του EPS, πράγμα που σημαίνει ότι ο φορέας εκμετάλλευσης μπορεί να κατασκευάσει ευρυζωνικό δίκτυο υψηλής απόδοσης χωρίς

περίπλοκες συσκευές όπως τα E-NodeBs, PGWs και SGWs. Με παρόμοιο τρόπο, μπορεί να αναπτυχθεί οποιαδήποτε άλλη υπάρχουσα ή νέα κινητή τεχνολογία. Το δίκτυο μεταφοράς IP/Ethernet έχει επίσης καθοριστεί από το λογισμικό και χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο OpenFlow για επικοινωνία μεταξύ ελεγκτή και διακόπτη. Ωστόσο, οι δυνατότητες που προσφέρει το OpenFlow δεν επαρκούν για το επίπεδο δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Τα MFFE υποστηρίζουν την λειτουργία του tunneling και την ευέλικτη επιφόρτιση. Αυτό τους καθιστά πιο πολύπλοκους από τους διακόπτες του OpenFlow, αλλά και πολύ πιο απλούστερους από τα παραδοσιακά στοιχεία του EPS, αφού η πλειονότητα των λειτουργιών του επιπέδου ελέγχου μετατοπίζεται στο MFC. Χάρη στην ικανότητα του tunneling, τα MFFE, με την υποστήριξη ενός MFC, μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα στοιχεία EPC παλαιού τύπου.



Σχήμα 32. Αρχιτεκτονική του MobileFlow [64]

7. Αξιολόγηση του SDMN

7.1 Ανάγκη για μια νέα αρχιτεκτονική δικτύων για τους χρήστες των Mobile Networks

Η κίνηση δεδομένων παγκοσμίως αυξήθηκε κατά 63% το 2016 [37]. Η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας έφθασε τα 7,2 exabytes το μήνα στα τέλη του 2016, από 4,4 exabytes το μήνα στα τέλη του 2015 [37], ενώ τα έσοδα ανά χρήστη έχουν μειωθεί. Ταυτόχρονα, οι τιμές των συσκευών μειώνονται κατά 10 έως 20% και τελικά μειώνεται η κερδοφορία. Τα μειούμενα κέρδη αφήνουν στον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας μικρότερο ποσό επαναχρησιμοποιούμενων κεφαλαίων για επέκταση των υπηρεσιών. Καθώς μειώνονται τα έσοδα, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας δεν έχουν την δυνατότητα να επανεπενδύσουν για επέκταση και αναβάθμιση των υπηρεσιών τους, ενώ την ίδια στιγμή πρέπει να επενδύσουν σε γρηγορότερα mobile networks για να ικανοποιήσουν τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των πελατών τους. Επομένως, είναι σημαντικό να μειωθεί το κόστος της δομής του δικτύου. Ένας από τους κύριους συντελεστές στη δομή του κόστους των φορέων εκμετάλλευσης δικτύου είναι οι συσκευές δικτύου. Το μεγαλύτερο μέρος του σημερινού εξοπλισμού δικτύου είναι εξαιρετικά εξειδικευμένο και μονολιθικό (δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ των δυνατοτήτων ελέγχου και προώθησης).

Στο σημερινό δυναμικό περιβάλλον, οι πάροχοι πρέπει να είναι ικανοί να αξιοποιήσουν τις νέες δυνατότητες και υπηρεσίες ώστε να παραμείνουν ανταγωνιστικοί. Αυτή η άνιση μάχη μεταξύ των απαιτήσεων της αγοράς και των δυνατοτήτων του δικτύου έχει ως συνέπεια την επανεξέταση της αποτελεσματικότητας της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Διαχωρίζοντας το control από το data plane, παρέχεται η δυνατότητα στον πάροχο να μειώσει το συνολικό κόστος και ταυτόχρονα να παρέχει στους χρήστες δικτύου υπηρεσίες εξαιρετικά καινοτόμες. Με τον διαμοιρασμό ενός φυσικού πλέγματος μεταξύ πολλών παρόχων κινητών δικτύων επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αποδοτικότητα των υπάρχοντων πηγών και μεγαλύτερο εύρος κάλυψης.

Ένας άλλος βασικός συντελεστής του κόστους της υποδομής ενός διαχειριστή δικτύου είναι το κόστος της φυσικής υποδομής. Αν μοιραστεί ένα φυσικό δίκτυο μεταξύ διαφόρων φορέων εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών, τότε μπορεί να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα στη διαχείριση και αξιοποίηση των υφιστάμενων πόρων, και άρα ευρύτερη κάλυψη. Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων έχουν ήδη υιοθετήσει μια μορφή παθητικής ανταλλαγής με κοινή χρήση των πόρων. Εντούτοις, η ενεργός κατανομή των πόρων είναι ασυνήθιστη, καθώς μπορεί να απαγορευθεί ώστε να διασφαλιστεί ότι υπάρχει επαρκής ανταγωνισμός μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης του δικτύου. Ο βαθμός διαφοροποίησης μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης δικτύου μειώνεται επίσης, όταν μοιράζονται ενεργά πόρους.

7.2 Τεχνική και επιχειρηματική ανάλυση των SDMN

7.2.1. Τεχνική ανάλυση του SDMN

Το SDMN είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου, στην οποία διαχωρίζεται το control plane από το data plane και υπάρχει περισσότερη ελευθερία επιλογής στον προγραμματισμό. Η νοημοσύνη του δικτύου είναι (λογικά) συγκεντρωμένη σε ελεγκτές SDN που βασίζονται σε λογισμικό, και οι οποίοι διατηρούν μια συνολική εικόνα του δικτύου [38]. Ο ελεγκτής SDN έχει συνήθως γνώση σχετικά με τη φυσική τοπολογία του δικτύου, είτε με μηχανισμούς ανακάλυψης είτε με κατάλληλες βάσεις δεδομένων και μπορεί με βάση αυτήν την τοπολογία να δημιουργήσει διαδρομές που προγραμματίζονται στις μηχανές προώθησης των συσκευών δικτύου. Στην ουσία, το SDN περιγράφει το δίκτυο όπως ένα λειτουργικό σύστημα περιγράφει τις εφαρμογές από το υλικό.

