



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Ψηφιακός Πολιτισμός, Έξυπνες Πόλεις, IoT και Προηγμένες Ψηφιακές
Τεχνολογίες»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Επισκόπηση και Ανάλυση Επίδοσης Αρχιτεκτονικών Κινητών Επικοινωνιών 5G Overview and Performance Analysis of 5G Mobile Communication Architectures
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Γεώργιος Παρασκευόπουλος
Πατρώνυμο	Αριστειδης
Αριθμός Μητρώου	ΨΠΟΛ19048
Επιβλέπων	Δρ. Εμμανουήλ Σκόνδρας, Διδάσκων ΠΜΣ

Ημερομηνία Παράδοσης

Απρίλιος 2024

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Εμμανουήλ Σκόνδρας
Διδάσκων ΠΜΣ

Δημήτριος Βέργαδος
Καθηγητής

Δρ. Παναγιώτης
Τσάκωνας
Διδάσκων ΠΜΣ

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	4
Abstract	5
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	6
1.1. 5G Public Private Partnership (5GPPP).....	7
1.2. Σκοπός Εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2. Βασικές Απαιτήσεις Δικτύων Πέμπτης Γενιάς (5G)	12
2.1. Απαιτήσεις υπηρεσιών.....	12
Κεφάλαιο 3. 3GPP Network Sharing	15
3.1. Απαιτήσεις Network Sharing.....	15
3.2. Παθητική και ενεργή κοινή χρήση δικτύου.....	15
Κεφάλαιο 4. Τεμαχισμός Δικτύων 5G (5G Network Slicing)	19
4.1. Βασικές αρχές για το Network Slicing.....	19
4.2. Τεχνικές Network Slicing σε παλαιότερης γενιάς δίκτυα.....	21
4.3. Η έννοια και οι αρχές 5G Τεμαχισμού δικτύου (Slice Network).....	22
4.4. Τεχνικές Network Slicing.....	26
4.4.1. Hypervisor.....	26
4.4.2. Εικονικές μηχανές (Virtual Machines) και Containers.....	26
4.4.3. Network Function Virtualization (NFV).....	27
4.4.4. Software Defined Networking (SDN)	29
4.4.5. Cloud & Edge Computing.....	31
4.5. Διαχείριση υπηρεσιών και έλεγχος κόμβου δικτύου	31
4.6. Network Management & Orchestration.....	32
4.7. Network Slice Broker.....	33
4.8. Διαχείριση Κύκλου Ζωής.....	35
4.9. Ενοποιημένο Network Slicing.....	36
4.10. Radio Access Network (RAN) Slicing	36
4.10.1. Διαχείριση και απομόνωση πόρων κατά τη διάρκεια του Network Slicing.....	37
4.10.2. Προγραμματισμός RAN (RAN Programmability).....	38
4.10.3. Ευέλικτη λειτουργία RAN Virtualization & Functional Split.....	40
4.10.4. 5G Slicing και Fronthaul/Backhaul Integration.....	42

Κεφάλαιο 5. Δίκτυο Κορμού 5G	44
5.2. Δίκτυα προσανατολισμένα στον Πυρήνα (<i>Dedicated Core Networks</i>).....	45
5.3. Δίκτυα Κορμού 5G (<i>5G Core Network</i>).....	46
5.4. <i>Network Exposure Function</i>	49
5.5. Ανακάλυψη και Επιλογή <i>Slice</i>	50
5.6. Συνδεσιμότητα πολλαπλών <i>slices</i>	51
Κεφάλαιο 6 Προκλήσεις και Ανοικτά Ζητήματα Έρευνας	52
6.1. Τεχνοοικονομικές πτυχές του <i>Network Slicing</i>	52
6.2. <i>RAN Slicing & Traffic Isolation</i>	52
6.3. <i>Slice Security</i>	53
6.4. Βελτιστοποίηση <i>Network Slicing</i>	54
6.5. <i>UE Slicing</i>	54
6.6. Εξέλιξη του <i>Network Slicing Evolution & APIs</i>	55
Κεφάλαιο 7 Προσομοίωση.....	56
7.1. Τοπολογία Δικτύου.....	56
7.2. Αποτελέσματα.....	57
Συμπεράσματα	63
Βιβλιογραφία.....	64
Παράρτημα Α. Οδηγίες εγκατάστασης του Network Simulator 3 (NS3)	70
Παράρτημα Β. Κώδικας Προσομοίωσης.....	71

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από το 2019 και αποτελούν τον προγραμματισμένο διάδοχο των 4G δικτύων. Το βασικό τους πλεονέκτημα σε σχέση με τις προκάτοχες τεχνολογίες κυψελοειδών δικτύων είναι το πολύ υψηλό εύρος ζώνης μεταφορά δεδομένων, γεγονός που βελτιώνει αλλά και ανοίγει το δρόμο σε νέες ενδιαφέρουσες και καινοτόμες εφαρμογές τους. Αρχικά, θα εξηγήσουμε την αρχιτεκτονική του 5G δίνοντας έμφαση στις κυριότερες τεχνολογίες που επιτρέπουν την διακλάδωση από άκρη σε άκρη. Το Network Slicing είναι μια αρχιτεκτονική που παίζει κεντρικό ρόλο στα 5G δίκτυα που είναι σχεδιασμένα να υποστηρίξουν μια πληθώρα εφαρμογών με ελάχιστες απαιτήσεις στο service layer (SLR). Γίνεται εκτενής αναφορά όλων των τεχνικών Slicing, της διαχείρισης πόρων, του κύκλου ζωής και της ενορχήστρωσης και συνδεσιμότητας των slices end-to-end. Επίσης επιχειρούμε μια ανασκόπηση στις τεχνοοικονομικές πτυχές και τα μεγάλα συνεχιζόμενα ερευνητικά έργα για την ασφάλεια, την βελτιστοποίηση και την αυτοματοποίηση slices δικτύων και την καθοριστική επιρροή τους στην αρχιτεκτονική των 5G δικτύων. Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρατίθενται αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραματικής μέτρησης, που αποτυπώνουν την απόδοση μιας δεδομένης 5G υποδομής, όταν έχουμε slicing σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν έχουμε.

Συνοπτικά, η εργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα κεφάλαια:

- Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή: Γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνολογία του 5G και παρουσίαση της πρωτοβουλίας 5G Public Private Partnership, την επιρροή που θα έχει σε διάφορες τεχνολογίες (IoT, CDN..) δίνοντας έμφαση στην τεχνολογία του Network Slicing.
- Κεφάλαιο 2. Βασικές Απαιτήσεις Δικτύων Πέμπτης Γενιάς (5G): Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές τεχνολογικές κ επιχειρηματικές απαιτήσεις που θέτουν τα 5G δίκτυα για την εφαρμογή τους.
- Κεφάλαιο 3. 3GPP Network Sharing: Στην ενότητα αυτή δίνουμε μια επισκόπηση των απαιτήσεων για passive και active network sharing και τη διαχείριση του.
- Κεφάλαιο 4. Τεμαχισμός Δικτύων 5G (5G Network Slicing): Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στην έννοια του network slicing και τις αρχές που το διέπουν, καθώς και στις διάφορες τεχνικές slicing. Επίσης περιγράφουμε πως επιτυγχάνεται η διαχείριση του κύκλου ζωής και το orchestration των network slices.
- Κεφάλαιο 5. Δίκτυο Κορμού 5G: Αναφερόμαστε στο 3GPP και τις προδιαγραφές που έχει ενσωματώσει (π.χ. ανακάλυψη και επιλογή slices δικτύου και κοινή χρήση λειτουργιών δικτύου καθώς και την δυνατότητα σύνδεσης σε πολλαπλά slices) για να καλύψει πολλαπλές εφαρμογές.
- Κεφάλαιο 6 Προκλήσεις και Ανοικτά Ζητήματα Έρευνας: Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα ανοικτά ερευνητικά προβλήματα και οι προκλήσεις εφαρμογής της τεχνολογίας του network slicing (RAN Slicing & Traffic Isolation, Slice Security, Βελτιστοποίηση Network Slicing)

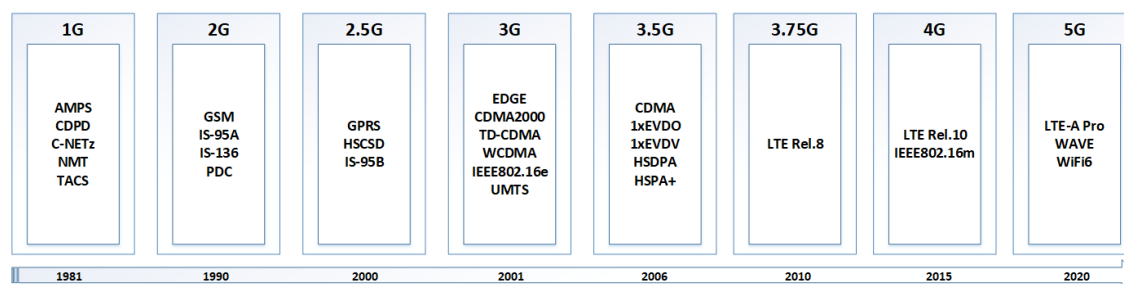
- Κεφάλαιο 7 Προσομοίωση: Στην τελευταία ενότητα, αξιολογείται η απόδοση της αρχιτεκτονικής 5G όταν εφαρμόζεται Network Slicing σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται, κάνοντας χρήση του NS3 και παραθέτοντας αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Abstract

5G is the fifth generation of cellular network, that has been deployed worldwide in 2019 and is the planned successor to 4G networks. The major advantage of this generation of cellular networks is that they will have greater bandwidth, giving higher download speeds, an important asset that improves and paves the way to new and innovative applications. Initially, 5G architecture will be analyzed in its main concepts giving focus on important technologies that enable high throughput end-to-end. Network Slicing is an architecture that plays an important role in 5G networks, that are designed to support multiple applications with minimum requirements in service layer (SLR). A thorough analysis of slicing techniques, their resource management, lifecycle and orchestration and inter-connection and communication between slices end-to-end, is provided. Additionally, an overview in both technical and economic aspects of them as well as the major research projects on the optimization and security of network slices, is given in detail, paying attention on their impact on 5G architecture. At the final chapter, experimental results are provided from our experimental simulation that compare the performance of a given 5G infrastructure, when there is slicing and when there is not.

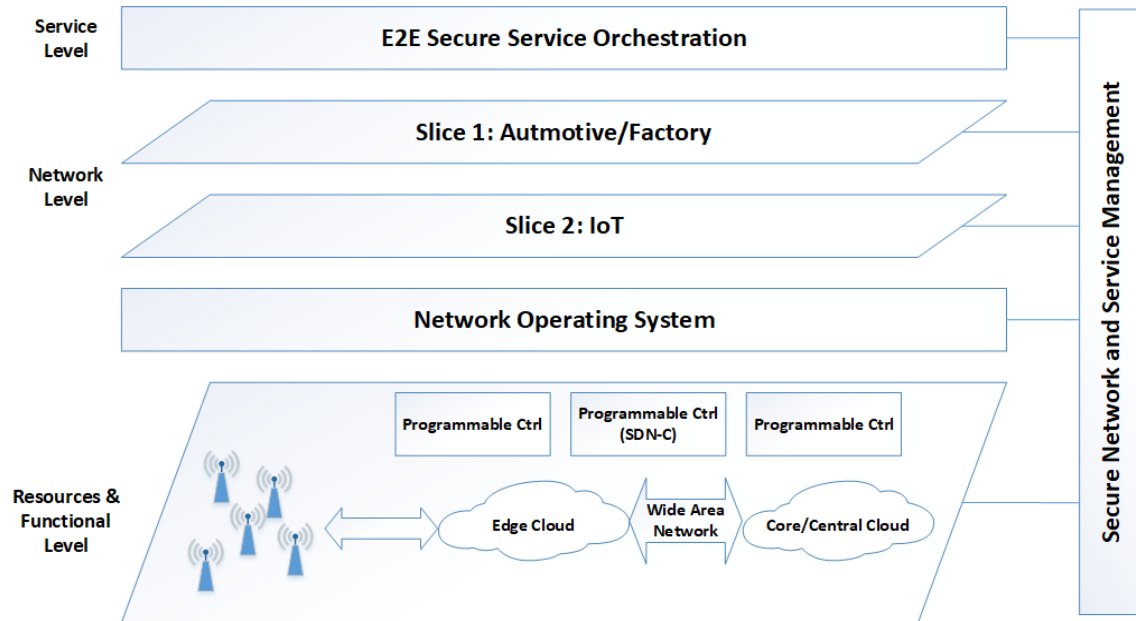
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Το κινητό σύστημα ΗΕ EMERGING 5G αναμένεται να βασιστεί στην επιτυχία της τρέχουσας τεχνολογίας 4G που προσφέρει υποστήριξη για πληθώρα υπηρεσιών δικτύου με διαφορετικές απαιτήσεις απόδοσης. Η 5G εποχή χαρακτηρίζεται ως η δημιουργία δικτύων κινητής τηλεφωνίας που θα υποστηρίζουν ειδικές περιπτώσεις χρήσης και θα παρέχουν συγκεκριμένους τύπους υπηρεσιών για να ικανοποιούν ταυτόχρονα τις διάφορες απαιτήσεις των πελατών. Μία εξέλιξη των Κινητών Δικτύων [1], μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Απεικόνιση Ιστορικής Εξέλιξης κυψελοειδών συστημάτων επικοινωνίας.

Η τεχνολογία κινητών δικτύων επικοινωνίας 5^{ης} γενιάς την κορύφωση της τεχνολογικής έρευνας και εξέλιξης των κινητών δικτύων. Πρόκειται για τεχνολογία που προτείνεται από τους ειδικούς ως απάντηση στις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών αυτών των υπηρεσιών για ολοένα και μεγαλύτερης ταχύτητας κινητές επικοινωνίες. Βεβαίως, η ανάπτυξη μιας τέτοιας τεχνολογίας αναμένεται να μπορεί να βρίσκει εφαρμογή σε κάθε είδους ασύρματων δικτύων. Η μετάβαση από την κυρίαρχη τεχνολογία 4G στην 5G προβλέπεται να γίνει ομαλά, ώστε η νέα τεχνολογία 5G να αποδώσει τα μέγιστα οφέλη της στους παγκόσμιους φορείς εκμετάλλευσης. Επιπλέον, θα καταστεί περισσότερο εφικτή η δια λειτουργικότητα, εφόσον κατασκευαστεί μια ενιαία πλατφόρμα διαχείρισης για όλες τις τεχνολογίες 5G, που πρακτικά θα υποστηρίζει κάθε είδους τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (RAT). Τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G) είναι μια ασύρματη ποικιλία, η οποία θα υποστηρίζεται από συγχρονισμένη πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα ευρείας ζώνης (LAS-CDMA), από ορθογώνιο πολλαπλό σύστημα με διαίρεση συχνότητας (OFDM), πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα με πολλές φέρουσες (MC-CDMA), από υπερευρεία ζώνη (UWB), από τοπικό πολυσημιακό σύστημα διανομής (network-LMDS) και από Πρωτόκολλο Ίντερνετ έκδοσης 6 (IPv6). Το IPv6 αποτελεί το στοιχειώδες πρωτόκολλο για τη λειτουργία τόσο του 4G όσο και του 5G. Το σύστημα κινητής επικοινωνίας 5G είναι ένα σύστημα που βασίζεται εξ ολοκλήρου σε IP. Στο 5G, οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες που βασίζονται σε κινητά δίκτυα στη βάση IP, όπως οι πύλες (portals) κινητής επικοινωνίας, το εμπόριο μέσω κινητής επικοινωνίας, η φροντίδα υγείας μέσω κινητής επικοινωνίας, η διακυβέρνηση μέσω κινητής επικοινωνίας κ.λπ. επιτυγχάνονται μέσω πόρων υπολογιστικών νεφών (CCRs).

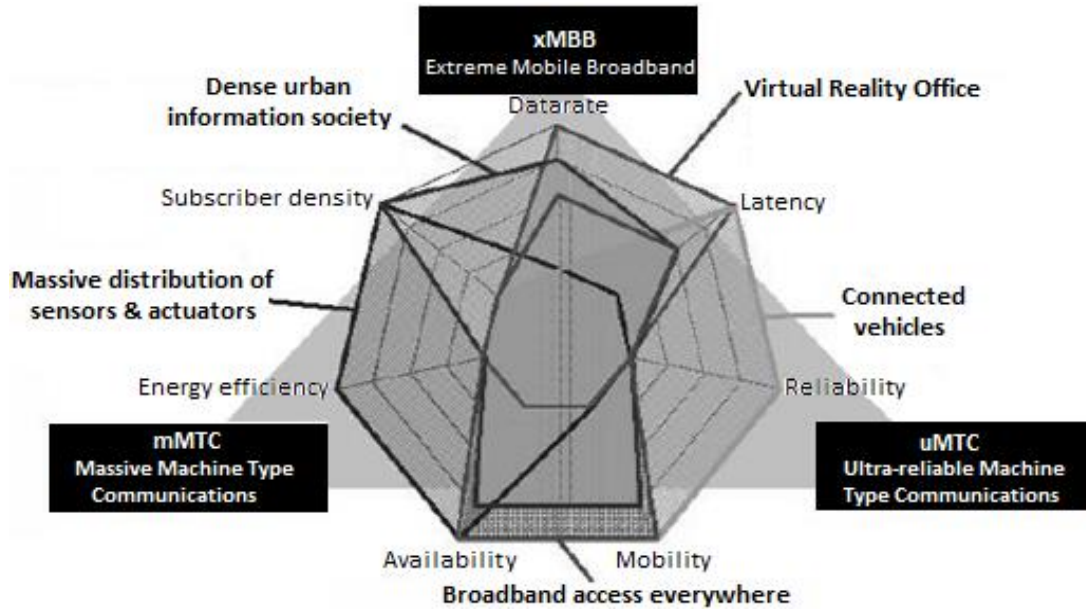


Εικόνα 2. Γενική Αρχιτεκτονική 5G.