Το OpenFlow θεωρείται αυτό που καθιστά δυνατή την ύπαρξη του SDN [39]. Είναι μία σταθερή διεπαφή επικοινωνίας που ορίζεται ανάμεσα στα επίπεδα του control & data plane στην αρχιτεκτονική SDN. Το OpenFlow επιτρέπει την άμεση πρόσβαση και τον χειρισμό των συσκευών του data plane, όπως είναι τα routers, switches. Ο OpenFlow controller καθορίζει το μονοπάτι που θα ακολουθήσουν τα πακέτα μέσω διακοπών του δικτύου OpenFlow.

Ο OpenFlow αποτελεί ως παράγοντα του SDN μια λύση για την αναντιστοιχία μεταξύ των απαιτήσεων της αγοράς και των δυνατοτήτων του δικτύου, καθώς παρέχει μια ανοικτή διεπαφή επικοινωνίας μεταξύ των CP & DP, επιτρέποντας στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου να εξαρτώνται λιγότερο από τον προμηθευτή.

Η εικονικοποίηση δικτύων είναι μια μέθοδος για τη χρήση των φυσικών πόρων σε ένα δίκτυο, χωρίζοντας τους πόρους σε κομμάτια. Κάθε κομμάτι απομονώνεται από τα άλλα κανάλια και μπορεί να εκχωρηθεί σε μία συγκεκριμένη συσκευή δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η παρακολούθηση και η διαχείριση του δικτύου είναι δυνατή από έναν υπολογιστή. Η εικονικοποίηση δικτύων επιτρέπει πολλαπλά απομονωμένα λογικά δίκτυα να μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή, κάθε ένα με δυνητικά ανεξάρτητους μηχανισμούς διευθυνσιοδότησης και προώθησης.

7.2.2 Ποιοτική αξιολόγηση του κόστους του SDMN.

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (capex) συμβάλλουν στη σταθερή υποδομή της εταιρείας και αποσβένονται με την πάροδο του χρόνου. Για έναν πάροχο δικτύου, περιλαμβάνουν την αγορά γης και κτιρίων (π.χ. στέγαση του προσωπικού), υποδομή δικτύου (π.χ. οπτικές ίνες και δρομολογητές IP) και λογισμικό (π.χ. σύστημα διαχείρισης δικτύου). Οι λειτουργικές δαπάνες (opex) δεν συνεισφέρουν στην υποδομή, αλλά αντιπροσωπεύουν το κόστος διατήρησης της επιχείρησης και περιλαμβάνουν το κόστος των τεχνικών και εμπορικών εργασιών, της διοίκησης κ.λπ. Για έναν πάροχο δικτύου, τα opex αποτελούνται κυρίως από την μισθωμένη υποδομή (γη, κτίριο, εξοπλισμός δικτύου, ίνες κ.λπ.) και τους μισθούς του προσωπικού [40]. Περαιτέρω προσδιορίζουν και ορίζουν κατηγορίες επιχειρησιακών δαπανών. Μια επισκόπηση των μειώσεων του κόστους για

τα σενάρια που εξετάζουμε παρέχεται στο παρακάτω σχήμα. Ένα βήμα πέρα από το σενάριο του SDN, την εικονικοποίηση των δικτύων και την κοινή χρήση δικτύου μεταξύ διαφόρων φορέων εκμετάλλευσης δικτύου αποτελεί το shared scenario. Η τιμή 0 δηλώνει ότι δεν υπάρχει κάποια επίδραση στο κόστος, η τιμή -1 δηλώνει μείωση του κόστους, και τέλος η τιμή -2 δηλώνει ακόμα μεγαλύτερη μείωση του κόστους.

	capex	opex				
		κόστος υποδομής	κόστος συντήρησης	έξοδα επισκευής	κόστος παροχής υπηρεσιών	κόστος για την πρώτη εγκατάσταση
Classical Scenario	0	0	0	0	0	0
SDN Scenario	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Shared Scenario	-2	-2	-2	-2	-1	-1

Σχήμα 33. Μειώσεις του κόστους σε opex & capex σε τρία σενάρια [42].

7.2.3 Capex με τη χρήση SDMN

Στην περίπτωση του SDN τα περίπλοκα χαρακτηριστικά δεν χρειάζονται σε κάθε συσκευή, επομένως οι συσκευές είναι απλούστερες και φθηνότερες. Παρόλα αυτά, τα έξοδα κεφαλαίου θα αυξηθούν εξαιτίας του κόστους των controllers του OpenFlow όπως είναι οι line cards, transceivers που απαιτούνται για να συνδεθούν οι συσκευές δικτύου με το OpenFlow. Ωστόσο, το SDN παρέχει ένα καθολικό οπτικό πεδίο στην χρήση του δικτύου επιτρέποντας την κίνηση δεδομένων. Αυτό επιτρέπει αποδοτικότερη χρήση δικτύου και μείωση των εξόδων κεφαλαίου.

Τα βασικά κέρδη απόδοσης σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μπορούν να επιτευχθούν, στο δίκτυο πρόσβασης, μέσω της κοινής χρήσης του σταθμού βάσης. Λόγω της κατανομής του εξοπλισμού δικτύου και της συνάθροισης της κυκλοφορίας, ορισμένος εξοπλισμός θα καταστεί περιττός και γενικά τα ποσοστά χρήσης θα αυξηθούν. Τα κέρδη ανταλλαγής θα είναι χαμηλότερα, κοντά στο βασικό δίκτυο, επειδή η κυκλοφορία έχει ήδη συγκεντρωθεί και κάθε φορέας εκμετάλλευσης μπορεί να χρησιμοποιήσει ήδη σε πλήρη έκταση τον εξοπλισμό του.

7.2.4 Opex με τη χρήση SDMN

Το συνεχές κόστος της υποδομής για το σενάριο SDN θα είναι χαμηλότερο, επειδή το κόστος για την ενέργεια και την ενέργεια ψύξης μειώνεται καθώς δεν υπάρχει περισσότερη κατανάλωση ενέργειας από το επίπεδο ελέγχου στους διακόπτες δικτύου [42]. Επιπλέον, το SDN επιτρέπει καλύτερη ρύθμιση της κυκλοφορίας μειώνοντας τον αριθμό των συσκευών δικτύου και την κατανάλωση ενέργειας. Το ενεργειακό κόστος θα είναι ακόμα χαμηλότερο για το σενάριο κατανομής, ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης χρήσης του εξοπλισμού δικτύου. Ο πρόσθετος ελεγκτής OpenFlow, εάν δεν είναι ενσωματωμένος, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με ένα κλασσικό σενάριο χωρίς ελεγκτές OpenFlow.

Το κόστος συντήρησης θα είναι χαμηλότερο στο σενάριο SDN. Το SDN δημιουργεί ένα ενιαίο συνεκτικό σύστημα, σε αντίθεση με παλαιότερες αρχιτεκτονικές, όπου απαιτείται η διαχείριση και διατήρηση μιας δέσμης ανεξάρτητων αυτόνομων συσκευών [42]. Ένα παράδειγμα είναι το κόστος συντήρησης του λογισμικού. Η διαχείριση του λογισμικού θα είναι ευκολότερη, επειδή ο αριθμός των εκδόσεων λογισμικού που εκτελούνται μειώνεται σε έναν τουλάχιστον. Υπάρχουν παρόμοια αποτελέσματα για τη διαχείριση της ασφάλειας και τη διαχείριση αποθεμάτων. Το κόστος διατήρησης του σεναρίου κοινής χρήσης, όπως η προληπτική αντικατάσταση του εξοπλισμού, μοιράζεται μεταξύ πολλών χειριστών.

Τα έξοδα επισκευής μπορούν να μειωθούν στο σενάριο SDN λόγω των καλύτερων δυνατοτήτων δοκιμής πριν από την ανάπτυξη, γεγονός που θα μειώσει τον αριθμό των σφαλμάτων που μπορούν να φτάσουν από την παραγωγή στην πραγματική κυκλοφορία [42]. Η κοινή χρήση του εξοπλισμού θα μειώσει περαιτέρω το κόστος επισκευής καθώς κάθε χειριστής μπορεί να αναλάβει ευθύνη για ένα μέρος του δικτύου (π.χ. κάθε μισό του δικτύου). Παρόλα αυτά, ένα μεγάλο μειονέκτημα του SDN είναι η πιθανή δυσλειτουργία του ελεγκτή OpenFlow λόγω νευραλγικής θέσης. Οι αποτυχίες σε αυτά τα στοιχεία δικτύου μπορούν να αποσταθεροποιήσουν ολόκληρο το δίκτυο.

Το κόστος παροχής υπηρεσιών μπορεί να μειωθεί επειδή το SDN επιτρέπει την αυτόματη διαμόρφωση του δικτύου [42]. Σήμερα έμπειρο προσωπικό δικτύωσης είναι υποχρεωμένο να δημιουργήσει, να διαχειριστεί, να αλλάξει και να διατηρήσει το δίκτυο. Το προσωπικό αυτό μπορεί να είναι δύσκολο να βρεθεί, δαπανηρό και δύσκολο να διατηρηθεί. Το SDN μειώνει το ποσό της χειροκίνητης διαμόρφωσης που απαιτείται στο δίκτυο, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα λιγότερα σφάλματα και μικρότερους χρόνους διακοπής του δικτύου.

Το κόστος για την πρώτη εγκατάσταση του εξοπλισμού δικτύου θα μεταβληθεί σημαντικά. Το SDN δημιουργεί ένα υψηλότερο επίπεδο καινοτομίας που θα οδηγήσει σε ταχύτερους χρόνους επανάληψης και υψηλότερη συχνότητα δοκιμών [42]. Ωστόσο, το SDN διαθέτει ισχυρές ικανότητες δοκιμής πριν από την ανάπτυξη και μειώνει τον αριθμό των συσκευών που πρέπει να ενημερωθούν. Το περιβάλλον δικτύου μπορεί να προσομοιωθεί για να δημιουργήσει ένα περιβάλλον δοκιμής πριν από τη μετάβαση στο νέο σύστημα και οι ροές παραγωγής μπορούν να αντικατοπτριστούν σε αυτό το περιβάλλον δοκιμών που επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση και τον άμεσο καθορισμό των σφαλμάτων. Το δημιουργημένο περιβάλλον δοκιμών προσφέρει επίσης την ευκαιρία εκπαίδευσης του προσωπικού που εργάζεται στο κέντρο λειτουργίας του δικτύου σε έναν

πραγματικό κόσμο. Προσομοιώνουν το δίκτυο πριν χρειαστεί να λειτουργήσουν το δίκτυο κατά την παραγωγή τους.

Οι κύριοι παράμετροι οι οποίοι θα επηρεάσουν την δυνατότητα για μείωση του κόστους κεφαλαίου χρησιμοποιώντας το SDN είναι :

1. Εξοικονόμηση κόστους κεφαλαίου που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας απλούστερες συσκευές δικτύου.
2. Το κόστος επιπλέον εξαρτημάτων, όπως είναι οι OpenFlow controllers.
3. Η αναλογία του αριθμού διακοπών που μπορεί να διαχειριστεί ένας OpenFlow controller.
4. Η πιθανότητα για καλύτερη «ευθυγράμμιση» των πραγματικών απαιτήσεων (actual demands) με την χωρητικότητα του δικτύου.

7.3 Βασικά οφέλη χρήσης του SDMN

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται μερικές συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης για να εξηγηθούν τα βασικά οφέλη που προσφέρει η εφαρμογή του SDN στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε να αναλυθούν οι ακόλουθες σημαντικές βελτιώσεις: πιο αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών μεταξύ των κυψελών, ευκολότερος έλεγχος της κυκλοφορίας, αποτελεσματική εικονικοποίηση δικτύου και τα οφέλη στους παρόχους και στους διαχειριστές.