1.1. 5G Public Private Partnership (5GPPP)

Για την χρηματοδότηση, την ανάπτυξη, την εξέλιξη και την τυποποίηση της νέας τεχνολογίας 5G, η Ευρωπαϊκή Ένωση υλοποίησε τα τελευταία χρόνια την πρωτοβουλία 5G Public Private Partnership (5GPPP), στο πλαίσιο της οποίας συνεργάζονται δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς που δραστηριοποιούνται στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η 5GPPP έχει χρηματοδοτήσει και υποστηρίζει μια σειρά από ερευνητικά έργα που καλύπτουν περιοχές από το επίπεδο φυσικής σύνδεσης έως την συνολική αρχιτεκτονική του 5G, τη διαχείριση δικτύων καθώς και τα λογισμικά δικτύωσης. Πρόκειται για μια σημαντική πρωτοβουλία, δεδομένου ότι το 5G δεν αποτελεί μόνο την τεχνολογία του μέλλοντος στον τομέα των ραδιοεπικοινωνιών αλλά και το πλαίσιο στο οποίο νέες καινοτόμες τεχνολογίες συνεργάζονται με υφιστάμενες τεχνολογίες με σκοπό να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των εφαρμογών 5G και βεβαίως, στις απαιτήσεις χρήσης των δικτύων 5G από ανθρώπους και πράγματα. Αυτές συνοψίζονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες χρήσης (Εικόνα 3):

- **Massive broadband (xMBB)**, που παρέχει εύρος ζώνης σε Gbit/sec κατ' απαίτηση.
- **Massive machine-type communication (mMTC)**, που συνδέει δισεκατομμύρια αισθητήρων και μηχανημάτων.
- **Critical machine-type communication (uMTC)**, που επιτρέπει την άμεση ανατροφοδότηση υψηλής αξιοπιστίας, τον απομακρυσμένο έλεγχο από ρομπότ καθώς και αυτόνομη οδήγηση.



Εικόνα 3. Υπηρεσίες 5G.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η σημαντικότητα της τεχνολογίας 5G μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα, εάν αναλογιστεί κανείς τους περιορισμούς της τεχνολογίας 4G σε σχέση και με τις σύγχρονες απαιτήσεις καταναλωτών και συσκευών. Η τεχνολογία 5G αναμένεται να είναι διαθέσιμη στην αγορά για ευρεία χρήση στα μέσα του 2020.

Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω, σε αντίθεση με τον τύπο "one-fit-all" της αρχιτεκτονικής 4G, η 5G αναμένεται να εξετάσει διαφορετικές επιχειρηματικές απαιτήσεις με συχνά αντικρουόμενες απαιτήσεις που ενθαρρύνουν την καινοτομία και προγραμματισμό των υπηρεσιών μέσω της χρήσης ανοιχτών πηγών και ανοικτών διεπαφών που επιτρέπουν την πρόσβαση σε τρίτα συμβαλλόμενα μέρη. Επιτρέποντας σε διαφορετικά μέρη να παράγουν και να εκτελούν μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε λογισμικό, το 5G καθίσταται εγγενώς ένα πολυεπίπεδο οικοσύστημα, όπου ένας μισθωτής αναφέρεται σε έναν χρήστη ή μια ομάδα χρηστών με συγκεκριμένα δικαιώματα πρόσβασης και προνόμια πάνω σε έναν κοινόχρηστο πόρο. Ως εκ τούτου, τα δίκτυα 5G προσφέρουν υποστήριξη πολλαπλών μισθώσεων, συνδεσιμότητα η οποία προσαρμόζεται στις απαιτήσεις και κατ' αυτό τον τρόπο παρέχουν κορυφαία ποιότητα υπηρεσιών (QoS), η οποία τελικά θα οδηγήσει σε μια μακροχρόνια Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) με μια πραγματικά διαφοροποιημένη παροχή υπηρεσιών πάνω από μία κοινή υποκείμενη υποδομή δικτύου.

Τα δίκτυα 5G αναμένεται επίσης να δημιουργήσουν νέες δυνατότητες υπηρεσιών βασισμένες στις πρόσφατες εξελίξεις στην περιοχή Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT). Συγκεκριμένα, οι αναλυτές προβλέπουν ότι μέχρι το 2025 ο αριθμός των συσκευών IoT θα μπορούσε να φθάσει σε μια εκπληκτική εικόνα περίπου 100 δισεκατομμυρίων συσκευών [1], υποστηρίζοντας ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών που καλύπτουν υπηρεσίες ενδεικτικά αναφέρονται : μέτρησης χαμηλού κόστους, της ηλεκτρονικής υγείας, της έξυπνης γεωργίας, του ηλεκτρονικού επιχειρείν και της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Για τους φορείς εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών [1], το IoT δεν σημαίνει μόνο υποστήριξη για πολλές άλλες συσκευές και τεράστια συνδεσιμότητα, αλλά ορίζει επίσης

μια πολλά υποσχόμενη ευκαιρία για την προσφορά πρωτοποριακών υπηρεσιών και επιχειρηματικών λύσεων στην αλυσίδα αξίας της IoT πέρα από την απλή συνδεσιμότητα. Για το σκοπό αυτό, το 5G επιτρέπει ανοικτές διεπαφές για την υποστήριξη κατακόρυφων επιπέδων-τομέων, δηλαδή τρίτων που δεν κατέχουν υποδομή δικτύου και απαιτούν υπηρεσίες δικτύωσης με συγκεκριμένες ανάγκες, καθώς και νέες επιχειρηματικές λύσεις.

Πολύ σημαντική επίδραση έχει το 5G στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, λόγω του ότι ο συγκεκριμένος τομέας απαιτεί αποτελεσματικές δυνατότητες δικτύωσης σε συνδυασμό με το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και σε συνδυασμό με τεχνολογίες edge δικτύου είναι ιδανική αρχιτεκτονική για μια σειρά παροχής υπηρεσιών όπως αυτόνομη οδήγηση, θέαση των πτηνών, η αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο των οδικών συνθηκών κ.α.

Το 5G θα πρέπει να αξιοποιήσει τα οφέλη της αρχιτεκτονικής του network slicing για να παρέχει ευελιξία στην παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας σε επίπεδο φορέα με ενιαία κάλυψη, ενοποιώντας ετερογενείς τεχνολογίες ραδιοφώνου και δικτύωσης που υποστηρίζουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες 3G (τρίτης γενιάς), LTE (Long Time Evolution) και Wi-Fi , και την αποτελεσματική διασύνδεσή τους με τα νεοεμφανιζόμενα 5G νέα δίκτυα ραδιοφώνου και σταθερής πρόσβασης. Η έννοια του network slicing επικεντρώνεται στην έννοια της βασισμένης στο λογισμικό αναπαράστασης τόσο των πόρων του υλικού όσο και του λογισμικού που εξετάζουν τόσο τις λειτουργίες δεδομένων όσο και / ή του επιπέδου ελέγχου.

Οι τεχνολογίες δικτύων λογισμικού (network softwarization) εισάγονται ως θεμελιώδεις παράγοντες που επιτρέπουν την υλοποίηση των διάφορων απαιτήσεων, όπως εύκολος προγραμματισμός, ευελιξία της υποδομής και προσαρμοστικότητα ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, οι οποίες αναμένονται να παίξουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των 5G VANETs.

Τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών, περιλαμβάνουν τη μείωση των λειτουργικών δαπανών (OPEX) και των κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX), την ταχεία δημιουργία και ανάπτυξη υπηρεσιών, την αποτελεσματική διαχείριση του κύκλου ζωής των υπηρεσιών, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της ποιότητας της εμπειρίας για τους χρήστες.

Το network softwarization [1] αξιοποιεί τεχνολογίες όπως το SDN και το NFV καθώς από την μια πλευρά χρησιμοποιεί τον προγραμματισμό λογισμικού για το σχεδιασμό, την υλοποίηση, την ανάπτυξη, τη διαχείριση και τη συντήρηση του εξοπλισμού, εξαρτημάτων και υπηρεσιών του δικτύου, ενώ από την άλλη πλευρά χρησιμοποιεί τεχνολογία εικονοποίησης (virtualization) για την ευελιξία, επαναχρησιμοποίηση των πόρων και γρήγορο επανασχεδιασμό του δικτύου και των υπηρεσιών.

Οι κύριες τεχνολογίες δικτύων λογισμικού που μελλοντικά θα υλοποιηθούν από τα 5G VANETs είναι το Mobile Edge Computing και το Network Slicing, τα οποίες θα έχουν άμεσο αντίκτυπο και στην εξέλιξη των V2X επικοινωνιών (5G PPP Architecture, White Paper, EuCNC 2016).

Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι τεχνολογίες δικτύων λογισμικού (softwarization) είναι η έννοια του σχεδιασμού, της αρχιτεκτονικής, την ανάπτυξη και τη διαχείριση

στοιχείων του δικτύου, βασισμένα κυρίως σε ιδιότητες προγραμματισμού λογισμικού [3]. Επιτρέπουν την ευελιξία, την προσαρμοστικότητα και ακόμη και τη συνολική αναδιάρθρωση ενός δικτύου *on the fly*, με βάση τις έγκαιρες απαιτήσεις και συμπεριφορές, λαμβάνοντας υπόψη τη βελτιστοποίηση του κόστους και της διαδικασίας στη συνολική συντήρηση του κύκλου ζωής του δικτύου.

Ο τεμαχισμός δικτύου, από την άλλη πλευρά, επιδιώκει να διασφαλίσει την προσαρμογή της υπηρεσίας, την απομόνωση και την υποστήριξη των διαφόρων συστατικών σε μια κοινή υποδομή φυσικού δικτύου, επιτρέποντας τον λογικό και φυσικό διαχωρισμό των πόρων του δικτύου.

Η ανάπτυξη λογισμικού αναμένεται να επηρεάσει διάφορες πτυχές της ανάπτυξης δικτύων και υπηρεσιών όπως τα δίκτυα παροχής περιεχομένου (CDN) ή οι επιταχυντές βίντεο [4], [5]. Έχει δείξει τεράστιες δυνατότητες στην επέκταση και στην ανάπτυξη και τη λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, απλά αποσυνδέοντας τις λειτουργίες του δικτύου από το ιδιόκτητο υλικό και επιτρέποντάς τους να τρέχουν σε μηχανογραφικούς υπολογιστές *off-the-shelf* (COTS) ή σε κέντρα δεδομένων. Αυτή η δυνατότητα καθιστά εφικτή την ανάπτυξη προγραμμάτων λογισμικού, όπως ενημερώσεις / αναβαθμίσεις λειτουργιών, στα απαραίτητα τμήματα δικτύου για την ενεργοποίηση νεότερων λειτουργιών δικτύου ή την απλή επιδιόρθωση σφαλμάτων σε ήδη υπάρχοντα. Η δυνατότητα προσάρτησης νεότερων λειτουργιών στο δίκτυο μέσω προγραμματιζόμενων διεπαφών καθιστά το δίκτυο περισσότερο ευέλικτο, κλιμακωτό, ελαστικό και ίσως αντιδραστικό μέσω της χρήσης τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη [5].

Το *network slicing* έχει αποκτήσει πρόσφατα δυναμική ανάμεσα σε μια συνεχώς αυξανόμενη κοινότητα ερευνητών τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και από τη βιομηχανία. Έχει επίσης επικεντρωθεί σε διάφορους οργανισμούς τυποποίησης (π.χ. 3GPP, IETF) και ITU-T (Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών - Τομέας Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών). Αυτή η ιδέα μπορεί να ανιχνευθεί στην ιδέα του μοντέλου υπολογιστικού νέφους Υποδομής ως Υπηρεσία (IaaS), όπου διάφοροι μισθωτές μοιράζονται πόρους πληροφορικής, δικτύωσης και αποθήκευσης, προκειμένου να δημιουργήσουν διαφορετικά απομονωμένα πλήρως λειτουργικά εικονικά δίκτυα σε μια κοινή υποδομή. Στο πλαίσιο του 5G και πέραν αυτού, ένα τεμάχιο δικτύου είναι μια ενοποίηση εικονικών πόρων (π.χ. VMs) όπου ένα σύνολο Εικονικών Δικτύων Λειτουργιών (VNF) διανοίγεται και συνδέεται μέσω ενός εικονικού δικτύου, π.χ. Virtual Local Area Network (VLAN) και το εικονικό ιδιωτικό δίκτυο (VPN). Η δυνατότητα δημιουργίας, κατά παραγγελία και με προγραμματιζόμενο τρόπο, οικονομικά αποδοτικών διακλαδώσεων δικτύου από απόσταση στη δυναμική παροχή διαφόρων υπηρεσιών θεωρείται σημαντικό χαρακτηριστικό του 5G. Στο πλαίσιο αυτό, συνεχίζονται οι προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός κινητού συστήματος 5G ικανό να αναπτύξει *slices* – τεμάχια δικτύου διαφόρων μεγεθών και δομών.

Το θέμα του *network slicing* είναι καινοτόμο στην ακαδημαϊκή – ερευνητική κοινότητα. Αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές όπως αναφέρονται σε αυτό, βάζοντας συγκεκριμένες παραδοχές για την διατύπωση ερευνητικών θεμάτων. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις προσπάθειες όπως του [6][7] όπου οι συγγραφείς παρουσιάζουν μία σύντομη ανάλυση της κατάστασης της τέχνης του *network slicing* σε 5G χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση της κατάστασης ωρίμανσης των προσδιορισμένων έργων και της

συνάφειά τους προς την εξέλιξη του δικτύου 5G. Επίσης περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο οι πόροι του ασύρματου δικτύου μπορούν να διατεθούν επαρκώς σε φέτες δικτύου χωρίς οι πόροι μιας slice να επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα των άλλων και με έμφαση στο δίκτυο ραδιοεπικοινωνιών (RAN). Άλλα θέματα που θέτουν είναι η μελέτη της έννοιας του network slicing σε 5G ακολουθώντας ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής που αποτελείται από το στρώμα υποδομής, το επίπεδο λειτουργίας δικτύου και το στρώμα υπηρεσιών παρέχοντας μια επισκόπηση και τις αντίστοιχες προκλήσεις. Πολύ ενδιαφέρουσα είναι και οι δουλειά που παρουσιάζεται στα [10][11][12] όπου οι συγγραφείς επικεντρώνονται στο πώς το MEC είναι πλεονεκτικό για το RAN, ειδικά όσον αφορά την καθυστέρηση, τις τεχνολογίες ενεργοποίησης και τις επιλογές orchestration. Επίσης αναφέρουν και άλλα συναφή θέματα όπως υπό το φως του network slicing και των δυνατοτήτων του, όπως το Virtualization Λειτουργιών Δικτύου (NFV) και ο Ορισμός Λογισμικού (SDN).

1.2. Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει εκτεταμένη και εμπειριστατωμένη ανασκόπηση των κυριότερων εννοιών και τεχνολογιών που επιτρέπουν τη διακλάδωση του δικτύου από άκρο σε άκρο που περιλαμβάνει όλες τις πτυχές της τεχνολογίας 5G και δικτύωσης από τα δίκτυα πρόσβασης και πυρήνα στα δίκτυα μεταφοράς με ολιστικό τρόπο . Επίσης επιχειρεί μια ανασκόπηση για τους βασικούς επιχειρησιακούς οδηγούς και τα μεγάλα συνεχιζόμενα ερευνητικά έργα σύμφωνα με την αυτοματοποίηση και ενορχήστρωση slice δικτύου από άκρο σε άκρο καθώς και τη διαχείριση του κύκλου ζωής του. Αυτό αναδεικνύει επίσης τις ρίζες του network slicing καθώς και τις αναδυόμενες τεχνολογίες που περιγράφουν τις διάφορες επιπτώσεις τους στην αρχιτεκτονική εξέλιξη των δικτύων 5G με ιδιαίτερη έμφαση στην ενορχήστρωση και διαχείριση των slices.

Κεφάλαιο 2. Βασικές Απαιτήσεις Δικτύων Πέμπτης Γενιάς (5G)

2.1. Απαιτήσεις υπηρεσιών

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να φέρουν την επανάσταση στην εμπειρία των χρηστών, εισάγοντας νέες απαιτήσεις για τη διαμόρφωση των πλατφορμών δικτύων για την προώθηση νέων καινοτόμων υπηρεσιών. Αυτές οι υπηρεσίες έχουν ποικίλες απαιτήσεις, οι οποίες συνεπάγονται υψηλότερο όγκο επισκεψιμότητας δεδομένων και δυνητικό αριθμό συσκευών. Η αρχική κυκλοφορία των 5G αναμενόταν να ολοκληρωθεί μέχρι το 2020, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αναδυόμενες απαιτήσεις των επιχειρήσεων και των καταναλωτών. Με βάση το IMT-2020, εισάγονται οι ακόλουθοι στόχοι για έρευνα και καινοτομία:

- Χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση (low latency), δηλ., 1 ms υπεράνω του αέρα (over the air) και υψηλή αξιοπιστία, πυκνότητα χρήστη με χωρητικότητα κυκλοφορίας περιοχής 10 Mbps / m²,
 - μέγιστο ποσοστό δεδομένων 10 Gbps με συγκεκριμένα σενάρια που υποστηρίζουν έως και 20 Gbps,
- Συνέχεια υπηρεσιών (service continuity) υπό υψηλή κινητικότητα με 500km/h, πυκνότητα σύνδεσης με 10 συσκευές ανά km²,
 - ταχύτητα δεδομένων 100 Mbps για κάλυψη ευρείας περιοχής,
 - τριπλάσια φασματική απόδοση (δηλ. Σε σύγκριση με 4G),
 - 100 φορές πιο ενεργειακά αποδοτική δικτύωση
 - διάρκεια ζωής των αισθητήρων μεγαλύτερη από 10 χρόνια.