7.3.1 Διαχείριση παρεμβολών

Μία από τις βασικές στρατηγικές που χρησιμοποιούν σήμερα οι φορείς κινητής τηλεφωνίας για την αντιμετώπιση προβλημάτων χωρητικότητας στα δίκτυά τους είναι η μείωση του μεγέθους των κυψελών. Η υλοποίηση μικρών κυψελών επιτρέπει την καλύτερη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και επομένως καλύτερη φασματική απόδοση. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση έρχεται σαφώς σε βάρος της υψηλότερης της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών του δικτύου. Η βιομηχανία των κινητών δικτύων έχει αναγνωρίσει τη δυσκολία στη διαχείριση παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα και έχει αναπτύξει πολλές τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος [68]. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα υπάρχοντα δίκτυα LTE είναι: Inter-cell interference coordination (ICIC), Enhanced inter-cell interference coordination (e-ICIC) και Coordinated multi-point transmission/reception (COMP). Αυτές οι τεχνικές βασίζονται σε πολύπλοκους, καταναμημένους αλγορίθμους με αρνητική επίδραση στην απόδοση του συστήματος από πολλές απόψεις. Αυτή η προσέγγιση εισάγει σημαντικά γενικά έξοδα επεξεργασίας και επιβάλλει υψηλότερες απαιτήσεις σε πόρους δικτύου και δικτύου στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης [65]. Το SDN μπορεί να χειριστεί το πρόβλημα παρεμβολών με έναν καλύτερο τρόπο. Δεδομένου ότι ο λογικά κεντρικός ελεγκτής παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του παγκόσμιου δικτύου,

συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών σχετικά με το τρέχον προφίλ κατανομής ισχύος και υποφόρτισης όλων των σταθμών βάσης, οι αποφάσεις κατανομής των radio resources μπορούν να γίνουν πολύ καλύτερα. Επιπλέον, ο διαχωρισμός των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων επιτρέπει την εύκολη ανάπτυξη νέων τεχνικών διαχείρισης των radio resources χωρίς τροποποίηση του υλικού δικτύωσης.

7.3.2 Διαχείριση φόρτωσης κινητής κυκλοφορίας

Το μοντέλο προώθησης του SDN και ο κεντρικός έλεγχος παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση της κυκλοφορίας από τα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ορισμένες από τις περιπτώσεις χρήσης είναι: η αύξηση-φόρτωση της κυκλοφορίας, η διάκριση υπηρεσιών και η βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας.

Το SDN παρέχει ένα πρωτόκολλο ελέγχου (π.χ. OpenFlow) που λειτουργεί σε διαφορετικές τεχνολογίες, και έτσι επιτυγχάνεται η αναγκαία προϋπόθεση του handover. Η φόρτωση μπορεί να γίνει δυναμικά και με διάφορα κριτήρια ενεργοποίησης, όπως: αριθμός χρηστών ανά σταθμό βάσης, διαθέσιμο εύρος ζώνης, προφίλ συνδρομητή, τύπο εφαρμογής και διάρκεια ροής. Επίσης, κάθε καταχώριση πίνακα ροής σε διακόπτες SDN περιέχει μετρητές ψηφιολέξεων και πακέτων που επιτρέπουν στον χειριστή να χρησιμοποιεί ως κριτήριο ενεργοποίησης την ατομική παροχή ή τη συνολική παροχή ανά εφαρμογή, κυψέλη, χρήστη κ.λπ[68].

Μια άλλη σημαντική συμβολή του SDN για τη διαχείριση της κυκλοφορίας είναι η δυνατότητα να επιβάλλονται αυστηρές πολιτικές. Στα σημερινά δίκτυα LTE, οι σταθμοί βάσης επιβάλλουν απλές πολιτικές όπως η μέγιστη ρύθμιση του ρυθμού. Για όλες τις υπόλοιπες πολιτικές είναι υπεύθυνη η PGW, η οποία ταξινομεί την κυκλοφορία από όλους τους σταθμούς βάσης και είτε πακετάρει πακέτα, αν παραβιάζουν την πολιτική τείχους προστασίας, είτε τα χαρτογραφεί σε τάξεις QoS ρυθμίζοντας τον κατάλληλο κώδικα Diff-Serve στην κεφαλίδα IP.

Με το ευέλικτο, δυναμικό σύστημα κίνησης, η βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας και η προστασία του συστήματος μπορούν να εκτελεστούν αποτελεσματικότερα. Σήμερα, οι φορείς κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν middleboxes (π.χ. firewalls, transcoders, echo-cancellers) για να βελτιώσουν την ποιότητα του βίντεο, την ασφάλεια, να αφαιρέσουν την ηχώ από τη φωνητική επικοινωνία και ούτω καθεξής. Ωστόσο, δεδομένου ότι δεν έχουν λεπτομερή έλεγχο της δρομολόγησης, η κυκλοφορία συχνά κατευθύνεται μέσω περιττών middleboxes. Η δυνατότητα του SDN για τον έλεγχο της κυκλοφορίας με βάση τη ροή επιτρέπει την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση αυτού του ακριβού εξοπλισμού[68]. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της, η ροή της κυκλοφορίας μπορεί να κατευθυνθεί μέσω των απαραίτητων μεσαίων κιβωτίων και να παρακάμψει όλα τα υπόλοιπα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κεφαλαίου (CAPEX), χάρη στην αποφυγή υπερβολικών διαστάσεων.

7.3.3 Εικονικοποίηση του δικτύου

Η ερευνητική κοινότητα σε όλο τον κόσμο έχει αναγνωρίσει ευρέως την εικονικοποίηση του δικτύου ως ένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των δικτύων επόμενης γενιάς. Η σημασία του έγκειται στην ικανότητα δημιουργίας πολλαπλών λογικών δικτύων πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Η πλήρης υλοποίηση της έννοιας της εικονικής δικτύωσης απαιτεί την αφαίρεση υλικού υψηλού επιπέδου και αυτό ακριβώς παρέχει το SDN [66].

Με λύσεις virtualization του SDN, όπως το FlowVisor [67], οι πολλαπλοί συνδρομητές μπορούν να μοιράζονται ένα ενιαίο επίπεδο δεδομένων μεταγωγής με ελεγχόμενο και απομονωμένο τρόπο. Επιπλέον, δεδομένου ότι πολλοί φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, απαιτείται μικρότερος αριθμός εξοπλισμού που συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τα ασύρματα δίκτυα. Η εικονικοποίηση των δικτύων γίνεται με διαχωρισμό του εύρους ζώνης ζεύξης, της τοπολογίας, της κυκλοφορίας, του CPU της συσκευής και των πινάκων ροής. Όλες οι αποφάσεις διαχείρισης της κυκλοφορίας εκτελούνται από προγραμματιζόμενη οντότητα-ελεγκτή τον OpenFlow, όπου το FlowVisor εξυπηρετεί πολλούς ελεγκτές έναν ανά τμήμα. Κάθε ελεγκτής βλέπει και ελέγχει μόνο ένα τμήμα [68]. Η εικονικοποίηση του σταθμού βάσης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, ο τεμαχισμός μπορεί να γίνει στο πεδίο του χρόνου και κάθε ένας από τους εικονικούς σταθμούς βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους τους υποθαλάμους και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής κατά τη διάρκεια των χρονικών θυρίδων που τους έχουν εκχωρηθεί ή μπορούν να αποκτήσουν διαφορετικά υποσύνολα υποφορέων και να εκτελέσουν μετάδοση σε όλες τις χρονοθυρίδες με ένα κλάσμα της μέγιστης ισχύος μετάδοσης.

7.3.4 Οφέλη στους παρόχους

Το SDMN επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης να χρησιμοποιούν πόρους υποδομής για να ενορχηστρώσουν τη ζήτηση για τη δημιουργία διαφόρων δικτύων κινητής τηλεφωνίας που βασίζονται σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές κινητών επικοινωνιών (3G, 4G) χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εφαρμογές. Παρόλο που το πράττει αυτό, ο φορέας εκμετάλλευσης μπορεί να διαχειριστεί τη διαχείριση της κυκλοφορίας για υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας, επιτρέποντας νέες δυνατότητες βελτίωσης της ποιότητας των εμπειριών του τελικού χρήστη, καθώς και βελτιστοποιώντας το κόστος χειρισμού των ροών κίνησης δεδομένων με λιγότερη κίνηση.

Ο φορέας εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας μπορεί να συνεχίσει να επωφελείται από την αξιοπιστία του τρέχοντος εξοπλισμού EPC, ενώ παράλληλα ανοίγει ένα δίκτυο μεταφορών βασισμένο σε OpenFlow βασικών προϊόντων για τη μείωση του κόστους. Ταυτόχρονα, ο διαχειριστής μπορεί να ξεκινήσει να αναπτύσσει εφαρμογές, οι οποίες μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τον παλιό εξοπλισμό (π.χ. μέσω GTP/PMIP tunnels) και να πειραματιστούν με νέες υπηρεσίες που βασίζονται στο τμήμα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αξιοποιώντας το MobileFlow, ο φορέας εκμετάλλευσης δεν θα πρέπει ουσιαστικά να απορρίψει όλο τον τρέχοντα εξοπλισμό, συμπεριλαμβανομένων εξειδικευμένων μεσαίων θυρίδων, και δεν θα ήταν αναγκαίο να επαναφέρει την ίδια λειτουργικότητα στον χώρο των εφαρμογών του δικτύου μεταφορών. Αντιθέτως, επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης να επιλέγουν το καλύτερο εκ των δύο μοντέλων και να μεταναστεύσουν σε ένα πλήρως καθορισμένο από λογισμικό δίκτυο με δική τους

πρωτοβουλία και ρυθμό. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του SDN είναι προσανατολισμένη προς το μέλλον, οπότε ο φορέας εκμετάλλευσης θα είναι σίγουρα κερδισμένος.

Τελευταίο, αλλά σίγουρα όχι λιγότερο σημαντικό, το SDMN καθιστά δυνατή την ταχεία και ομαλή εξέλιξη και διαφοροποίηση του κινητού δικτύου. Ο πάροχος μπορεί να αρχίσει να χρησιμοποιεί το SDMN με ένα δίκτυο 3G στη θέση του και να το εξελίξει σε ένα δίκτυο 4G με την κατανομή περισσότερων πόρων καθώς προχωρά η εξέλιξη [68]. Η αλλαγή σημαντικών μηχανισμών στον πυρήνα αποσυνδέεται επίσης από την εξέλιξη στο υπόλοιπο δίκτυο. Μέσω μιας σταδιακής προσέγγισης που μπορεί να ακολουθήσει το ρυθμό κάθε παρόχου, τα μελλοντικά δίκτυα με βάση το SDMN μπορούν να αναπτυχθούν και να λειτουργούν. Επιπλέον, στον ίδιο τομέα, ένας πάροχος μπορεί να διαθέσει ένα δυναμικό συνδυασμό πόρων ελέγχου και χρήστη, από την εικονική υποδομή του δικτύου για την αντιμετώπιση διαφορετικών προβλημάτων κατά την εμφάνισή τους (π.χ., καταιγίδες σηματοδότησης ή αιχμές στην κατανομή περιεχομένου κατά τη διάρκεια δημοφιλών εκδηλώσεων) σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από σήμερα.