Το 5GPPP [16] που ενθαρρύνει την έρευνα προς την κατεύθυνση των 5G, έφερε το φως στις απαιτήσεις του 5G μέσω του εμβληματικού έργου METIS που εισήγαγε τις ακόλουθες δυνατότητες δικτύων στόχων [18]:

- Γρήγορη: Μια λειτουργία που θα επιτρέπει την άμεση σύνδεση δικτύου για όλες τις εφαρμογές, παρέχοντας ταχύτητες δεδομένων 10 Gbps.
- Εξαιρετική υπηρεσία στο πλήθος (Great service in a crowd): Ένα χαρακτηριστικό που θα επιτρέψει μια ευρυζωνική εμπειρία, ανεξάρτητα από την πυκνότητα του χρήστη, εξασφαλίζοντας έναν όγκο κίνησης 9 Gbytes / h και ένα ρυθμό δεδομένων μέχρι 20 Mbps ανά χρήστη.
- Η καλύτερη εμπειρία σας ακολουθεί: Μια λειτουργία που επιτρέπει σε μια εμπειρία δικτύου σταθερής τηλεφωνίας για χρήστες εν κινήσει, με τουλάχιστον 100 Mbps στην κατερχόμενη ζεύξη και 20 Mbps στην ανερχόμενη ζεύξη.
- Επαλήθευση σε πραγματικό χρόνο και αξιόπιστη: Ένα χαρακτηριστικό που στοχεύει στην υποστήριξη επικοινωνιών τύπου κρίσιμης για την κρίσιμη στιγμή της μηχανής, εξασφαλίζοντας αξιοπιστία 99,999% και καθυστέρηση από άκρο σε άκρο έως και 5ms.
- Τα πανταχού παρόντα στοιχεία: Ένα χαρακτηριστικό που στοχεύει στην παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας για αισθητήρες και ενεργοποιητές, υποστηρίζοντας 300.000 συσκευές ανά κυψέλη, ενώ παράλληλα παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών με τη σειρά μιας δεκαετίας.

Αυτές οι βασικές απαιτήσεις υπηρεσίας ενθαρρύνουν την ταχεία διάθεση νέων υπηρεσιών (π.χ. χρόνος εγκατάστασης μικρότερης των 90 λεπτών) και τη μείωση κατά

80% των λειτουργικών εξόδων διαχείρισης δικτύου (OPEX). Τα IMT-2020 και 5GPPP έχουν εντοπίσει την ανάγκη για ενισχυμένη ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής ζωής, χωρίς να έχει προχωρήσει σε κάποια ποσοτικοποίηση αυτών.

Επιπροσθέτως, το 5G αναμένεται να διευκολύνει ένα επιχειρηματικό οικοσύστημα, επιτρέποντας την προσφορά καινοτόμων υπηρεσιών και δυνατοτήτων δικτύωσης όχι μόνο για τους καταναλωτές αλλά και για αυτά τα επιχειρηματικά σχήματα που θέλουν να δραστηριοποιηθούν σε νέες αγορές. . Ως εκ τούτου, η 5G θα πρέπει να υιοθετήσει νέες εταιρικές σχέσεις και επιχειρηματικά μοντέλα για διάφορους τύπους πελατών, αποτελώντας το βασικό πλεονέκτημα για να καταστεί δυνατή και εφικτή η καθετοποίηση σε επίπεδο δραστηριότητας στην βιομηχανία και να συμβάλει στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση που έχει αντίκτυπο σε πολλούς τομείς [18]. Αυτές οι νέες κάθετες επιχειρηματικές αγορές – τομείς (Verticals) μπορούν να διευκολύνουν την ανάπτυξη νέων προϊόντων και υπηρεσιών, ενώ οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να δημιουργήσουν εταιρικές σχέσεις για την επιτάχυνση της ανάπτυξης υπηρεσιών δικτύου ή για τη δημιουργία εξατομικευμένων υπηρεσιών σε επιχειρηματικά σχήματα που δραστηριοποιούνται σε κάθετες αγορές. Οι επιχειρηματικοί ρόλοι που θα διευκόλυνε η αρχιτεκτονική 5G μέσω του virtualization και του slicing είναι οι εξής:

- **Οι πάροχοι υποδομής:** προσφέρουν τη φυσική υποδομή δικτύου και είναι υπεύθυνοι για αναβαθμίσεις και συντήρηση. Επί του παρόντος, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων αναλαμβάνουν το ρόλο των παρόχων υποδομής. Ωστόσο, στο αναδυόμενο 5G, οι τρίτοι παίκτες μπορούν να παρέχουν υλικό δικτύωσης και συνδεσιμότητα σε ιδιωτικούς ή κοινοτικούς εσωτερικούς χώρους, π.χ. σε ένα στάδιο ή εμπορικό κέντρο.
- **Προμηθευτές λύσεων Υπολογιστικού νέφους (Cloud Providers) (cloud providers):** διευκολύνουν τρίτους με πόρους υπολογισμών και αποθήκευσης και πιθανές υπηρεσίες cloud, π.χ. πλατφόρμα ως υπηρεσία, όπως το Openstack του Linux, το Elastic Compute Cloud της υπηρεσίας Amazon Web (EC2), το Kubernetes της Google και το Azure της Microsoft.
- **Οι φορείς εκμετάλλευσης εικονικών δικτύων:** να μισθώνουν πόρους από έναν πάροχο υποδομής είτε για να συμπληρώσουν τη δική τους χωρητικότητα ή / και κάλυψη (π.χ. Lycabmobile, Lebara και Virgin Mobile), είτε να αποκτήσουν κάλυψη δικτύου σε περίπτωση που δεν διαθέτουν υλική υποδομή. Τέτοιοι μισθωμένοι πόροι μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή σύνθετων και χρονοβόρων διαδικασιών για την απόκτηση χώρων σε αστικές περιοχές καθώς και στην ενίσχυση της κάλυψης του δικτύου με χαμηλό κίνδυνο σε απομακρυσμένες περιοχές.
- **Διαμεσολαβητές υπηρεσιών:** αλληλοεπιδρούν με το φυσικό δίκτυο, συλλέγουν πληροφορίες απορρόφησης πόρων και ενεργούν ως μεσολαβητές που αντιστοιχίζουν τις αιτήσεις παροχής υπηρεσιών που προέρχονται από φορείς εικονικών δικτύων, παρόχους εφαρμογών και κατακόρυφες πηγές, στους πόρους του φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ένας μεσίτης υπηρεσιών μπορεί να αποτελεί συστατικό μέρος του παρόχου υποδομής, του φορέα εκμετάλλευσης κινητού δικτύου ή ενός ανεξάρτητου τρίτου μέρους.
- **Παροχείς εφαρμογών:** προσφέρουν, με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια, υπηρεσίες που λειτουργούν πάνω από ένα δίκτυο που ανήκει σε έναν φορέα εκμετάλλευσης. Οι εφαρμογές 5G με υψηλή κατανάλωση δεδομένων ενδέχεται να ωθήσουν τους παρόχους υπηρεσιών (π.χ. Netflix και Hulu) να αγοράσουν

πόρους δικτύου από φορείς εκμετάλλευσης, προκειμένου να ενθαρρύνουν τους τελικούς χρήστες να καταναλώνουν τις υπηρεσίες τους χωρίς να χρεώνονται ανά χρήση του όγκου δεδομένων. Επιπλέον, η εφαρμογή με αυστηρές απαιτήσεις μπορεί να προκαθορίσει ένα σύνολο απαιτήσεων με τους φορείς εκμετάλλευσης για συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών (SLA) για να εξασφαλίσει ικανοποιητική εμπειρία χρήστη.

- **Verticals:** προσφέρουν μια ποικιλία υπηρεσιών σε μια βιομηχανία που δεν σχετίζεται με συγκεκριμένες τηλεπικοινωνίες, αξιοποιώντας πόρους δικτύου και cloud από φορείς εκμετάλλευσης δικτύων και παρόχους cloud. Το μεγαλύτερο μέρος της νέας ανάπτυξης αναμένεται να πραγματοποιηθεί μέσω της ψηφιοποίησης των κάθετων βιομηχανιών όπως τα εργοστάσια, οι μεταφορές και η υγειονομική περίθαλψη. Μπορούν να δημιουργηθούν εταιρικές σχέσεις μεταξύ διαφόρων επιχειρηματικών φορέων μέσω δικτύων και πηγών σύννεφων, έκθεσης δυνατοτήτων δικτύου, υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας και πληροφοριών πλαισίου δικτύου, καθώς και παροχής υπηρεσιών 5G ως προγραμματιζόμενου και προσανατολισμένου λογισμικού. Ο τεμαχισμός στο δίκτυο είναι βασική τεχνολογία και επιχειρηματικός παράγοντας για το 5G, διευκολύνοντας την πολυεπίπεδη και βελτιωμένη κάλυψη δικτύου για τρίτους με ευέλικτο τρόπο, εξασφαλίζοντας ένα πρόσθετο έσοδο για τους φορείς εκμετάλλευσης, τις υποδομές και τους παρόχους cloud. Οι φέτες δικτύου μπορούν να δημιουργηθούν σε μόνιμη βάση ή κατ'απαίτηση, είτε ευκαιριακά είτε περιοδικά, με πόρους δικτύου και cloud που ανήκουν σε έναν ή περισσότερους φορείς εκμετάλλευσης ή σε ένα συνδυασμό διαφορετικών επιχειρηματικών παραγόντων.

Κεφάλαιο 3. 3GPP Network Sharing

Η κοινή χρήση δικτύου 3GPP περιγράφεται στο Rel.99, όπου η κοινή χρήση δικτύου εισήχθη για πρώτη φορά στα κινητά δίκτυα UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Αυτή η ενότητα παρέχει μια επισκόπηση των επιχειρηματικών απαιτήσεων, την παθητική και ενεργή κοινή χρήση δικτύου και τη διαχείριση κοινής χρήσης δικτύου.

3.1. Απαιτήσεις Network Sharing

Ο αρχικός σχεδιασμός του κινητού δικτύου GSM (Global System for Mobile Communications) δεν υποστηρίζει την κοινή χρήση, αλλά έγινε σύντομα εμφανές ότι ένα τέτοιο χαρακτηριστικό ήταν απαραίτητο, ειδικά με την άφιξη του UMTS, που απαιτούσε νέες αναπτύξεις δικτύου. Η Ομάδα Εργασίας 3GPP Services SA1 αρχικά κατέγραψε [44] τις απαιτήσεις των υπηρεσιών και των χρηστών που πρέπει να πληρούνται για να καταστεί δυνατή η ανταλλαγή δικτύων με κάποια μορφής τυποποίησης, καθορίζοντας τα ακόλουθα πέντε βασικά επιχειρηματικά σενάρια:

- Πολλαπλά δίκτυα πυρήνα που μοιράζονται ένα κοινό RAN (multiple core networks sharing a common RAN), όπου οι φορείς εκμετάλλευσης μοιράζονται στοιχεία RAN συνδέοντας τον ίδιο ελεγκτή δικτύου ραδιοσυχνοτήτων (RNC), αλλά όχι το φάσμα.
- Συνεργασία των χειριστών για την ενίσχυση της κάλυψης (Operator collaboration to enhance coverage), όπου δύο ή περισσότεροι φορείς εκμετάλλευσης με ατομικές άδειες συχνότητας και RAN που καλύπτουν διαφορετικές περιοχές παρέχουν συνολική κάλυψη για ολόκληρη τη χώρα.
- Κοινή κάλυψη σε συγκεκριμένες περιοχές (Sharing coverage on specific regions), επιτρέποντας σε έναν φορέα εκμετάλλευσης να μοιράζεται την κάλυψή του με τους συνδρομητές άλλου φορέα εκμετάλλευσης. Εκτός της περιοχής αυτής, η κάλυψη παρέχεται από κάθε φορέα ανεξάρτητα.
- Κοινή κατανομή ραδιοφάσματος (common spectrum sharing) λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες δύο παραλλαγές: i) ένας φορέας εκμετάλλευσης διαθέτει άδεια συχνότητας και μοιράζεται το φάσμα του και ii) ορισμένοι φορείς εκμετάλλευσης αποφασίζουν να συγκεντρώσουν το ατομικό τους φάσμα μαζί για να σχηματίσουν ένα μεγάλο φάσμα και να το μοιραστούν.
- Πολλαπλά δίκτυα RAN μοιράζονται ένα κοινό δίκτυο πυρήνα (Multiple RANs share a common core network), με κάθε RAN και φάσμα που ανήκουν σε διαφορετικούς φορείς.

Ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου θα πρέπει να είναι σε θέση να διαφοροποιεί τις υπηρεσίες του από τις υπηρεσίες άλλων φορέων στο κοινόχρηστο δίκτυο και να εξασφαλίζει τη συνέχεια της υπηρεσίας ενώ η κοινή χρήση του δικτύου είναι διαφανής για τους τελικούς χρήστες.

3.2. Παθητική και ενεργή κοινή χρήση δικτύου

Η πρώτη γενιά κοινής χρήσης δικτύου περιλάμβανε απλές εμπορικές λύσεις, εστιάζοντας στην παθητική κοινή χρήση και την περιαγωγή δικτύου. Η παθητική κοινή χρήση δικτύου χαρακτηρίζεται από την κοινή χρήση των τοποθεσιών του χώρου και την υποστήριξη του RAN εξοπλισμό χωρίς την ανάγκη ενεργού συντονισμού μεταξύ των εταιρών. Η παθητική κατανομή αρχικά επικεντρωνόταν στην κοινή χρήση της τοποθεσίας, για να

διευκολύνει την απόκτηση του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη το χώρο και προαιρετικά την κατανομή καταφυγίων, τροφοδοσίας, κλιματισμού και άλλων εγκαταστάσεων υποστήριξης, αλλά με χωριστές εγκαταστάσεις ανισοτήτων, κεραιών και εξοπλισμού για επισκευές. Ακολούθησε η κοινή χρήση των ιστών, επιτρέποντας στους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας να μοιράζονται επιπλέον το πλαίσιο της κεραιάς, διατηρώντας όμως τον δικό τους εξοπλισμό RAN, προσφέροντας χωριστή κάλυψη.

Η διαδοχική ενεργή συμμετοχή RAN επικεντρώθηκε στην ανταλλαγή σταθμών βάσης, κεραιών, κεντρικού δικτύου και κινητού εξοπλισμού backhaul, επιτρέποντας επίσης στους φορείς εκμετάλλευσης να μοιράζονται πόρους ραδιοφάσματος με βάση συμβατικές συμφωνίες ορισμένου χρόνου. Τρεις τύποι ενεργού καταμερισμού δικτύων εξετάζονται στο [45],

- επικεντρώνονται μόνο στο RAN,
- εκτείνεται πέρα από το RAN προς τον πυρήνα
- περιαγωγή.

Η Ομάδα Εργασίας Αρχιτεκτονικής 3GPP SA2 καθόρισε δύο διαφορετικούς τύπους ενεργών αρχιτεκτονικών κοινής χρήσης δικτύου όπως τεκμηριώνονται στο [46], συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Δίκτυο πυρήνα πολλαπλών λειτουργιών (Multi Operator Core network -MOCN): επικεντρώνεται στην κατανομή του RAN, συμπεριλαμβανομένου του φάσματος, όπου κάθε συμμετέχων φορέας διατηρεί ξεχωριστό EPC. Οι κοινόχρηστοι σταθμοί βάσης συνδέονται με το EPC κάθε συμμετέχοντος χειριστή μέσω ξεχωριστής διεπαφής S1. Αυτό επιτρέπει στους χειριστές να προσαρμόζουν τις λειτουργίες RAN στους διαθέσιμους πόρους.
- Δίκτυο πυρήνα (Gateway Core Network - GWCN): επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης να μοιράζονται το RAN και επιπλέον τον φορέα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Agency - MME). Μια τέτοια προσέγγιση είναι αποδοτική από πλευράς κόστους επειδή μπορεί να μοιραστεί περισσότερο εξοπλισμό δικτύου, αλλά είναι λιγότερο ευέλικτη, δηλαδή είναι συγκεκριμένη για το LTE, περιορίζοντας την κινητικότητα προς διαφορετικές τεχνολογίες RAN και επηρεάζοντας την εναλλαγή εναλλαγής κυκλώματος παλαιού τύπου για φωνητική κίνηση. Η κοινή χρήση δικτύου είναι διαφανής για την UE, η οποία μπορεί να διακρίνει έως και έξι παρόχους κοινής χρήσης με βάση το δημόσιο Land Mobile Mobile Identifier (PLMN) -id μέσω της διασύνδεσης Uu. Τέτοιο PLMN-id χρησιμοποιείται για να επιτρέψει στους UEs να αποκτήσουν συνδεσιμότητα, δηλ. Να επιλέξουν το επιθυμητό δίκτυο και να εκτελέσουν μια παράδοση όπως ορίζεται στο [47]. Η διασύνδεση S1 στηρίζει με τη σειρά της την ανταλλαγή PLMN-IDs μεταξύ τερματικών και MME, βοηθώντας την επιλογή του αντίστοιχου κεντρικού δικτύου [48], ενώ η διασύνδεση X2 υποστηρίζει ισοδύναμη ανταλλαγή PLMN-id μεταξύ γειτονικών eNBs για σκοπούς παράδοσης [49]. Η περιαγωγή είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για ενεργό διαμοιρασμό δικτύων, ο οποίος δεν συνεπάγεται την κοινή χρήση εξοπλισμού δικτύου, αλλά ο φορέας εκμετάλλευσης φιλοξενεί μια υπηρεσία δικτύου που απευθύνεται σε επισκέπτες και βασίζεται σε συμβατική πολιτική συμφωνία και σε αντάλλαγμα πρόσθετου τέλους χρέωσης [45].

3.3. Διαχείριση Network Sharing

Εξετάζεται η έννοια της διαχείρισης της κοινής χρήσης δικτύων σε σχέση με τις επιδόσεις, τις συμφωνίες και τις πολιτικές κοινής χρήσης από την ομάδα εργασίας 3GPPP Services SA1 στην [50], παρουσιάζοντας τα ακόλουθα σενάρια χρήσης:

- Παρακολούθηση ανταλλαγής RAN λαμβάνοντας υπόψη
 - τις μετρήσεις που πρέπει να μοιράζονται με έναν συμμετέχοντα χειριστή με βάση τις πολιτικές ρύθμισης του ξενιστή,
 - τις πληροφορίες που επιτρέπουν στον συμμετέχοντα χειριστή να διαχειρίζεται τους πόρους που έχουν διατεθεί, π.χ. σε περίπτωση συναγερμού
 - συλλογή πληροφοριών ποιότητας κάλυψης RAN από ΕΕ.
- ευελιξία στην κατανομή της χωρητικότητας σε σχέση με
 - έσοδα, π.χ. για σταθερή ή καθορισμένη διάρκεια, πρώτη εξυπηρέτηση,
 - ασύμμετρη ή άνιση κατανομή πόρων και έλεγχος ανά συμμετέχοντα,
 - εξισορρόπηση φορτίου σε κοινό RAN, τις συμφωνημένες μετοχές,
 - την αυτοματοποιημένη διαμεσολάβηση δυναμικότητας για τους συμμετέχοντες φορείς εκμετάλλευσης κατόπιν αιτήματος,
 - τη δυναμική κατανομή RAN που διαφοροποιεί τους πόρους που κατανέμονται κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών περιόδων και τον βαθμό λεπτομέρειας (granularity), π.χ. στο επίπεδο του ραδιοφάσματος.
- Η RAN μοιράζεται φόρτιση σε όρους
 - ενεργοποίησης συμβάντος για τη δημιουργία εγγραφών χρέωσης, π.χ. ένα UE εισάγει ή εξέρχεται κοινό RAN
 - χρέωση συμφιλίωσης που επιτρέπει στον κεντρικό υπολογιστή να επαληθεύει ανεξάρτητα τη χρήση του κοινόχρηστου RAN και να δημιουργεί χρεώσεις ανά ποσό των δεδομένων για κάθε επίπεδο QoS.
- Δυνατότητα ραδιοτηλεοπτικής μετάδοσης (RAN) για τη δυνατότητα
 - UEs να επιλέξουν το οικείο PLMN με βάση την καθοδήγηση του οικοδεσπότη
 - δημόσια προειδοποίηση σε καθορισμένες περιοχές κάλυψης για να προειδοποιήσουν τις UEs για επείγουσες συνθήκες σχετικές με τη δημόσια ασφάλεια.

Μια τέτοια μελέτη οδήγησε την ομάδα εργασίας 3GPP για τη Διαχείριση Τηλεπικοινωνιών SA5 στην επέκταση του παραδοτέου διαχείρισης δικτύου παλαιού τύπου ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις κοινής χρήσης δικτύου [51], λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες αρχιτεκτονικές κοινής χρήσης δικτύου. Αυτό το πρότυπο διαχείρισης κοινής χρήσης δικτύου εισάγει τον κύριο χειριστή (Master Operator - MOP) ως έναν μόνο φορέα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κοινή ανάπτυξη υποδομών, συμπεριλαμβανομένου του φάσματος και συναφών λειτουργιών. Συγκεκριμένα, ο MOP παρέχει υπηρεσίες διαχείρισης δικτύων σε συμμετέχοντες φορείς εκμετάλλευσης (POPs), μέσω ενός ενισχυμένου συστήματος διαχείρισης που αναφέρεται ως MOP Network Manager (MOPNM). Το MOP-NM ρυθμίζει ποιο POP μοιράζεται ένα στοιχείο δικτύου ή ένα κοινό διαχειριστή τομέα RAN / core domain.

Το MOP-NM παρέχει ειδοποιήσεις στο αντίστοιχο POP σε περίπτωση συναγερμού και επιτρέπει στους POPs να ενεργοποιούν πληροφορίες ποιότητας ραδιοφωνικής κάλυψης

βασισμένες σε σηματοδότηση από συνδρομητές που διαμένουν στο κοινόχρηστο RAN, δηλ. Μια διαδικασία γνωστή ως Ελαχιστοποίηση δοκιμών κίνησης (MDT) [50]. Το MOP-NM επικοινωνεί με το POP Network Manager (POP-NM) μέσω της διεπαφής Type 5, δηλ. Της διεπαφής περιαγωγής, για την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης δικτύου στο κοινόχρηστο δίκτυο. Για τη διαχείριση του κοινόχρηστου δικτύου, το MOP-NM χρησιμοποιεί τη διεπαφή Itf-N για επικοινωνία με τον διαχειριστή τομέα RAN και κεντρικού τομέα ή απευθείας με τον διαχειριστή στοιχείων εξοπλισμού, ο οποίος είναι ενισχυμένος με διακριτές ρυθμίσεις POPs και υποστήριξης, παρακολούθηση συναγεμμού και επιδόσεων. Η επικοινωνία μεταξύ του διαχειριστή τομέα RAN / core και του εξοπλισμού δικτύου εκτελείται μέσω της διασύνδεσης Itf-B.

Κεφάλαιο 4. Τεμαχισμός Δικτύων 5G (5G Network Slicing)

4.1. Βασικές αρχές για το Network Slicing

Η ανάπτυξη δικτύων 5G διαμορφώθηκε αρχικά από το NGMN μέσω της εισαγωγής ενός βιομηχανικού οράματος για την 5G όπως συνοψίζεται στο [29], το οποίο αντιμετωπίζει τις αναδυόμενες ανάγκες των υπηρεσιών και των επιχειρήσεων εντός του χρονικού στόχου του 2020 και μετά. Ο κύριος στόχος του 5G είναι να καταστεί δυνατή η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος που παρέχει μια πλήρως κινητή και σταθερή εμπειρία που να διευκολύνει έναν κοινωνικοοικονομικό μετασχηματισμό με πολλούς τρόπους, πολλοί από τους οποίους δεν έχουν ακόμη έρθει. Το NGMN αναμένει επίσης μια σειρά αναδυόμενων υποθέσεων χρήσης 5G με έμφαση στα εξής:

- Ενισχυμένη ευρυζωνική πρόσβαση παντού (enhanced broadband access everywhere): προβλέπει ένα ελάχιστο εύρος ζώνης, τουλάχιστον 50 Mbps, εξασφαλίζοντας μια συνδεδεμένη παγκόσμια κοινωνία, μέσω Internet υψηλής ταχύτητας. Αυτό το στοιχείο μπορεί να εξυπηρετήσει μια προεπιλεγμένη γενική χρήση.
- Ενισχυμένη ευρυζωνική πρόσβαση σε πυκνοκατοικημένες περιοχές (enhanced broadband access in dense areas): παρέχει ευρυζωνική πρόσβαση με εύρος ζώνης έως και 10 Gbps σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, π.χ. γήπεδα ή φεστιβάλ υπαίθρου, επιτρέποντας υπηρεσίες πολυμέσων, π.χ., ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας.
- Υψηλή κινητικότητα χρηστών (High user mobility): προσφέρει ευρυζωνική υποστήριξη για χρήστες κινητών τηλεφώνων σε εξαιρετικά γρήγορα κινούμενα οχήματα όπως τρένα υψηλής ταχύτητας.
- Μαζικό Ίντερνετ των πραγμάτων (Massive Internet of Things): υποστηρίζει την ευρυζωνική πρόσβαση για εξαιρετικά πυκνά δίκτυα αισθητήρων και ενεργοποιητών, λαμβάνοντας υπόψη τις συσκευές που χρειάζονται εξαιρετικά χαμηλού κόστους, μεγάλης απόστασης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, π.χ. παρέχοντας μετρήσεις χρησιμότητας.
- Εξαιρετική επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο (Extreme real time communication): διασφάλιση της εξαιρετικά χαμηλής συνδεσιμότητας λανθάνουσας κατάστασης, π.χ.
- Εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία (ultra reliable communication): παρέχει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση [34], αξιοπιστία και διαθεσιμότητα σύνδεσης δικτύου, π.χ. αυτόνομη οδήγηση.
- Επικοινωνία Γραμμής Ζωής – Έκτακτα Γεγονότα (Lifeline communication): υποστηρίζει τη διασύνδεση σε περίπτωση φυσικών καταστροφών και καταστάσεων έκτακτης ανάγκης που μπορούν να προσαρμόσουν εύελικτα μια ξαφνική τεράστια αύξηση της κυκλοφορίας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ανθεκτική συνδεσιμότητα.
- Υπηρεσία τύπου μετάδοσης εκπομπής (Broadcast – like service): παρέχει συνδεσιμότητα δικτύου για εκπομπή, π.χ. ενημερώσεις ειδήσεων ή υλικολογισμικού, για παράδειγμα, για να βελτιώσει το σύστημα θραύσης ενός αυτοκινήτου ή να δημιουργήσει μια εντοπισμένη τρύπα ασφαλείας στα αυτοκίνητα [35].
- Lightweight επικοινωνία (lightweight communication) [36]: παρέχει συνδεσιμότητα δικτύου για τη στήριξη των βασικών πληροφοριών σχετικά με τις

παραμέτρους παράδοσης, διαμόρφωσης και συντήρησης. • Πολλαπλή σύνδεση (multi – connection): εξασφαλίζει συνδεσιμότητα δικτύου για χρήστες με διαφορετικές έξυπνες συσκευές, π.χ. smart glass και smartphones, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης.

Ορισμένες από αυτές τις περιπτώσεις χρήσης επιβάλλουν ποικίλες και συχνά αντικρουόμενες απαιτήσεις απόδοσης, ενώ άλλες μπορούν εύκολα να συνδυαστούν, καθώς οι απαιτήσεις υπηρεσίας είναι παρόμοιες. Οι περιπτώσεις χρήσης με διαφορετικές απαιτήσεις απόδοσης μπορούν να υλοποιηθούν από διαφορετικές φέτες δικτύου. Τυπικά, οι απαιτήσεις υπηρεσιών και ασφάλειας καθορίζουν τον τύπο της slice του δικτύου, ενώ άλλες διοικητικές πτυχές, π.χ. χρέωση, μπορούν να διακρίνουν περαιτέρω φέτες λαμβάνοντας υπόψη το επιχειρηματικό μοντέλο. 3GPP (SMARTER) [37] στην Ομάδα Εργασίας 3GPP Services SA 1. Η μελέτη αυτή αναλύει νέα τμήματα της αγοράς και επιχειρηματικές ευκαιρίες που θα μπορούσαν να ξεκινήσουν με την εισαγωγή 5G, προσδιορίζοντας περισσότερες από 70 περιπτώσεις χρήσης, οι οποίες στη συνέχεια ομαδοποιήθηκαν στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- Ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB) [38]: επικεντρώνεται κυρίως σε περιπτώσεις ομπρέλας χρήσης με απαιτήσεις υπηρεσίας που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν με το Evolved Packet System (EPS). Το eMBB στοχεύει στη διευκόλυνση της υποστήριξης υψηλών ρυθμών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της κατεύθυνσης ανερχόμενης ζεύξης, στην υποδοχή υψηλού όγκου κίνησης δεδομένων και στην συνδεσιμότητα εξοπλισμού χρήστη ανά περιοχή, στην παροχή ευρυζωνικών συνδέσεων και κάλυψης, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη σταθερή κινητή σύγκλιση και την υψηλή κινητικότητα των χρηστών, με πολύ μεταβλητούς ρυθμούς δεδομένων. Ως εκ τούτου, το eMBB απαιτεί υψηλή χωρητικότητα δικτύου, χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και υψηλή διαθεσιμότητα δικτύου.
- Critical Communications (Cric) [39]: υποστηρίζει την ανάγκη υπηρεσιών που απαιτούν εξαιρετική αξιοπιστία και επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης με απώλεια πακέτων τόσο χαμηλή όσο 1 πακέτο από κάθε 10.000 πακέτα και καθυστέρηση 1ms. Το Cric στοχεύει στη διευκόλυνση των κρίσιμων υπηρεσιών αποστολής, του αυτοματισμού και του ελέγχου της βιομηχανίας, της Αυξημένης Πραγματικότητας/Εικονικής Πραγματικότητας (AR/VR), του απτικού Internet, της δημόσιας ασφάλειας και της αντιμετώπισης καταστροφών και έκτακτης ανάγκης. Το Cric πρέπει να διευκολύνει την απομόνωση, την ιεράρχηση προτεραιοτήτων, την ταχεία ρύθμιση της επικοινωνίας, το πολύ χαμηλό jitter, την ακρίβεια της θέσης και την υποστήριξη τοπικού περιεχομένου, εφαρμογών και υπηρεσιών.
- Το Massive Internet of Things (MIIoT) [40]: διευκολύνει τη συνδεσιμότητα για υψηλή πυκνότητα συσκευών, τυπικά σταθερές με απαιτήσεις που δεν απαιτούν χρόνο, αλλά χρειάζονται ασφάλεια, καθώς και διαμόρφωση και λειτουργική απλότητα που επιτρέπει μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Το MIIoT αναμένεται να επιτρέψει έξυπνες λύσεις φορητότητας, ηλεκτρονικής υγείας και αισθητήρων που επιτρέπουν έξυπνη οικία / πόλη [41], γεωργία και έξυπνες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Το MIIoT θα πρέπει να παρέχει ένα κοινό πλαίσιο επικοινωνίας και διασύνδεσης για διάφορες συσκευές, υποστηρίζοντας την ποικιλομορφία της συνδεσιμότητας και της υπολογιστικής ακμής για την κλιμάκωση.

- Ενισχυμένο όχημα σε όλα (eV2X) [43]: εστιάζει σε (i) τις υπηρεσίες που σχετίζονται με την ασφάλεια, όπως η αυτόνομη οδήγηση, οι στρατιωτικές εφαρμογές (δηλαδή, τα στενά συνδεδεμένα οχήματα), καθώς και η συνεργατική οδήγηση που επιτρέπει άμεσες επικοινωνίες με οχήματα και (ii) υπηρεσίες άνεσης, όπως ψυχαγωγία, κινητά τηλεοπτικά κανάλια και ενημερώσεις χάρτη. Το eV2X θα πρέπει να επιτρέπει υψηλό εύρος ζώνης, χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση μέχρι 1ms και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, ενσωματώνοντας πληροφορίες δικτύου και σύννεφο για την υποστήριξη εικόνας, βίντεο και μια σειρά υπηρεσιών εγγύτητας λαμβάνοντας υπόψη τους πεζούς και τα σενάρια οχημάτων υψηλής πυκνότητας. Το eV2X πρέπει να εξασφαλίζει τη συνέχεια της υπηρεσίας ανεξάρτητα από την ταχύτητα, ακόμη και χωρίς κάλυψη δικτύου, και να υποστηρίζει την κινητικότητα μεταξύ των συστημάτων διευκολύνοντας την υψηλή ακρίβεια θέσης. Για διαφορετικές υπηρεσίες V2X συνιστώνται διαφορετικές φέτες.

4.2. Τεχνικές Network Slicing σε παλαιότερης γενιάς δίκτυα

Ο τεμαχισμός δικτύων βασίζεται σε έννοιες εικονικοποίησης, οι οποίες άρχισαν ήδη από τη δεκαετία του 1960 [19], [20] όταν το πρώτο λειτουργικό σύστημα (CP-40) αναπτύχθηκε από την IBM. Ο σχεδιασμός του CP-40 στο σύστημα IBM 360/40 υποστηρίζει την ανταλλαγή χρόνου και την εικονική μνήμη, εισάγοντας μια σημαντική ανακάλυψη στον υπολογισμό, εξυπηρετώντας μέχρι και δεκαπέντε χρήστες ταυτόχρονα [22] με την ψευδαίσθηση της εργασίας μεμονωμένα σε ένα πλήρες σύνολο υλικού και λογισμικού [19], [22]. Η ιδέα της εικονικοποίησης, δηλ. Η δημιουργία μιας εικονικής μορφής μιας φυσικής οντότητας μέσω μεθόδων και διαδικασιών λογισμικού, δημιούργησε το όραμα των εικονικών συστημάτων που καλύπτουν όλες τις πλατφόρμες υπολογιστών, τους πόρους δικτύου και τις συσκευές αποθήκευσης [21]. Η εικονικοποίηση υιοθετήθηκε ευρέως για τα κέντρα δεδομένων στη δεκαετία του '70 και στις αρχές της δεκαετίας του '80, εφαρμόστηκε στη δικτύωση, για την ασφαλή σύνδεση απομακρυσμένων τοποθεσιών με ελεγχόμενη απόδοση μέσω του Διαδικτύου.

Η εισαγωγή δικτύων επικάλυψης στα τέλη της δεκαετίας του '80 που συνίστανται σε κόμβους που συνδέονται μέσω λογικών δεσμών που σχηματίζουν ένα εικονικό δίκτυο μέσω ενός δικτύου που αποτελείται από φυσική υποδομή, μπορεί να θεωρηθεί ως μια πρώιμη μορφή κοπής σε δίκτυο, συνδυάζοντας ετερογενείς πόρους σε διάφορους διοικητικούς τομείς. Τα δίκτυα επικάλυψης παρέχουν εγγυήσεις QoS με γνώμονα την εξυπηρέτηση. Έχουν ευέλικτη φύση αλλά δεν είναι αυτοματοποιημένα ούτε προγραμματιζόμενα. Μέχρι το 2000, οι πλατφόρμες πρώτης γενιάς για την επαλήθευση και την αξιολόγηση νέων πρωτοκόλλων δικτύου δημιουργήθηκαν με βάση τα δίκτυα επικάλυψης. Το PlanetLab [23], [24] υιοθέτησε ένα κοινό πακέτο λογισμικού που ονομάζεται MyPLC και επιτρέπει την κατανομή εικονικοποίησης, επιτρέποντας στους χρήστες να αποκτούν μεμονωμένες φέτες συγκεκριμένης εφαρμογής. Μια slice ορίστηκε ως ένα στοιχείο μονάδας με κατανομημένους πόρους όπως υπολογιστική ισχύς / αποθήκευση σε διακομιστές ή πόρους που υπάρχουν σε χώρους ονομάτων. Ωστόσο, τέτοιες πλατφόρμες επικάλυψης είχαν περιορισμούς σε ελέγχους δικτύου υπόγειο δίκτυο.

Το 2008, το πρόγραμμα GENI, μια πρωτοβουλία του Εθνικού Ιδρύματος Επιστήμης των ΗΠΑ (NSF) [25], προώθησε την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας βασισμένης σε τεχνολογίες virtualization δικτύου για την προώθηση της έρευνας σε ένα καθαρό δίκτυο σχιστόλιθου, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις ομοσπονδιακές πηγές και τα περιβάλλοντα κινητών δικτύων [26]. Το GENI προσφέρει όργανα μέτρησης και μέτρησης που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή ενεργών και παθητικών μετρήσεων και για την απεικόνιση και ανάλυση των αποτελεσμάτων μέτρησης [27]. Μέχρι το 2009, οι τεχνολογίες του δικτύου που καθορίστηκαν από το λογισμικό (SDN) επέτρεψαν στους ερευνητές να εκτελούν τα πειράματά τους σε μια slice από υπάρχοντα δίκτυα πανεπιστημιούπολεων, επιτρέποντας την προγραμματισμό μέσω ανοικτών διεπαφών [21].