7.3.5 Οφέλη στους διαχειριστές

Το SDMN επιτρέπει στον διαχειριστή μέσω του επίπεδου ελέγχου να εξασφαλίζει, να ενημερώνει, ακόμα και να προβλέπει τις συνολικές πληροφορίες, όπως τα χαρακτηριστικά των χρηστών, την αλλαγή των απαιτήσεων του δικτύου και την κατάσταση του παγκόσμιου δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, το επίπεδο ελέγχου είναι σε θέση να προγραμματίζει ή να ρυθμίζει άριστα την κατανομή πόρων, τις στρατηγικές προώθησης, και την ασύρματη διαμόρφωση, αποστέλλοντας κανόνες και τροποποιώντας τις συμπεριφορές των συσκευών δικτύου. Το SDMN αφαιρεί τις λειτουργίες του δικτύου και παρέχει πολλαπλά ανοιχτά API. Εν τω μεταξύ, το QoS μπορεί να εξασφαλιστεί με αποτελεσματικό προγραμματισμό. Επομένως, το SDMN καθιστά τα δίκτυα πιο ελεγχόμενα και προγραμματιζόμενα για τους διαχειριστές του δικτύου.

8. Συμπεράσματα

Τα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασίζονται σε πολύπλοκο, ακριβό και ιδιόκτητο εξοπλισμό που δεν παρέχει ικανοποιητική ευελιξία στις λειτουργίες ελέγχου δικτύου από το σημείο προσαρμογής της αναμενόμενης αύξησης της κυκλοφορίας και τη βελτίωση της θέσης του χειριστή στην ανταγωνιστική αγορά. Αυτή η διπλωματική εργασία περιγράφει τα πιθανά οφέλη και τις συμβολές που μπορεί να προσφέρει το παράδειγμα του SDN για την υπερνίκηση πολλών τέτοιων περιορισμών και για την παροχή απαιτούμενων βελτιώσεων στην αρχιτεκτονική του δικτύου με την αποσύνδεση των λειτουργιών ελέγχου από την υποκείμενη φυσική υποδομή. Οι ανοιχτές διεπαφές και τα APIs στο SDMN ενθαρρύνουν την καινοτομία των υπηρεσιών, αυξάνοντας την ικανότητα του φορέα εκμετάλλευσης να αναπτύξει νέες δυνατότητες δικτύου μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο διάθεσης νέων υπηρεσιών.

Προκειμένου να συνοψισθεί η πλειονότητα των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το σχετικά νέο τομέα έρευνας, αναλύθηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές προτάσεις για κινητά κυψελοειδή δίκτυα με βάση το SDN που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Περαιτέρω, δείχθηκε ότι τα βασικά πιθανά οφέλη που επιτυγχάνονται με την εισαγωγή της ιδέας SDN στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι: η αποτελεσματικότερη διαχείριση παρεμβολών μεταξύ των κυψελών, ο ευκολότερος έλεγχος της κυκλοφορίας και η πλήρης υλοποίηση του virtualization δικτύου.

Αναμένεται ότι το SDMN μπορεί να παίξει καταλυτικό παράγοντα στις καινοτομίες των φορέων σε μια σειρά τομέων, από την ταχεία εισαγωγή νέων υπηρεσιών σε βελτιωμένη παρακολούθηση και διαχείριση πόρων και υπηρεσιών δικτύου, στον έλεγχο του CAPEX / OPEX, στον εξατομικευμένο χειρισμό της κυκλοφορίας συνδρομητών. Με το SDMN, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να διαφοροποιήσουν τις προσφορές τους σε μια άνευ προηγουμένου κλίμακα, προστατεύοντας ταυτόχρονα την τρέχουσα επένδυσή τους στον παραδοσιακό κυψελοειδή εξοπλισμό.

Η ανάπτυξη του 5G δικτύου έχει τεθεί στο χρονοδιάγραμμα της βιομηχανίας της κινητής τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο. Μελετώντας το ιστορικό ανάπτυξης προηγούμενων κινητών συστημάτων, στα επόμενα 10 χρόνια θα δούμε την ανάπτυξη δικτύων 5G. Ο σχεδιασμός που έχει καθοριστεί από το λογισμικό SDN έχει αναγνωριστεί ως μια σημαντική πορεία εξέλιξης για δίκτυα 5G. Το SDMN θα είναι το επόμενο μεγάλο κεφάλαιο για τη βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας. Η νέα σκέψη και η πιο θεμελιώδης έρευνα αναμένεται να εδραιώσει το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του SDMN.

Τα οφέλη από την εφαρμογή των αρχών του SDN σε διάφορους τύπους δικτύων, η ενοποίηση των ετερογενών περιβαλλόντων και ο μεγάλος αριθμός εφαρμογών που προσφέρει αυτό το παράδειγμα αποδεικνύουν την πολύ μεγάλη του δυνατότητα να καταστεί μια μεγάλη κινητήρια δύναμη στο εγγύς μέλλον, ειδικά για τους παρόχους υπηρεσιών cloud, τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων και τους φορείς κινητής τηλεφωνίας.

9. Μελλοντική Έρευνα

Το SDN μπορεί να χειριστεί το πρόβλημα παρεμβολών με καλύτερο τρόπο με τις βέλτιστες αποφάσεις κατανομής ασύρματων πόρων, καθώς ο ελεγκτής δικτύου του SDN παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του παγκόσμιου δικτύου, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών για το τρέχον προφίλ όλων των σταθμών βάσης. Ωστόσο, το SDN εξακολουθεί να είναι σε "μικρή ηλικία", και στο δρόμο προς τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασισμένα στο SDN εξακολουθούν να αντιμετωπίζονται ορισμένα θέματα.

Ορισμένα από αυτά σχετίζονται με την επεκτασιμότητα του ελεγκτή, την ασφάλεια και την εικονικοποίηση στον ασύρματο τομέα. Σημαντική πρόκληση είναι η ανάπτυξη εφαρμογών SDN που θα επωφεληθούν από τον κεντρικό έλεγχο για τη διαχείριση της κινητικότητας, τον συντονισμό παρεμβολών και την απρόσκοπτη μετάδοση μεταξύ παρόχων υπηρεσιών. Δεδομένου ότι το SDN αντιπροσωπεύει επαναστατική προσέγγιση στο σχεδιασμό του δικτύου, παρά τα οφέλη που θα μπορούσε να προσφέρει, η επιτυχία αυτής της ιδέας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ενδιαφέροντα και τη δραστηριότητα της ερευνητικής κοινότητας.