4.3. Η έννοια και οι αρχές 5G Τεμαχισμού δικτύου (Slice Network)

Ο τεμαχισμός του δικτύου στο πλαίσιο του 5G είναι μια νέα έννοια που εισήχθη από το NGMN (Next Generation Mobile Network) στο [29]. Ο τεμαχισμός σε δίκτυα διευκολύνει τη δημιουργία πολλών λογικών αυτοτελών δικτύων πάνω από μια κοινή πλατφόρμα φυσικής υποδομής που επιτρέπει ένα ευέλικτο οικοσύστημα ενδιαφερομένων που επιτρέπει την τεχνική και επιχειρηματική καινοτομία που ενσωματώνει τους φυσικούς και / ή λογικούς πόρους του δικτύου και του cloud σε ένα προγραμματιζόμενο, περιβάλλον. Το 3GPP ορίζει τον τεμαχισμό του δικτύου ως τεχνολογία που «επιτρέπει στον χειριστή να δημιουργεί δίκτυα προσαρμοσμένα ώστε να παρέχει βελτιστοποιημένες λύσεις για διάφορα σενάρια αγοράς που απαιτούν ποικίλες απαιτήσεις, π.χ. όσον αφορά τη λειτουργικότητα, τις επιδόσεις και την απομόνωση [30]. Για το ITU-T, ο τεμαχισμός του δικτύου θεωρείται Logical Isolated Partition Networks (LINP) που αποτελείται από πολλαπλούς εικονικούς πόρους, απομονωμένους και εξοπλισμένους με προγραμματιζόμενο επίπεδο ελέγχου και δεδομένων [31].

Ο τεμαχισμός σε δίκτυα επιτρέπει τη δημιουργία αξίας για κάθετα τμήματα, παρόχους εφαρμογών και τρίτους που δεν διαθέτουν υποδομή φυσικού δικτύου, προσφέροντας πόρους ραδιοφώνου, δικτύωσης και cloud, επιτρέποντας μια προσαρμοσμένη λειτουργία δικτύου και πραγματική διαφοροποίηση υπηρεσιών. Τα VNF, τα οποία αποτελούν μια sliced δικτύου, μπορεί να ποικίλουν δραστικά ανάλογα με τις ανάγκες εξυπηρέτησης της συγκεκριμένης slice. Ο τύπος υπηρεσίας που συνδέεται με μια sliced δικτύου θα καθορίσει τους πόρους και την επεξεργασία που θα λάμβανε το τεμάχιο δικτύου, π.χ. μια sliced δικτύου επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο θα λάμβανε τους κατάλληλους πόρους και την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας για να καλύψει τις απαιτήσεις χαμηλής λανθάνουσας απόστασης [32].

Ο τεμαχισμός σε δίκτυο βασίζεται στις ακόλουθες επτά βασικές αρχές που διαμορφώνουν την έννοια και τις σχετικές λειτουργίες:

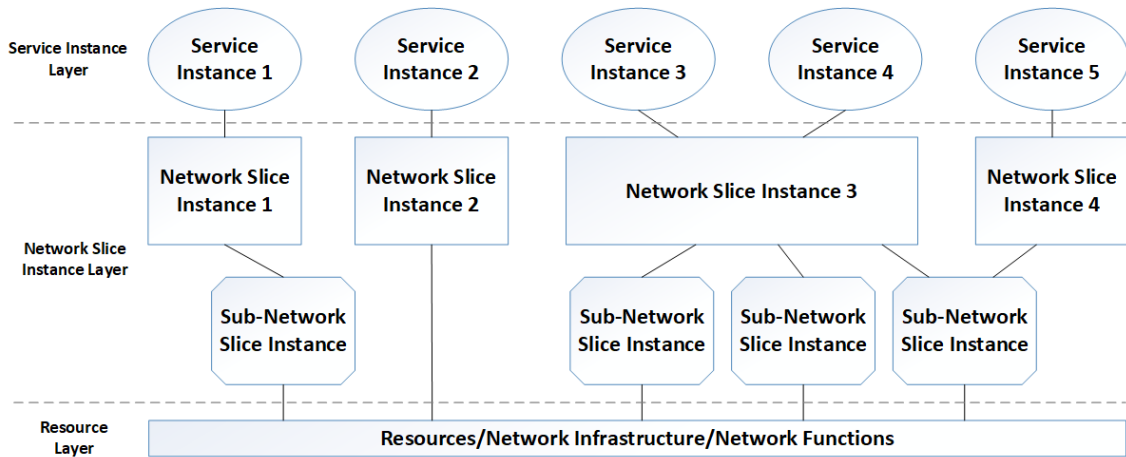
- **Αυτοματισμοί:** επιτρέπουν τη διαμόρφωση κατά παραγγελία του network slicing χωρίς να χρειάζονται σταθερές συμβατικές συμφωνίες και χειρωνακτική παρέμβαση. Μια τέτοια βολική λειτουργία βασίζεται σε μηχανισμούς που βασίζονται σε σηματοδότηση, οι οποίοι επιτρέπουν σε τρίτους να υποβάλλουν ένα αίτημα δημιουργίας slices που να δείχνει εκτός από το συμβατικό SLA το οποίο θα αντικατοπτρίζει την επιθυμητή χωρητικότητα, καθυστέρηση, jitter κλπ.,

Πληροφορίες χρονισμού λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο έναρξης και λήξης και τη διάρκεια ή την περιοδικότητα ενός τεμαχίου δικτύου.

- **Απομόνωση:** αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του δικτύου που εξασφαλίζει εγγυήσεις απόδοσης και ασφάλειας (για την υπεράσπιση του ανοίγματος του δικτύου σε τρίτους) για κάθε μισθωτή ακόμη και όταν διαφορετικοί μισθωτές χρησιμοποιούν φέτες δικτύου για υπηρεσίες με αντικρουόμενες απαιτήσεις απόδοσης. Εντούτοις, η απομόνωση μπορεί να συμβεί με το κόστος της μείωσης του πολλαπλασιαστικού κέρδους, ανάλογα με τα μέσα διαχωρισμού των πόρων για ρητή χρήση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου. Η έννοια της απομόνωσης δεν περιλαμβάνει μόνο το επίπεδο δεδομένων αλλά και το επίπεδο ελέγχου, ενώ η εφαρμογή του καθορίζει τον βαθμό διαχωρισμού των πόρων. Η απομόνωση μπορεί να αναπτυχθεί:
 - χρησιμοποιώντας έναν διαφορετικό φυσικό πόρο,
 - όταν ο διαχωρισμός μέσω εικονικοποίησης σημαίνει ένα κοινό πόρων
 - μέσω της κοινής χρήσης ενός πόρου με την καθοδήγηση μιας αντίστοιχης πολιτικής που καθορίζει τα δικαιώματα πρόσβασης για κάθε μισθωτή.
- **Προσαρμογή:** διασφαλίζει ότι οι πόροι που διατίθενται σε έναν συγκεκριμένο μισθωτή χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για την καλύτερη κάλυψη των αντίστοιχων απαιτήσεων υπηρεσίας. Η προσαρμογή του Slice μπορεί να πραγματοποιηθεί
 - σε ευρύ επίπεδο δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη την απορροφημένη τοπολογία και τον διαχωρισμό των δεδομένων και του επιπέδου ελέγχου,
 - στο επίπεδο δεδομένων με λειτουργίες δικτύου προσαρμοσμένες στις υπηρεσίες και μηχανισμό προώθησης δεδομένων,
 - Στο επίπεδο ελέγχου(control plane) εισάγοντας προγραμματιζόμενες πολιτικές, λειτουργίες και πρωτόκολλα
 - μέσω υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, όπως μεγάλα δεδομένα κ.α.
- **Ελαστικότητα:** είναι μια βασική λειτουργία που σχετίζεται με τους πόρους που διατίθενται σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιθυμητή SLA υπό διαφορετικές συνθήκες όπως : (i) συνθήκες ραδιοφώνου και δικτύου, (ii) ο αριθμός των εξυπηρετούντων χρηστών ή (iii) γεωγραφική περιοχή κάλυψης λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Αυτή η ελαστικότητα πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με αναμόρφωση της χρήσης των πόρων που έχουν διατεθεί με κλιμάκωση προς τα πάνω / κάτω ή μετεγκατάσταση VNF και υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας ή με προσαρμογή της εφαρμοζόμενης πολιτικής και επαναπρογραμματισμό της λειτουργικότητας ορισμένων στοιχείων και στοιχείων του επιπέδου ελέγχου. Η ελαστικότητα μπορεί επίσης να λάβει τη μορφή τροποποίησης της ποσότητας των αρχικά κατανεμημένων πόρων, τροποποιώντας τις φυσικές και εικονικές λειτουργίες του δικτύου, π.χ. προσθέτοντας διαφορετική τεχνολογία RAN ή νέο VNF ή ενισχύοντας τη χωρητικότητα του ραδιοφώνου και του δικτύου. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία απαιτεί μια διαμεσολαβητική διαπραγμάτευση, καθώς μπορεί να επηρεάσει την απόδοση άλλων slices που μοιράζονται τους ίδιους πόρους.
- **Προγραμματισιμότητα:** επιτρέπει στα τρίτα μέρη να ελέγχουν τους πόρους που έχουν διατεθεί, δηλαδή τους πόρους δικτύωσης και του cloud, μέσω ανοιχτών API που εκθέτουν τις δυνατότητες δικτύου διευκολύνοντας την προσαρμογή κατά παραγγελία και την ελαστικότητα των πόρων.

- **Από άκρο σε άκρο:** αποτελεί εγγενή ιδιότητα του network slicing για τη διευκόλυνση της παράδοσης υπηρεσιών από τους φορείς παροχής υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες / πελάτες. Μια τέτοια ιδιότητα έχει δύο επεκτάσεις,
 - εκτείνεται σε διαφορετικούς διοικητικούς τομείς, δηλαδή μια slice που συνδυάζει πόρους που ανήκουν σε διακεκριμένους παρόχους υποδομών.
 - ενοποιεί διάφορα στρώματα δικτύου και ετερογενείς τεχνολογίες, π.χ. δίκτυο, μεταφορά και σύννεφο. Συγκεκριμένα, ένας τεμαχισμός από άκρο σε άκρο (end-to-end slicing) ενοποιεί διάφορους πόρους που καθιστούν δυνατή την επικάλυψη ενός στρώματος υπηρεσιών, το οποίο παρέχει νέες ευκαιρίες για αποτελεσματική σύγκλιση δικτύων και υπηρεσιών.
- **Ιεραρχική αφαίρεση:** είναι μια ιδιότητα του δικτύου που έχει τις ρίζες του σε αναδρομική εικονικοποίηση, όπου η διαδικασία αφαίρεσης πόρων επαναλαμβάνεται σε ένα ιεραρχικό πρότυπο με κάθε διαδοχικά υψηλότερο επίπεδο, προσφέροντας μια μεγαλύτερη αφαίρεση με ένα ευρύτερο πεδίο. Με άλλα λόγια, οι πόροι του ένα τεμάχιο δικτύου, που κατανέμεται σε έναν συγκεκριμένο μισθωτή, μπορεί να διατεθεί περαιτέρω είτε μερικώς είτε πλήρως σε έναν άλλο τρίτο ενοικιαστή (tenant), ο οποίος σχετίζεται με τον ενοικιαστή slice δικτύου διευκολύνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο μια άλλη υπηρεσία slice δικτύου πάνω από την προηγούμενη. Για παράδειγμα, ένας εικονικός φορέας εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας ο οποίος απέκτησε ένα τεμάχιο δικτύου από έναν πάροχο υποδομής προσφέρει ένα μερικό ποσό τέτοιων πόρων για να επιτρέψει σε έναν παροχέα υπηρεσιών κοινής ωφέλειας που χρησιμοποιεί το εικονικό του δίκτυο για να σχηματίσει ένα κομμάτι IoT.

Σύμφωνα με το [33], η διαδικασία network slicing κατανέμεται γενικά σε τρία κύρια επίπεδα, δηλαδή το στρώμα στιγμιότυπων υπηρεσίας (service instant layer), το στρώμα στιγμιότυπων δικτύου (the network slice instance layer) και το στρώμα πόρων (resource layer), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4. Κάθε στιγμιότυπο υπηρεσίας αντικατοπτρίζει μια παρεχόμενη υπηρεσία από κάθετο τμήμα, πάροχο εφαρμογών ή φορέα εκμετάλλευσης κινητού δικτύου. Το στιγμιότυπο της slice του δικτύου αντιπροσωπεύει ένα σύνολο από πόρους που προσαρμόζονται για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις απόδοσης μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας και μπορεί να μην περιέχουν κανένα ή , ένα ή πολλές διαφορετικές υποδικτύου, απομονωμένες ή κοινόχρηστες. Μια υπομονάδα υποδικτύου μπορεί να είναι μια λειτουργία δικτύου, π.χ. υποσύστημα IP Multimedia ή υποσύνολο λειτουργιών δικτύου ή πόροι δικτύου που πραγματοποιούν ένα τμήμα μιας παροχής στιγμιότυπου δικτύου.



Εικόνα 4. The NGMN network slicing concept.

Κάθε παράσταση κλάσης δικτύου εγκαθίσταται από άκρο σε άκρο και μπορεί να περιέχει διαφορετικά υπο-δίκτυα διακεκριμένων διοικητικών και / ή τεχνολογικών τομέων που είναι πλήρως ή εν μέρει, απομονωμένα λογικά ή / και φυσικά από μια άλλη παράθεση slice δικτύου. Συγκεκριμένα, οι πόροι που συνδέονται με ένα υποσύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με απομονωμένο, διαζευκτικό ή κοινό τρόπο, ακολουθώντας τις συγκεκριμένες πολιτικές και τις ρυθμίσεις διαμόρφωσης του δικτύου. Ένα στιγμιότυπο(instance) slice δικτύου, με τη σειρά της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά από μια παρουσίαση υπηρεσίας ή να μοιραστεί μεταξύ διαφόρων υπηρεσίας διαφοράς, τυπικά του ίδιου τύπου. Οι κοινές αφαιρέσεις σχετικών πόρων και οι ανοικτές προγραμματιζόμενες διεπαφές επιτρέπουν τον δυναμικό έλεγχο και την αυτοματοποίηση των περιπτώσεων slice δικτύου που αντανακλούν τις δυναμικές απαιτήσεις υπηρεσιών.

4.4. Τεχνικές Network Slicing

Η εμφάνιση των τεχνολογιών εικονικοποίησης έδειξε τεράστια αποδιοργανωτικά πλεονεκτήματα και ευκαιρίες όσον αφορά την πολυετή λειτουργία, την προγραμματισιμότητα και την ευελιξία τόσο στις επιχειρηματικές πρωτοβουλίες δικτύωσης όσο και στις υπολογιστικές εφαρμογές. Οι τεχνολογίες εικονικοποίησης αποτελούν βασικό παράγοντα για τον τεμαχισμό του δικτύου. Αυτή η ενότητα ανασκοπεί αυτές τις θεμελιώδεις τεχνολογίες virtualization από το πρίσμα του network slicing.

4.4.1. Hypervisor

Η ιδέα της εικονικοποίησης έχει εισαγάγει ένα πρόσθετο στρώμα μεταξύ μιας κανονικής φυσικής υποδομής και του λειτουργικού συστήματος που εκτελείται στην κορυφή. Αυτή η στρώση είναι υπεύθυνη για την παραγωγή, τον έλεγχο και τη διαχείριση εικονικών μηχανών και αναφέρεται ως Virtual Machine Monitor (VMM) ή με άλλο τρόπο ως hypervisor. Ο Hypervisor είναι ένα firmware υλικολογισμικό, το οποίο παρέχει μια εικονική πλατφόρμα για λειτουργικά συστήματα φιλοξενούντων (guest operating systems) που επιτρέπουν την εκτέλεση εφαρμογών ή / και άλλων υπηρεσιών. Οι Hypervisors ενεργοποιούν και εποπτεύουν την κοινή χρήση των πόρων υλικού μεταξύ των στιγμιότυπων του δικτύου. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι hypervisor, δηλαδή ο τύπος-1, που αναφέρεται ως bare metal hypervisors και ο τύπος-2, επίσης γνωστός ως φιλοξενούμενος (hosted) hypervisor. Οι hypervisors τύπου 1 ονομάζονται bare metal hypervisors επειδή εγκαθίστανται απευθείας στο υλικό του μηχανισμού υποδοχής, δηλαδή με τον ίδιο τρόπο που εγκαθίσταται ένα λειτουργικό σύστημα. Παραδείγματα υποεπιλογής τύπου 1 περιλαμβάνουν τον διακομιστή Oracle OVM για SPARC, XEN, VMware ESX / ESXi [54] και την εικονική μηχανή βασισμένη στο Kernel (KVM) [56] του Linux. Οι τύποι-2 ή οι φιλοξενούμενοι hypervisors εγκαθίστανται πάνω από το λειτουργικό σύστημα του κεντρικού υπολογιστή, όπως και σε άλλες εφαρμογές υπολογιστών. Οι hypervisors κατηγορίας 2 περιλαμβάνουν το Oracle Virtual Box , τη συγχώνευση VMware [58], τον VMware Workstation player και το Oracle VM για το x86. Εκτός από τους θεμελιώδεις δύο τύπους hypervisor, ένας τρίτος, γνωστός ως επίπεδο λειτουργικού συστήματος (επίπεδο OS), εικονικοποιεί (virtualizes) πολλούς εξυπηρετητές (servers) που λειτουργούν σε απομονωμένα δοχεία (isolated containers). Οι hypervisors επιπέδου OS υποστηρίζουν μόνο το λειτουργικό σύστημα παρόμοιο με εκείνο του κεντρικού υπολογιστή αφού οι εικονικοί διακομιστές, επίσης γνωστοί ως Virtual Private Servers (VPS) , μοιράζονται τον πυρήνα του κεντρικού υπολογιστή.

4.4.2. Εικονικές μηχανές (Virtual Machines) και Containers

Στην εικονική πλατφόρμα υπολογιστών, η δημιουργία ενός Virtual Machine (VM) παρέχει το αποτέλεσμα ενός φυσικού πόρου που τρέχει το δικό του λειτουργικό σύστημα. Η πραγματική εικονικοποίηση υλικού λαμβάνει χώρα στο μηχανήμα υποδοχής, ενώ η μηχανή φιλοξενίας είναι το VM. Οι σημερινές πλατφόρμες του cloud είναι ικανές να φιλοξενούν πολλαπλά VM, τρέχοντας ταυτόχρονα και εκτελώντας ταυτόχρονα διαφορετικές εφαρμογές. Κάθε VM μοιράζεται πόρους όπως η πληροφορική, η αποθήκευση, η μνήμη και το δίκτυο, ενώ η λειτουργία του είναι εντελώς απομονωμένη από αυτή του φιλοξενούμενου και των συναδέλφων επισκεπτών VMs. Από την άποψη του υλικού, υπάρχουν δύο τύποι virtualization, δηλαδή η πλήρης εικονικοποίηση (full virtualization) και το paravirtualization. Σε κατάσταση πλήρους εικονικοποίησης, γνωστή και ως φυσική εικονικοποίηση [20], ενεργοποιείται η πλήρης εξομοίωση του υλικού

υποδοχής, όπου μπορούν να εγκατασταθούν εφαρμογές λογισμικού όπως τα λειτουργικά συστήματα των φιλοξενούμενων [61], [62]. Από την άλλη πλευρά, στο paravirtualization, το περιβάλλον υλικού υποδοχής δεν είναι εξομοιωμένο, αλλά το εγκατεστημένο φιλοξενούμενο OS είναι τροποποιημένο για να κάνει τις εφαρμογές λογισμικού να τρέχουν σε απομονωμένους τομείς [63], [64]. Ανάλογα με τον υποκείμενο hypervisor, οι VM, γνωστές ως εικονικές μηχανές συστήματος [65], μπορούν να παρουσιαστούν ώστε να προσφέρουν πλήρη υποστήριξη για ένα πλήρες λειτουργικό σύστημα που εκτελεί πολλαπλές διαδικασίες.

Τα κοντέινερ δημιουργούνται με βάση την ιδέα της virtualization OS level, όπου ένας φυσικός διακομιστής είναι εικονικοποιημένος ώστε να επιτρέπει πολλαπλές παρουσίες απομονωμένων διακομιστών να εκτελούνται ως αυτόνομες εφαρμογές. Τα κοντέινερ αποτελούν εναλλακτικές λύσεις ελαφρού βάρους σε VM που βασίζονται σε hypervisor, χρησιμοποιώντας την αφαίρεση επιπέδου OS για να χωρίσουν τους πόρους του συστήματος δημιουργώντας πολλαπλές απομονωμένες παρουσίες διακομιστή χώρου χρήστη [66]. Παραδείγματα virtualization με βάση τα κοντέινερ περιλαμβάνουν Linux-Vserver, OpenVZ, Solaris Container και Docker. Τόσο τα δοχεία όσο και τα VMs είναι ικανά να εκτελούν VNFs, τα οποία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους για την παροχή μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας δικτύου με ευέλικτο τρόπο, σχηματίζοντας τη βασική λειτουργικότητα για τον τεμαχισμό σε δίκτυο. Ωστόσο, ενώ οι VM μπορούν να προσφέρουν πλήρη λογική απομόνωση για τη λειτουργία VNF σε μια sliced δικτύου, η ελαφριά φύση των εμπορευματοκιβωτίων μπορεί να υποστηρίξει αποδοτικά τις φέτες του δικτύου με ιδιαίτερα κινητούς χρήστες.

4.4.3. Network Function Virtualization (NFV)

Το NFV επιτρέπει την ανάπτυξη αρχικά βασισμένων στο υλικό λειτουργιών του ιδιόκτητου δικτύου σε εικονικά περιβάλλοντα, αξιοποιώντας την αποδοτικότητα ως προς το κόστος και τα οφέλη του χρόνου από την αγορά του cloud computing. Τα VNF αναπτύσσονται σε VM, τα οποία μπορούν να συνδεθούν μαζί σε ένα καταναμημένο περιβάλλον cloud προσφέροντας υπηρεσίες δικτύου ή προστιθέμενης αξίας [84]. Το αρχιτεκτονικό πλαίσιο NFV [1] ορίζει:

- VNFs που είναι εφαρμογές λογισμικού λειτουργιών δικτύου που αναπτύσσονται σε εικονικά περιβάλλοντα.
- Υποδομή NFV (NFVI), η οποία περιλαμβάνει τα δομικά στοιχεία των συνιστωσών της υποδομής δηλ. Την αποθήκευση, τον υπολογισμό, το δίκτυο και τα αντίστοιχα βοηθητικά συστατικά υλικού.
- Διαχείριση & ενορχήστρωση (MANO) που είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση και ενορχήστρωση των VNF και του NFVI.

Στο πλαίσιο του network slicing, το πλαίσιο NFV επιτρέπει την αλυσιδωτή εξυπηρέτηση [82], την ενσωμάτωση VNF προσανατολισμένη στην ικανότητα και την καθυστέρηση, καθώς και τη διαχείριση των VNF. Συγκεκριμένα, ο NFV εισαγάγει έναν ευέλικτο τρόπο σύνδεσης αλυσίδων VNFs χρησιμοποιώντας μια δυναμική δημιουργία ενός NFFG (Network Function Forwarding Graph) που προσφέρει έναν αποτελεσματικό έλεγχο στις λειτουργίες του δικτύου. Η χρήση ενός NFFG επιτρέπει μια on the-fly ανάπτυξη των υπηρεσιών δικτύου θεωρώντας ένα διαφορετικό σύνολο λειτουργιών δικτύου, οι οποίες μπορεί να είναι virtualized ή nonvirtualized ανάλογα με τις ανάγκες της υπηρεσίας

δικτύου. Η ενορχήστρωση NFV, που ορίζεται ως αυτοματοποίηση, διαχείριση και λειτουργία του κατανεμημένου NFVI, είναι υπεύθυνη για την ευρεία ενορχήστρωση και τη διαχείριση του υλικού και του λογισμικού και για την παροχή υπηρεσιών NFV. Για την ενημέρωση του NFVI και την παράδοση υπηρεσιών, η αρχιτεκτονική MANO ορίζει τα ακόλουθα τρία βασικά λειτουργικά στοιχεία [1]:

- Ο NFV Orchestrator (NFVO) είναι υπεύθυνος για
 - (i) την ενορχήστρωση των πόρων του δικτύου, δηλαδή την ενορχήστρωση του NFVI με τη βοήθεια του VIM (που μπορεί να είναι περισσότερα από ένα), σε έναν διοικητικό τομέα, εξουσιοδότηση αιτημάτων πόρων NFVI από τον διαχειριστή VNF
 - (iii) διαχείριση κύκλου ζωής υπηρεσίας δικτύου. Σε συντονισμό με τον διαχειριστή VNF, η NFVO εκτελεί την ενορχήστρωση και τη διαχείριση του κύκλου ζωής των αλυσίδων εξυπηρέτησης VNF σε ένα τεμάχιο δικτύου.
- Ο VNF Manager (VNFM) είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του κύκλου ζωής μιας απλής ή πολλαπλών παρουσιών VNF του ίδιου ή διαφορετικού τύπου, που εκτελούνται σε ένα κομμάτι δικτύου. Μία τέτοια διαδικασία περιλαμβάνει διαμόρφωση VNF και δημιουργία στιγμιότυπου λαμβάνοντας υπόψη ένα πρότυπο slice δικτύου, κλιμάκωση εισόδου / εξόδου και άνω / κάτω και συλλογή πληροφοριών απόδοσης NFVI που σχετίζονται με περιπτώσεις slice δικτύου.
- Ο Virtualised Infrastructure Manager (VIM) ελέγχει και διαχειρίζεται τους πόρους που σχετίζονται με το NFVI που συνήθως ανήκουν σε έναν μόνο φορέα εκμετάλλευσης δικτύου. Ανάλογα με τη ρύθμισή του, ένα VIM μπορεί να είναι αφιερωμένο, ελέγχοντας έναν συγκεκριμένο τύπο πόρων NFVI, π.χ. έναν υπολογιστικό πόρο ή για τη διαχείριση πολλαπλών πόρων NFVI. Για μια slice δικτύου, το VIM κατανέμει τους πόρους NFVI και διαχειρίζεται τη σύνδεσή τους, δηλ. Την αλυσίδα υπηρεσιών και το σύστημα διεύθυνσης κίνησης.

Μια επισκόπηση των διαφορετικών λύσεων ορχηστρών παρέχεται στα [9] και [86], ενώ δύο από τις πιο ολοκληρωμένες, που μπορούν να εφαρμοστούν για το κόσμημο του δικτύου, είναι οι ακόλουθες:

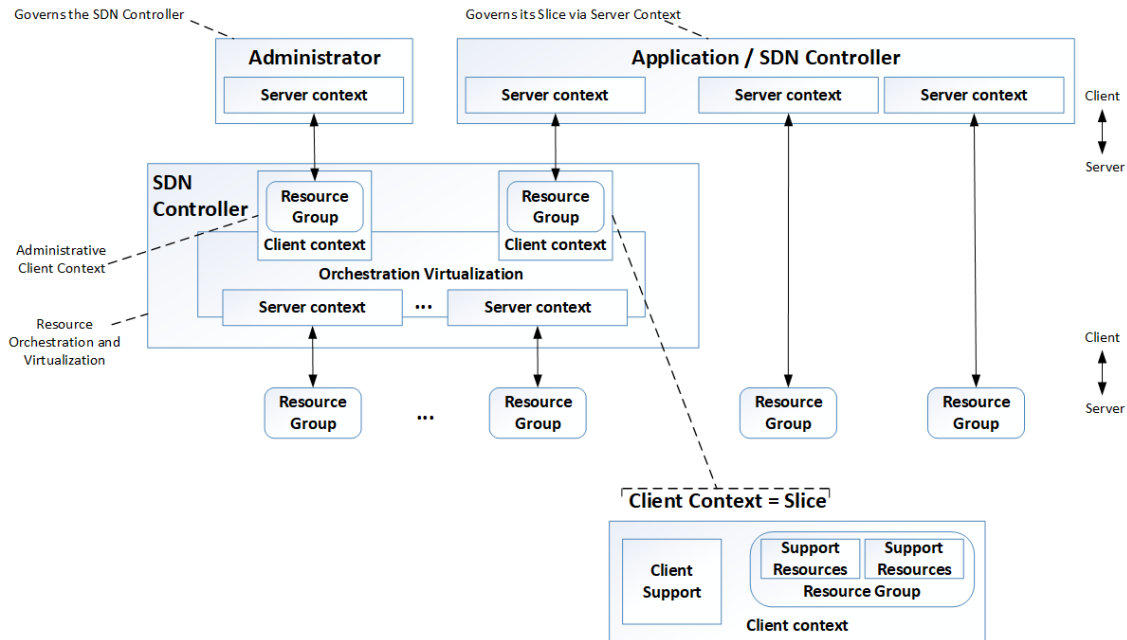
- ECOMP [87] που κατευθύνεται κυρίως από την AT & T. Πρόκειται για μια ανοιχτή πλατφόρμα που παρέχει βελτιωμένο έλεγχο, ενορχήστρωση, διαχείριση και πολιτική. Επεκτείνει το αρχιτεκτονικό σύστημα MANO της ETSI (European Telecommunications Standards Institute), εκτοξεύοντας κατανεμημένους ελεγκτές για να εξασφαλίσει ευελιξία και αξιοπιστία, παράλληλα με έναν ενορχηστρωτή υπηρεσιών δικτύου που ονομάζεται Master Service Orchestrator (MSO). Η ECOMP εισάγει έναν ελεγκτή υποδομής για υπολογιστικούς πόρους, έναν ελεγκτή δικτύου που είναι υπεύθυνος για τη διαμόρφωση του δικτύου και έναν ελεγκτή εφαρμογών για να φροντίσει τα συστατικά στοιχεία της εφαρμογής. Η ECOMP χρησιμοποιεί το στοιχείο σχεδιασμού και δημιουργίας υπηρεσίας AT & T (ASDC) για τη συλλογή μεταδεδομένων σχετικά με υπηρεσίες δικτύου, υποστηρίζοντας ένα μορφότυπο εισαγωγής δεδομένων όπως το TOSCA και το YANG. Το ECOMP διαιρείται ευρέως σε δύο μεγάλα περιβάλλοντα εκτέλεσης:
 - το σχεδιασμό που ορίζει και προγραμματίζει τις απαραίτητες παραμέτρους του συστήματος

- την εκτέλεση που καθορίζει τη λογική για την εκτέλεση μιας πολιτικής κλειστού βρόχου.
- Open-O [88] που υποστηρίζεται από τη βάση LINUX. Επωφελείται από τα πλεονεκτήματα μιας ιεραρχικής τοποθέτησης τριών εντοπιστών, ήτοι από τον Παγκόσμιο Ορχήστρα Υπηρεσιών, το NFVO και το SDN για τη δημιουργία μιας πλατφόρμας ορχήστρας εξυπηρέτησης από άκρο σε άκρο. Το OPEN-O υποστηρίζει υπηρεσίες σύνθετου δικτύου μέσω εικονικών και φυσικών πόρων δικτύου, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα των συνδυασμένων δυνατοτήτων εντοπιστικής, επιτρέποντας την ευκινησία να αυτοματοποιήσει την εντοπιστική των υπηρεσιών από άκρο σε άκρο σε πολλαπλούς τομείς διαχείρισης. Το Open-O βελτιώνει τη διαλειτουργικότητα και την επεκτασιμότητα των υπηρεσιών, ενώ μειώνει το χρόνο διάθεσης στην αγορά για αναδυόμενες υπηρεσίες, υιοθετώντας μοντέλα δεδομένων σε ολόκληρο τον κλάδο, όπως API TOSCA, YANG και REST. Η συγχώνευση των ECOMP και Open-O δημιούργησε την λύση ONAP (Platform Open Automation Platform) [89] υπό το ίδρυμα Linux αξιοποιώντας τα οφέλη και από τα δύο ECOMP και Open-O. Το ONAP δημιουργεί μια ευέλικτη, ανθεκτική και αποδοτική από πλευράς κόστους πλατφόρμα ενοποίησης υπηρεσιών δικτύου.

4.4.4. Software Defined Networking (SDN)

Το Software Defined Networking (SDN) απλοποιεί τη διαχείριση δικτύου, εισάγοντας δυνατότητα προγραμματισμού και ανοιχτή πρόσβαση στο δίκτυο αποσυνδέοντας το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων και μέσω της λογικής συγκέντρωσης πληροφοριών δικτύου. Το SDN παρέχει βασικά χαρακτηριστικά όπως ευελιξία, προσαρμογή προσανατολισμένη στις υπηρεσίες, επεκτασιμότητα και ευρωστία [67], τα οποία είναι απαραίτητα για την ενεργοποίηση του δικτύου. Ένας ελεγκτής SDN διευκολύνει τα τρίτα μέρη του virtualizer και μέσω των μέσων ενός πράκτορα, επιτρέπει την υποστήριξη πολλαπλών μισθώσεων. Σε κάθε μισθωτή έχει εκχωρηθεί μια πολιτική που διέπει τις δυνατότητές του να προγραμματίζει το υποκείμενο στρώμα δεδομένων χρησιμοποιώντας τη λειτουργία επιπέδου ελέγχου δεδομένων.

Από την πλευρά της εξυπηρέτησης των υπηρεσιών το μοντέλο SDN ουσιαστικά είναι ένα μοντέλο κλειστού βρόχου ώστε να μπορεί να διατηρεί την επιθυμητή απόδοση. Στην εικόνα 5 μπορούμε να δούμε την αρχιτεκτονική του SDN. Ο ελεγκτής SDN διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις φέτες δικτύου εφαρμόζοντας κανόνες όταν είναι απαραίτητο και σύμφωνα με την αντίστοιχη πολιτική δικτύου.



Εικόνα 5. The SDN Architecture for Network Slicing.

Συγκεκριμένα, ένας ελεγκτής SDN μπορεί να διατηρήσει μία ξεχωριστή slice δικτύου, η οποία μπορεί να προέρχεται από διαφορετικές πηγές. Αυτό επιτρέπει σε έναν ελεγκτή SDN να διαχειρίζεται δυναμικά τις φέτες του δικτύου μέσω της ομαδοποίησης slices που ανήκουν στο ίδιο πλαίσιο και τη διατήρηση ενός παγκόσμιου χάρτη μεταξύ του αντίστοιχου περιβάλλοντος διακομιστή-πελάτη.