Παρόλο που το πρότυπο SDN θα διευκολύνει τους νέους βαθμούς ελευθερίας στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, θα δημιουργήσει επίσης σημαντικά ζητήματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Από την άποψη αυτή, ο κεντρικός ελεγκτής και ο τρόπος τοποθέτησης του είναι βασικό ζήτημα για το σχεδιασμό και τη λειτουργία του SDMN. Ως εκ τούτου, οι προκλήσεις που σχετίζονται με την τοποθέτηση του ελεγκτή εμφανίζονται ως κρίσιμα στοιχεία για τη σκοπιμότητα του SDMN. Πρέπει να επινοηθούν οι αλγόριθμοι τοποθέτησης του ελεγκτή, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την επεκτασιμότητα, την πολυπλοκότητα, τα χαρακτηριστικά του κινητού δικτύου και τη συμβατότητα με τα γενικά συστήματα του SDN.

10. Βιβλιογραφία

- [1] CISCO, V. (2014). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2013–2018: Visual Networking Index (VNI). *June*.
- [2] Liyanage, M., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2014). A case study on security issues in LTE backhaul and core networks. *Case Studies in Secure Computing: Achievements and Trends*, 1, 167.
- [3] Kerravala, Z. (2002). Configuration management delivers business resiliency. *The Yankee Group*.
- [4] Roscoe, T., Hand, S., Isaacs, R., Mortier, R., & Jardetzky, P. (2003). Predicate routing: Enabling controlled networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 33(1), 65-70.
- [5] Wool, A. (2004). A quantitative study of firewall configuration errors. *Computer*, 37(6), 62-67.
- [6] Brown, B., Gonzalez, R., & Stanford, B. (2015). Mobile Network History. *Software Defined Mobile Networks (SDMN): Beyond LTE Network Architecture*, 11-19.
- [7] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be?. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 32(6), 1065-1082.
- [8] Pentikousis, K., Wang, Y., & Hu, W. (2013). Mobileflow: Toward software-defined mobile networks. *IEEE Communications magazine*, 51(7), 44-53.
- [9] Koliass, C., Ahlawat, S., & Ashton, C. (2013). Openflow-enabled mobile and wireless networks. *White Paper*.
- [10] Liu, Y., Ding, A. Y., & Tarkoma, S. (2013). Software-defined networking in mobile access networks.
- [11] Jin, X., Li, L. E., Vanbever, L., & Rexford, J. (2013). SoftCell: Taking control of cellular core networks. *arXiv preprint arXiv:1305.3568*.
- [12] Nguyen, V. G., Do, T. X., & Kim, Y. (2016). SDN and virtualization-based LTE mobile network architectures: A comprehensive survey. *Wireless Personal Communications*, 86(3), 1401-1438.
- [13] <http://www.3gpp.org>
- [14] Network architecture (Release 13), by 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects, September 2016
- [15] Overview of The Universal Mobile Telecommunication System by Petri Pössi, UMTS World, July 2002
- [16] 3G Networking Protocols: The Bridge Between the Air Interface and the UTRAN by Agilent Technologies
- [17] UTRAN overall description (Release 11) by 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network, December 2012
- [18] Jellema, B. A. R. T., & Vorwerk, M. A. R. C. (2014). Communications as a cloud service: a new take on Telecoms. *Ericsson Rev.*, 2-9.
- [19] Chih-Lin, I., Huang, J., Duan, R., Cui, C., Jiang, J. X., & Li, L. (2014). Recent progress on C-RAN centralization and cloudification. *IEEE Access*, 2, 1030-1039.

- [20] <http://www.artizanetworks.com/resources/tutorials>
- [21] Sivaraman, A., Winstein, K., Subramanian, S., & Balakrishnan, H. (2013, November). No silver bullet: extending SDN to the data plane. In *Proceedings of the Twelfth ACM Workshop on Hot Topics in networks* (p. 19). ACM.
- [22] Nunes, B. A. A., Mendonca, M., Nguyen, X. N., Obraczka, K., & Turetletti, T. (2014). A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3), 1617-1634.
- [23] Gude, N., Koponen, T., Pettit, J., Pfaff, B., Casado, M., McKeown, N., & Shenker, S. (2008). NOX: towards an operating system for networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(3), 105-110.
- [24] Ng, E., Cai, Z., & Cox, A. L. (2010). Maestro: A system for scalable openflow control. *Rice University, Houston, TX, USA, TSEN Maestro-Techn. Rep, TR10-08*.
- [25] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., ... & Turner, J. (2008). OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69-74.
- [26] Curtis, A. R., Mogul, J. C., Tourrilhes, J., Yalagandula, P., Sharma, P., & Banerjee, S. (2011). DevoFlow: Scaling flow management for high-performance networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 41(4), 254-265.
- [27] Latifi, S., Durrezi, A., & Cico, B. (2014, June). Emulating enterprise network environments for fast transition to software-defined networking. In *Embedded Computing (MECO), 2014 3rd Mediterranean Conference on* (pp. 294-297). IEEE.
- [28] Koponen, T., Casado, M., Gude, N., Stribling, J., Poutievski, L., Zhu, M., ... & Shenker, S. (2010, October). Onix: A distributed control platform for large-scale production networks. In *OSDI*(Vol. 10, pp. 1-6).
- [29] Berde, P., Gerola, M., Hart, J., Higuchi, Y., Kobayashi, M., Koide, T., ... & Parulkar, G. (2014, August). ONOS: towards an open, distributed SDN OS. In *Proceedings of the third workshop on Hot topics in software defined networking* (pp. 1-6). ACM.
- [30] Aliyu, A. L., Bull, P., & Abdallah, A. (2017, March). Performance Implication and Analysis of the OpenFlow SDN Protocol. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2017 31st International Conference on* (pp. 391-396). IEEE.
- [31] N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura. "The road to SDN." *ACM Queue* 11.12 (2013): (pp.20–40).
- [32] C. Cui, H. Deng, D. Telekom, U. Michel, and H. Damker. "Network functions virtualisation." Available from http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf (accessed 19 January 2015).
- [33] 3GPP, T. (2014). 23.401: General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access. *V12*, 5.
- [34] ONF. (2013). SDN architecture overview. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/SDN-architecture-overview-1.0.pdf>. Accessed May 2014.
- [35] OpenDaylight Project. (2014). OpenDaylight sdn application. https://wiki.opendaylight.org/view/Project_Proposals:ODL-SDNi_App. Accessed August 2014.