Ορισμένες από τις δημοφιλείς λύσεις SDN, οι οποίες μπορούν να ωφελίσουν τον τεμαχισμό του δικτύου, περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Άνοιγμα λειτουργικού συστήματος δικτύου (Open Network Operating System - ONOS): Η αναφορά [75] αναπτύσσεται ως υπηρεσία σε ένα σύμπλεγμα διακομιστών που επιτρέπει γρήγορη αποκατάσταση βλάβης και κλιμάκωση υπηρεσιών. Στο πλαίσιο του δικτύου, ο ONOS μπορεί να προσφέρει σύνθεση VNF σε περιβάλλον κεντρικού γραφείου και συνδεσιμότητα VPN, π.χ. μέσω δρομολόγησης τμήματος.
- Κινητό κεντρικό γραφείο ανασχεδιασμένο ως κέντρο δεδομένων (Mobile Central Office Re-Architected As a Datacenter - M-CORD): Η αναφορά [76] είναι μια λύση που βασίζεται σε σύννεφο με βάση το CORD αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα του SDN, NFV και της ευελιξίας του cloud computing για την παροχή οικονομικά αποδοτικής δικτύωσης κινητής τηλεφωνίας σε συγκεκριμένες υπηρεσίες. Το M-CORD θέτει τα θεμέλια για τον τεμαχισμό από άκρο σε άκρο 5G, παρέχοντας virtualization και προγραμματισμό του RAN και του κινητού πυρήνα, δηλαδή του vEPC, επιτρέποντας μια διάταξη δικτύου με προσανατολισμό στις υπηρεσίες, η οποία μπορεί να κλιμακωθεί δυναμικά, προσφέροντας λειτουργικότητες παρακολούθησης και ανάλυσης [77].
- OpenDayLight (ODL): Το Reference [75] είναι μια αρθρωτή ανοιχτή πλατφόρμα SDN που προσφέρει προγραμματισμό δικτύου, διευκολύνοντας παράλληλα την προσαρμογή και αυτοματοποίηση δικτύων οποιουδήποτε μεγέθους και κλίμακας. Το ODL περιλαμβάνει τις βάσεις για εμπορικές λύσεις SDN που αφορούν:

- βελτιστοποίηση πόρων δικτύου με βάση το φορτίο και την κατάσταση του δικτύου
 - την προβολή του δικτύου και τον έλεγχο προς τρίτους.
- Η ODL εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρχιτεκτονική μικροεπιχειρήσεων, ώστε να παρέχει δυναμικές, ευέλικτες και προγραμματιζόμενες υπηρεσίες SDN για τη βελτιστοποίηση των υφιστάμενων δικτύων ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες συνεχώς εξελισσόμενων απαιτήσεων εξυπηρέτησης.

4.4.5. Cloud & Edge Computing

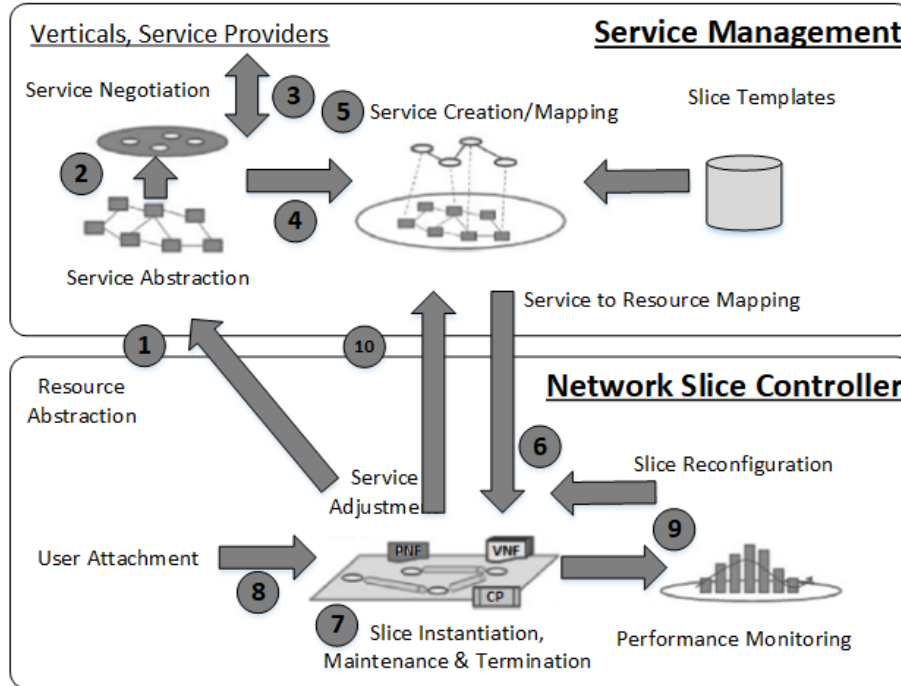
Το Cloud και το Edge Computing προσφέρει αποθηκευτικές, υπολογιστικές και δικτυακές εγκαταστάσεις σε μια ενιαία ή σε πολλαπλές πλατφόρμες για την ενεργοποίηση μιας slice δικτύου. Αυτές οι βασικές υπηρεσίες υποδομής μπορούν να προσφερθούν από ξεχωριστούς παρόχους υπηρεσιών όπως MapReduce και GoogleFS ή αντίστοιχα από παρόχους που προσφέρουν τέτοιου είδους υποδομές όπως : η Amazon, η OpenStack το Rackspace.

4.5. Διαχείριση υπηρεσιών και έλεγχος κόμβου δικτύου

Ο τεμαχισμός του δικτύου παρέχει μια σύνδεση από άκρο σε άκρο, επιτρέποντας τη συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών δικτύου πάνω από μια κοινή υποδομή [33] και στηρίζεται σε μια διαδικασία συνεχούς κλειστού βρόχου που αναλύει τις απαιτήσεις υπηρεσίας για να εξασφαλίσει την επιθυμητή απόδοση. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από:

- Το επίπεδο διαχείρισης υπηρεσιών χειρίζεται λειτουργίες όπως (i) αφαίρεση, διαπραγμάτευση, έλεγχο εισόδου και χρέωσης για κατακόρυφα και τρίτα μέρη (βήματα 2 και 3) και (ii) δημιουργία υπηρεσίας μόλις γίνει αποδεκτό ένα κομμάτι τις απαιτήσεις slice σε συνδυασμό με το κατάλληλο πρότυπο slice (βήματα 4 και 5). Η επιθυμητή υπηρεσία συνδυάζει VNF, φυσικές λειτουργίες δικτύου (PNF), υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας, επίπεδο δεδομένων / ελέγχου και μηχανισμούς ασφαλείας που εκτίθενται στο υποκείμενο δίκτυο (βήμα 6).
- Το επίπεδο ελέγχου slice δικτύου παρέχει την απόσπαση πόρων στη διαχείριση υπηρεσιών (βήμα 1) και χειρίζεται τη διαχείριση των πόρων του τεμαχίου δικτύου καθώς και τις λειτουργίες του αεροπλάνου ελέγχου, συμπεριλαμβανομένης (i) της παράστασης των πόρων slice με βάση τη χαρτογράφηση υπηρεσιών (βήμα 7) επιδιόρθωση επιδόσεων μέσω διαδικασιών παρακολούθησης, ανάλυσης και επανασυγκρότησης slice (βήμα 9) και (iii) επιλογή slice, προσάρτηση και υποστήριξη συνδεσιμότητας πολλαπλών slices (βήμα 8).

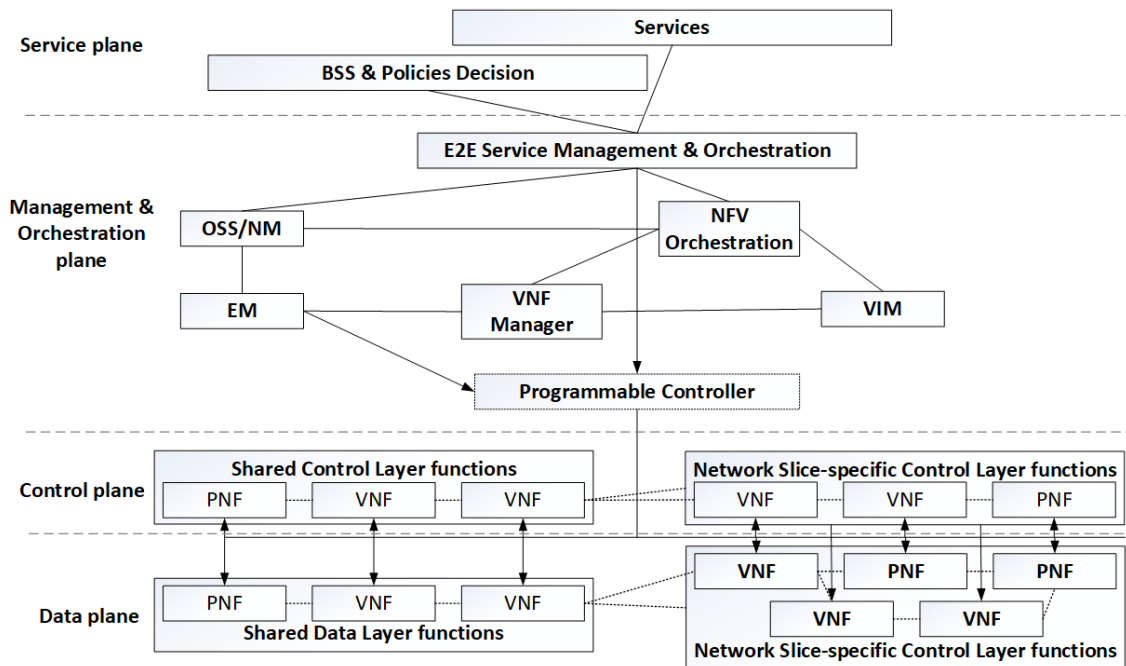
Μια επισκόπηση της διαχείρισης υπηρεσιών και του ελέγχου slice παρουσιάζεται στην εικόνα 6. Όταν η επαναφορά των πόρων δεν είναι επαρκής ή δεν μπορεί να επιτευχθεί η λανθάνουσα διάρκεια για τη διασφάλιση της επιθυμητής υπηρεσίας, ο ελεγκτής τεμαχίων δικτύου έρχεται σε επαφή με το διαχειριστή υπηρεσίας ζητώντας μια προσαρμογή, δηλ., μια επαναδιαμόρφωση από το ένα τεμάχιο (βήμα 10). Αυτή η προσαρμογή μπορεί να περιλαμβάνει τροποποιήσεις παραμέτρων συγκεκριμένων υπηρεσιών ή / και κατανομή περισσότερης τοπολογίας, συνδέσεων ή πόρων νέφους.



Εικόνα 6. Service management and network slice control.

4.6. Network Management & Orchestration

Οι φέτες δικτύου αποτελούνται από VNF, PNF, υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας, πόρους δικτύου και cloud από αποκλειστικό ή κοινόχρηστο λογισμικό και υλικό στο δίκτυο RAN, μεταφοράς και πυρήνα, συνδυάζοντας διαφορετικές τεχνολογίες. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της αρχιτεκτονικής ενορχηστρώσεως του network slicing, λαμβάνοντας υπόψη την προσέγγιση 5GPP [98], απεικονίζεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7. Παράδειγμα της αρχιτεκτονικής ενορχηστρώσεως του network slicing [98].

Η αρχιτεκτονική ενορχήστρωσης τμημάτων δικτύου αποτελείται από:

- Διαχειριστή υπηρεσιών και ενορχηστρωτή υπηρεσίας από άκρο σε άκρο: λαμβάνει αιτήσεις τεμαχισμού δικτύου από κατακόρυφες και τρίτες πλευρές και δημιουργεί ένα κομμάτι με τη διεκπεραίωση μεσιτείας τεμαχίου - slice, έλεγχος εισαγωγής, παροχή πολιτικών και χαρτογράφηση υπηρεσιών, λαμβάνοντας υπόψη το επιθυμητό πρότυπο SLA, για την προσαρμογή και το πρότυπο slice. Παράλληλα δημιουργεί ένα γράφημα υπηρεσίας δικτύου που μεταβιβάζεται στον εικονικό ενορχηστρωτή πόρων.
- Εικονική ενορχήστρωση πόρων: είναι υπεύθυνη για την ενσωμάτωση του VNF και την παράσταση του γραφήματος υπηρεσίας εικονικής υπηρεσίας δικτύου και για την εκτέλεση όλων των σχετικών λειτουργιών MANO που φροντίζουν τη διαχείριση κύκλου ζωής των παρουσιών VNF καθώς και υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας.
- Προγραμματιζόμενος ελεγκτής πόρου δικτύου: διευκολύνει την ευέλικτη αλυσίδα υπηρεσιών VNF, τον έλεγχο QoE και την προγραμματισμό πόρων, διαχωρίζοντας τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων. Ο προγραμματιζόμενος ελεγκτής μπορεί να είναι (i) PNF υποδομής δικτύου που προσφέρει προγραμματισμό δικτύου για λογαριασμό τρίτων ή (ii) Το VNF επιτρέπει σε τρίτους να προγραμματίσουν άμεσα τους πόρους που έχουν διατεθεί. Ένας προγραμματιζόμενος πόρος μπορεί να είναι αφιερωμένος ή να μοιράζεται μεταξύ διαφορετικών ενοικιαστών. Στην μεταγενέστερη περίπτωση, ο προγραμματιζόμενος ελεγκτής επιτρέπει βραχυπρόθεσμες αποφάσεις (π.χ. προγραμματισμό) και πραγματοποιεί συντονισμό πόρων (π.χ. διαχείριση φάσματος) λαμβάνοντας υπόψη τις πολιτικές που έχουν οριστεί.
- Διαχείριση κύκλου ζωής: εκτελεί διαχείριση κληρονομικότητας (legacy), δηλ. λειτουργίες, διαχείριση και διαχείριση (OAM), διαχείριση στοιχείων και παροχή πολιτικής. Μια τέτοια αρχιτεκτονική θεωρεί έναν ευέλικτο διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων σε ένα κοινό και αποκλειστικό τμήμα του δικτύου. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων και οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να προσδιορίσουν και να προσφέρουν ένα ορισμένο σύνολο αρχών για τον καθορισμό της ενορχήστρωσης του τμήματος δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο των υπηρεσιών. Η πραγματοποίηση της αρχιτεκτονικής ενορχηστρώσεως slice δικτύου, με επίκεντρο το RAN και το καταναμημένο κεντρικό δίκτυο, εξετάζεται στο [55]. Η αρχιτεκτονική βασίζεται στις αρχές της υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών και πολυκατοικιών. Μια αρχιτεκτονική τεμαχισμού δικτύου για ολοκληρωμένες επικοινωνίες 5G αναλύεται στο, το οποίο καταδεικνύει την υλοποίησή της για το LTE λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές τεχνολογίες ενορχήστρωσης και ελέγχου.

4.7. Network Slice Broker

Για τη στήριξη της αποδοτικότητας του κόστους και την εξασφάλιση καλών επιδόσεων, ο τεμαχισμός δικτύου χρησιμοποιεί μηχανισμό που αναφέρεται ως Network Slice Broker (NSB), ο οποίος διευκολύνει την κατανομή των πόρων του δικτύου που εκτελούν έλεγχο πρόσβασης, διαπραγμάτευσης πόρων και χρέωσης. Το NSB θεωρεί μια παγκόσμια προβολή δικτύου βασισμένη στον συνδυασμό παρακολούθησης του δικτύου και πρόβλεψης της κυκλοφορίας, προκειμένου να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα πόρων, η λανθάνουσα κατάσταση και η ανθεκτικότητα κατά τη διάρκεια ενός αιτήματος slice.

Εξασφαλίζει την κατανομή των πόρων μεταξύ των τεμαχίων και επιλέγει μια πολιτική διαμόρφωσης για την καθοδήγηση των παραχωρηθέντων πόρων. Μία οικονομική ανάλυση ανάλυσης για την κατανομή των αιτήσεων τεμαχισμού δικτύου, αναφέρεται στην παραπομπή [103] το οποίο λαμβάνει την θεωρία βέλτιστης διακοπής και το όφελος αυτής σε έναν φορέα κινητής τηλεφωνίας.

Τα πρότυπα / πρότυπα slice δικτύου χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός δείγματος δικτύου Slice (NSI), το οποίο παρέχει τα χαρακτηριστικά δικτύου που απαιτούνται από ένα στιγμιότυπο υπηρεσίας. Μια NSI μπορεί να είναι αφιερωμένη ή να μοιραστεί σε πολλαπλές περιπτώσεις λειτουργίας.

Ένα σχέδιο slice – τεμαχίου δικτύου είναι μια πλήρης περιγραφή της δομής, των ρυθμίσεων και των ροών εργασίας για την εμφάνιση και τον έλεγχο μιας NSI που αντανακλά ορισμένα χαρακτηριστικά του δικτύου (π.χ. εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και εξαιρετική αξιοπιστία) [33]. Αναφέρεται στους απαιτούμενους φυσικούς και λογικούς πόρους και στα υποδίκτυα. Οι φέτες-τεμάχια δικτύου σχεδιάζονται έτσι ώστε να αντικατοπτρίζουν τις χαρακτηριστικές δομικές μονάδες, που περιλαμβάνουν τη δομή και τη διαμόρφωση της επιδιωκόμενης υπηρεσίας δικτύου που καθορίζουν μια πλήρη αρχιτεκτονική περιγραφή του δικτύου που καθοδηγεί την εκδήλωση και τον έλεγχο μιας NSI κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της. Από την άλλη πλευρά, ένα πρότυπο slice δικτύου είναι μια λογική αναπαράσταση των λειτουργιών δικτύου και των αντίστοιχων απαιτήσεων πόρων για τη διευκόλυνση των απαιτούμενων υπηρεσιών και δυνατοτήτων δικτύου. Η προκύπτουσα αρχιτεκτονική slice δικτύου είναι στη συνέχεια μια αφαίρεση ενός εντελώς λειτουργικού end-to-end κινητού δικτύου, το οποίο αποτελείται από προσεκτικά συνδεδεμένα PNF και VNF που φιλοξενούνται σε ένα εικονικό περιβάλλον με τη δυνατότητα να είναι ανεξάρτητα από τον πάροχο υποδομής. Μετά από ένα τυπικό σχέδιο slice, με βάση την αρχιτεκτονική πλαισίου NFV του ETSI, το προκύπτον πρότυπο slice θα πρέπει να είναι ανεξάρτητο από το περιβάλλον ανάπτυξης ή τον παροχέα υπηρεσιών εικονικοποίησης. Ορισμένες πολιτικές παροχής πόρων πρέπει να συμφωνηθούν και να θεσπιστούν μεταξύ των ιδιοκτητών slice δικτύου και του παρόχου δικτύου υποδομής με βάση το SLA. Οι υπηρεσίες δικτύου μπορούν να διεξαχθούν με επιτυχία όταν ορισμένοι πόροι δικτύου, δηλ. υπολογιστικοί πόροι και πόροι δικτύωσης, παρέχονται με το βέλτιστο επίπεδο συνέπειας για τη διάρκεια του τεμαχίου του δικτύου.