- [36] ONF. (2013). Northbound interfaces working group charter. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/working-groups/charter-nbi.pdf>. Accessed May 2014.
- [37] Index, C. V. N. (2016). Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper. *link: http://goo.gl/yITuVx*.
- [38] “Software defined networking: The new norm for networks,” White Paper, Open Networking Foundation, 2012.
- [39] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., ... & Turner, J. (2008). OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69-74.
- [40] Verbrugge, S., Colle, D., Pickavet, M., Demeester, P., Pasqualini, S., Iselt, A., ... & Jäger, M. (2006). Methodology and input availability parameters for calculating OpEx and CapEx costs for realistic network scenarios. *Journal of Optical Networking*, 5(6), 509-520.
- [41] Triki, A., Gravey, A., & Gravey, P. (2015, September). CAPEX and OPEX saving in SDN-compliant sub-wavelength switching solution. In *Photonics in Switching (PS), 2015 International Conference on* (pp. 262-264). IEEE.
- [42] Naudts, B., Kind, M., Westphal, F. J., Verbrugge, S., Colle, D., & Pickavet, M. (2012, October). Techno-economic analysis of software defined networking as architecture for the virtualization of a mobile network. In *Software Defined Networking (EWSN), 2012 European Workshop on* (pp. 67-72). IEEE.
- [43] Chen, T., Matinmikko, M., Chen, X., Zhou, X., & Ahokangas, P. (2015). Software defined mobile networks: concept, survey, and research directions. *IEEE Communications Magazine*, 53(11), 126-133.
- [44] Liyanage, M., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2016, January). Improving the tunnel management performance of secure VPLS architectures with SDN. In *Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2016 13th IEEE Annual* (pp. 530-536). IEEE.
- [45] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/UTRAN_en.png
- [46] <https://image.slidesharecdn.com/epspresentation-150728064145-lva1-app6891/95/eps-presentation-11-638.jpg?cb=1438065813>
- [47] Kirkpatrick, K. (2013). Software-defined networking. *Communications of the ACM*, 56(9), 16-19.
- [48] Nguyen, V. G., Do, T. X., & Kim, Y. (2016). SDN and virtualization-based LTE mobile network architectures: A comprehensive survey. *Wireless Personal Communications*, 86(3), 1401-1438.
- [49] <http://openswitch.org/>
- [50] <https://www.opendaylight.org/>
- [51] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., ... & Turner, J. (2008). OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69-74.
- [52] Ericsson Mobility Report (2015)
- [53] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015-2020 (2016)

- [54] Costa-Requena, J., Kimmerlin, M., Manner, J., & Kantola, R. (2014, October). SDN optimized caching in LTE mobile networks. In *Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2014 International Conference on* (pp. 128-132). IEEE.
- [55] Sharma, S., Singh, A., Singh, S., & Kaur, R. (2016, March). SDN-Based mobile access networks: "Up-Coming technology". In *Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), International Conference on* (pp. 2823-2826). IEEE.
- [56] Li, L. E., Mao, Z. M., & Rexford, J. (2012, October). Toward software-defined cellular networks. In *Software Defined Networking (EWSDN), 2012 European Workshop on* (pp. 7-12). IEEE.
- [57] Costa-Requena, J. (2014, February). SDN integration in LTE mobile backhaul networks. In *Information Networking (ICOIN), 2014 International Conference on* (pp. 264-269). IEEE.
- [58] Foster, N., Harrison, R., Freedman, M. J., Monsanto, C., Rexford, J., Story, A., & Walker, D. (2011, September). Frenetic: A network programming language. In *ACM Sigplan Notices* (Vol. 46, No. 9, pp. 279-291). ACM.
- [59] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., ... & Turner, J. (2008). OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69-74.
- [60] "Mobile application assurance on the Alcatel-Lucent 7750 service router mobile gateway: Optimize network resources, enrich and personalize user experiences, and monetize the services," 2011. Application Note.
- [61] Sherwood, R., Gibb, G., Yap, K. K., Appenzeller, G., Casado, M., McKeown, N., & Parulkar, G. M. (2010, October). Can the production network be the testbed?. In *OSDI* (Vol. 10, pp. 1-6).
- [62] Gudipati, A., Perry, D., Li, L. E., & Katti, S. (2013, August). SoftRAN: Software defined radio access network. In *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking* (pp. 25-30). ACM.
- [63] Jin, X., Li, L. E., Vanbever, L., & Rexford, J. (2013, December). Softcell: Scalable and flexible cellular core network architecture. In *Proceedings of the ninth ACM conference on Emerging networking experiments and technologies* (pp. 163-174). ACM.
- [64] Pentikousis, K., Wang, Y., & Hu, W. (2013). Mobileflow: Toward software-defined mobile networks. *IEEE Communications magazine*, 51(7), 44-53.
- [65] Open Networking Foundation. (2013). OpenFlow-enabled mobile and wireless networks. ONF solution brief. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-wireless-mobile>. Accessed on 22 February 2013.
- [66] Yap, K. K., Sherwood, R., Kobayashi, M., Huang, T. Y., Chan, M., Handigol, N., ... & Parulkar, G. (2010, September). Blueprint for introducing innovation into wireless mobile networks. In *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures* (pp. 25-32). ACM.
- [67] Sherwood, R., Gibb, G., Yap, K. K., Appenzeller, G., Casado, M., McKeown, N., & Parulkar, G. M. (2010, October). Can the production network be the testbed?. In *OSDI* (Vol. 10, pp. 1-6).
- [68] Tomovic, S., Pejanovic-Djurisic, M., & Radusinovic, I. (2014). SDN based mobile networks: concepts and benefits. *Wireless Personal Communications*, 78(3), 1629-1644.