Δεδομένου ότι οι πόροι δικτύου ενδέχεται να είναι περιορισμένοι, ειδικά σε συγκεκριμένες περιοχές κάλυψης ή σε πλατφόρμες cloud, είναι σημαντικό να παρέχεται βέλτιστα το δίκτυο και η χωρητικότητα σύννεφο σε σχέση με τις ανάγκες απόδοσης υπηρεσιών. Για το σκοπό αυτό, έχουν προταθεί διαφορετικά συστήματα παροχής πόρων και πολιτικής, συμπεριλαμβανομένων τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών. Στο [70], καταρτίζεται μια παροχή δυναμικότητας δικτύου κατ'απαίτηση με τον έλεγχο εισαγωγής βάσει της πρόβλεψης της κυκλοφορίας λαμβάνοντας υπόψη επίσης διαφορετικές τάξεις κυκλοφορίας, εγγυημένη υπηρεσία ή βέλτιστη προσπάθεια και κινητικότητα των χρηστών. Μια μελέτη σχετικά με τις μεθόδους πρόβλεψης της κυκλοφορίας για τον έλεγχο εισαγωγής σε σχέση με τον τεμαχισμό σε δίκτυο εξετάστηκε στο [70], όπου φαίνεται ότι η εκθετική εξομάλυνση Holt-Winters ταιριάζει καλύτερα σε σενάρια πρόβλεψης βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης.

4.8. Διαχείριση Κύκλου Ζωής

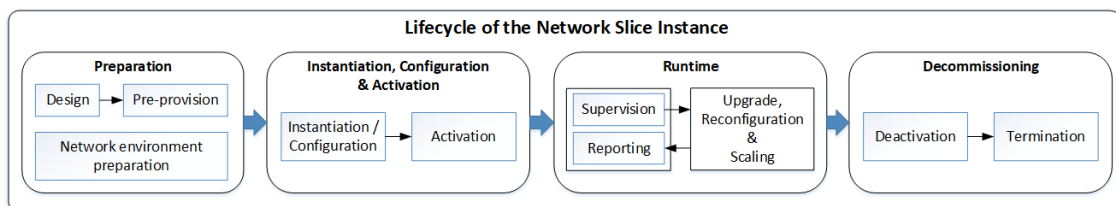
Το 3GPP στο έγγραφο μελέτης [70] αποσυνδέει τη διαχείριση του κύκλου ζωής μιας NSI από την αντίστοιχη υπηρεσία επί τόπου που την χρησιμοποιεί. Αυτό επιτρέπει την κλιμάκωση της παροχής σε φέτες δικτύου ανεξάρτητα από τις περιπτώσεις υπηρεσιών και διευκολύνει την αποτελεσματική κατανομή μεταξύ των πολλαπλών υπηρεσιών. Για την αποτελεσματική διαχείριση μιας NSI, εξετάζονται οι ακόλουθες διαδικασίες διαχείρισης:

- διαχείριση σφαλμάτων,
- διαχείριση απόδοσης,
- διαχείριση διαμόρφωσης
- διαχείριση πολιτικής.

Η διαχείριση υπηρεσίας λαμβάνει χώρα στον τομέα του παροχέα υπηρεσιών, ενώ η διαχείριση των slices δικτύου εκτελείται στον τομέα του φορέα εκμετάλλευσης δικτύου. Ένα τέτοιο παράδειγμα απαιτεί μια επιχειρηματική διεπαφή, π.χ., SLA. Βάσει αυτής της επιχειρηματικής σχέσης, ένας διαχειριστής δικτύου μπορεί να προσφέρει διάφορα επίπεδα ελέγχου στον πάροχο υπηρεσιών, όπως παρακολούθηση, περιορισμένο έλεγχο για τη σύνθεση slices από κατάλογο ή εκτεταμένο έλεγχο, όπου ο πάροχος υπηρεσιών δημιουργεί τις δικές του σειρές VNF και MANO.

Η διαχείριση κύκλου ζωής μιας NSI περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις (εικόνα 8):

- προετοιμασία,
- δημιουργία παραλλαγών, διαμόρφωση και ενεργοποίηση,
- χρόνος εκτέλεσης
- παροπλισμός.



Εικόνα 8. Network Slice Instance Life-cycle Management [112].

Η φάση προετοιμασίας φροντίζει για μια σειρά διαδικασιών προ-NSI, οι οποίες περιλαμβάνουν την προετοιμασία του δικτύου για την υλοποίηση και την υποστήριξη μιας slice δικτύου που θα δημιουργηθεί μέσω του αντίστοιχου προτύπου slice δικτύου. Η φάση εμφάνισης, διαμόρφωσης και ενεργοποίησης διαιρείται ευρέως στην υπο-φάση εκκίνησης / διαμόρφωσης, όπου οι αναγκαίοι πόροι, τόσο κοινόχρηστοι όσο και αφιερωμένοι, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών δικτύου, διαμορφώνονται και αποτελούν ένα παράδειγμα, αλλά δεν χρησιμοποιούνται ακόμη, ενώ στην υπο-φάση ενεργοποίησης, γίνεται ενεργός χειρισμός της κυκλοφορίας δικτύου και του περιβάλλοντος χρήστη. Η φάση χρόνου εκτέλεσης επικεντρώνεται στην κυκλοφορία δεδομένων που υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών επικοινωνίας, ενώ καθοδηγεί και αναφέρει την απόδοση των υπηρεσιών δικτύου, η οποία περιλαμβάνει μια διαδικασία διαχείρισης κλειστού βρόχου που μπορεί να υποδηλώνει αναδιατάξεις ή

κλίμακες NSI ανάλογα με τις εξελισσόμενες ανάγκες. Τέλος, η φάση παροπλισμού περιλαμβάνει την απενεργοποίηση και τον τερματισμό της ανάκτησης των πόρων από την NSI [112].

4.9. Ενοποιημένο Network Slicing

Η έννοια του network slicing είναι ότι από άκρο σε άκρο τα τμήματα τεμαχίων που ενδεχομένως εκτείνονται σε διαφορετικές διοικητικές περιοχές ακολουθούν διαφορετικά επίπεδα ελέγχου και δεδομένων. Ανεξάρτητα από την ομοιόμορφη συγχώνευση του δικτύου, τα τρίτα μέρη απαιτούν ένα ενιαίο επίπεδο ελέγχου και αφαίρεσης υπηρεσιών με τυποποιημένα API που καθιστούν διαφανή την ποικιλομορφία των διαφορετικών διοικητικών τομέων [71]. Για να επιτευχθεί ένας ενοποιημένος έλεγχος πάνω από μια ενιαία υποδομή, υπάρχει ανάγκη για σημεία ανταλλαγής που εκτελούν τη διαπραγμάτευση πόρων μεταξύ διαφορετικών τομέων διαχείρισης. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν δύο ξεχωριστές αρχιτεκτονικές: (i) οι ιεραρχικές αρχιτεκτονικές όπου διάφοροι διοικητικοί τομείς συνδέονται με έναν μεσολαβητή slice υψηλότερου στρώματος ικανό να αποκτήσει και να διαπραγματευτεί πόρους από διαφορετικούς υποκείμενους διοικητικούς τομείς και (ii) τις επίπεδες ή συστοιχίες τύπου αρχιτεκτονικές που βασίζονται να συνδέουν άμεσα μεσίτες τεμαχίων από διαφορετικούς διοικητικούς τομείς. Οι πόροι που σχηματίζουν ένα ενοποιημένο τεμάχιο μπορεί να περιλαμβάνουν νέους πόρους, οι οποίοι μπορούν να διευκολύνουν VNF και υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας σε ένα μόνο τομέα ή σε διαφορετικούς τομείς, καθώς επίσης PNF και συνδέσμους δικτύου που αποτελούν μια δομή πολλαπλών τομέων. Οι παράμετροι SLA, όπως το εύρος ζώνης, μπορούν να διευθετηθούν ευκολότερα, ενώ η καθυστέρηση ή το jitter, που έχουν πρόσθετο χαρακτήρα, πρέπει να χωριστούν μεταξύ τους σε διαφορετικούς τομείς. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτραπεί ένας αυστηρότερος έλεγχος που να διασφαλίζει ότι κάθε πεδίο δεν ξεπερνά το συνιστώμενο όριο καθυστέρησης ή / και ασυμμετρίας, είναι απαραίτητη μια ελάχιστη / μέγιστη ένδειξη τομέα συνδυασμένη με ένα σύνολο διορθωτικών μέτρων, π.χ., ενίσχυση προτεραιότητας πακέτων ή επαναπροσανατολισμού. Καθώς διαφορετικοί τομείς διαχείρισης υιοθετούν διαφορετικές δομές αφαίρεσης και μέσα διαχείρισης κύκλου ζωής, η έννοια ενός αυτοτελούς τμήματος slice σε κάθε διοικητικό τομέα που αντιπροσωπεύει τους απορροφημένους πόρους και τη σχετική διαχείριση μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματική δημιουργία και τον έλεγχο της υπηρεσίας από άκρο σε άκρο φέτες δικτύου [33]. Ως εκ τούτου, μια slice πολλαπλών τομέων συνδυάζει απλά αυτά τα αυτοτελή τμήματα τεμαχίων που παρέχουν ένα έλεγχο πάνω από το πάνω μέρος της υπηρεσίας, ενώ ο υποκείμενος έλεγχος slice εκτελείται ανεξάρτητα σε κάθε τομέα.

4.10. Radio Access Network (RAN) Slicing

Η έννοια του τεμαχισμού δικτύου στον τομέα RAN απαιτεί ελαστικότητα, αποτελεσματική κατανομή πόρων και προσαρμογή. Αυτές οι ιδιότητες είναι απαραίτητες στο RAN προκειμένου να διαχειριστούν επαρκώς τους σπάνιους και περιορισμένους πόρους φάσματος συχνοτήτων. Ειδικότερα, οι απαιτήσεις RAN όσον αφορά τον τεμαχισμό του δικτύου περιλαμβάνουν τα εξής:

- Δυναμική διαχείριση πόρων: επιτρέπει την αποτελεσματική ανταλλαγή πόρων χρησιμοποιώντας εξελιγμένες λειτουργίες προγραμματισμού MAC, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς βασικούς δείκτες επιδόσεων (KPIs) για κάθε slice (π.χ. μια slice eMBB επιδιώκει υψηλό εύρος ζώνης, ενώ μια slice UltraClear Low Latency

Communications - URLLC - αφάνεια). Καθώς η κατανομή slice μπορεί να εκτελεστεί κατόπιν ζήτησης, ακόμη και με σύντομη διάρκεια, οι αντίστοιχες διαδικασίες διαχείρισης πόρων θα πρέπει να είναι ευέλικτες και προγραμματιζόμενες αξιοποιώντας τα οφέλη των ανοιχτών API.

- Απομόνωση πόρων και κοινή χρήση: οι φέτες από άκρο σε άκρο επιτρέπουν τη δημιουργία λογικών αυτοτελών δικτύων με τον κατάλληλο βαθμό απομόνωσης. Οι κρίσιμες φέτες επικοινωνίας έχουν αυστηρές απαιτήσεις για την απομόνωση του φάσματος λόγω λόγων καθυστέρησης και ασφάλειας που μπορούν να ικανοποιηθούν μόνο όταν χρησιμοποιείται τεμαχισμός σκληρού φάσματος. Ωστόσο, στον τομέα RAN, μια απομόνωση σκληρού φάσματος μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι ένα εμπόδιο λόγω των περιορισμών στα πολλαπλασιαστικά κέρδη. Ως εκ τούτου, υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις απομόνωσης στον τομέα επιπέδων RAN που εξετάζουν συγκεκριμένα μέσα διαχείρισης πόρων για να ανταποκριθούν στις αντίστοιχες KPIs.
- Λειτουργικές απαιτήσεις: κάθε τεμάχιο δικτύου μπορεί να χρειαστεί διαφορετικό λειτουργικό διάκενο αεροπλάνου ελέγχου / χρήστη και διακεκριμένη τοποθέτηση VNF για να εξασφαλίσει βέλτιστη απόδοση.

4.10.1. Διαχείριση και απομόνωση πόρων κατά τη διάρκεια του Network Slicing

Υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα διαχείρισης πόρων slice ανάλογα με το επίπεδο απομόνωσης πόρων, το οποίο μπορεί να χειρίζεται το φάσμα συχνοτήτων ως ειδικό μέσο ανά slice ή κοινόχρηστο πόρο μεταξύ συγκεκριμένων slices. Στο μοντέλο ειδικού πόρου, μια slice RAN αποτελείται από απομονωμένους πόρους από την άποψη του ελέγχου και της κίνησης του αεροπλάνου χρήστη, του προγραμματιστή MAC και του φάσματος. Κάθε τεμάχιο έχει πρόσβαση σε παρουσίες και ένα ποσοστό αποκλειστικών PRBs (Physical Resource Blocks) ή σε ένα υποσύνολο καναλιών, το οποίο διαθέτει RRC / PDCP / RLC / MAC (έλεγχος πόρων ραδιοσυχνοτήτων, πρωτόκολλο σύγκλισης δεδομένων πακέτων, έλεγχος ραδιοξεύσεων, έλεγχος πρόσβασης μεσαίας πρόσβασης). Αν και το ειδικό μοντέλο πόρων εξασφαλίζει δεσμευμένους πόρους ανά φέτα, δηλ. Εξασφαλίζοντας περιορισμούς καθυστέρησης και χωρητικότητας, μειώνει την ελαστικότητα πόρων και περιορίζει το κέρδος πολυπλεξίας. Πράγματι, το συγκεκριμένο μοντέλο πόρων περιορίζει τον ιδιοκτήτη slice να τροποποιήσει το ποσό των πόρων (δηλ. PRB) που δεσμεύονται σε μια slice κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της, ακόμη και αν δεν χρησιμοποιούνται. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο κοινόχρηστων πόρων επιτρέπει σε φέτες να μοιράζονται το επίπεδο ελέγχου, τον προγραμματιστή MAC και το φάσμα. Συγκεκριμένα, οι PRB που ανήκουν στο κοινό φάσμα διοικούνται από ένα κοινό χρονοδιάγραμμα που κατανέμει τους πόρους σε φέτες σύμφωνα με συγκεκριμένη πολιτική και άλλα επιχειρηματικά κριτήρια. Ενώ η λύση αυτή εκμεταλλεύεται τον στατιστικό προγραμματισμό των φυσικών πόρων που διασφαλίζει την ελαστικότητα, δεν διαθέτει την υποστήριξη αυστηρών εγγυήσεων QoS και απομόνωσης της κυκλοφορίας.

Το μοντέλο κατανομής πόρων εκμεταλλεύεται την εμπειρία που αποκτήθηκε από πολυάριθμες μελέτες a-priori σχετικά με την κοινή χρήση RAN, οι οποίες αφορούν την κατανομή φάσματος μεταξύ των χειριστών κινητών εικονικών δικτύων (MVNO), παρέχοντας τροποποιήσεις στον προγραμματιστή MAC. Μια προκαταρκτική προσέγγιση για virtualization ενός LTE eNB μέσω των μέσων εισαγωγής ενός hypervisor περιγράφεται στο [120], λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες ραδιοσυχνοτήτων και το

φορτίο κυκλοφορίας. Προωθώντας την βασική εικονικοποίηση του eNB, η εργασία στο [71] εισάγει την έννοια του Substrate Virtualization Network (NVS), το οποίο λειτουργεί πάνω από τον χρονοπρογραμματιστή MAC. Στόχος του είναι η ευέλικτη κατανομή των κοινών πόρων που τροποποιούν τον χρονοπρογραμματιστή MAC για να αντανακλούν τις ανάγκες κυκλοφορίας MVNOαΑ Zs λαμβάνοντας υπόψη την αντίστοιχη SLA. Ένα πλαίσιο διαχείρισης ραδιοεπιχειρησιακών πόρων για το δίκτυο για την κατανομή RAN περιγράφεται λεπτομερώς στο [71]. Ένα μείγμα δεσμευμένων και κοινών πόρων τροποποιώντας τον χρονοπρογραμματιστή MAC προτείνεται στο [71], εισάγοντας αυξημένη ευελιξία στην κατανομή πόρων. Υποστηρίζοντας ότι οι περισσότεροι προγραμματιστές MAC για την κοινή χρήση RAN θεωρούν μόνο την κοινή χρήση πόρων βασισμένη σε SLA, προτείνεται [71] μια λύση κοινής χρήσης RAN με εφαρμογή, η οποία αναφέρεται ως AppRAN. Στόχος είναι να προσαρμοστεί ο μηχανισμός επιμερισμού RAN στις ανάγκες των εφαρμογών ZA ως προς την QoS. Τέτοια προτεινόμενα σχήματα εμπίπτουν στην κατηγορία του κοινού προγραμματισμού όπου τα μοντέλα βελτιστοποίησης με πολλαπλές αντικειμενικές λειτουργίες προσπαθούν να ικανοποιήσουν μια σειρά ετερογενών απαιτήσεων slice, όπως η καθυστέρηση και η απόδοση, με τη βέλτιστη λύση να είναι η σκληρή NP. Για να χαλαρώσει αυτός ο περιορισμός, το έργο στο [71] εισάγει έναν προγραμματιστή δύο επιπέδων για να μοιραστεί PRB μεταξύ των slices δικτύου. Το πρώτο επίπεδο, που αναφέρεται ως Slice Resource Manager (SRM), είναι ένας χρονοπρογραμματισμός που προσαρμόζεται σε φέτες, ο οποίος εκχωρεί εικονική RB (vRB) σε UE που ανήκουν σε ένα κομμάτι. Το δεύτερο επίπεδο είναι μια διαδικασία προγραμματισμού μεταξύ των τεμαχίων, που ονομάζεται Resource Manager (RM), η οποία στοχεύει στη μετάφραση της κατανομής SRM (δηλαδή vRB) στο PRB. Μια καθορισμένη πολιτική στο RM διασφαλίζει ότι ένα κομμάτι δεν υπερβαίνει τους επιτρεπόμενους πόρους του. Μια παρόμοια έννοια παρουσιάζεται επίσης στο [100], λαμβάνοντας υπόψη έναν ελεγκτή RAN που καθοδηγεί την κατανομή πόρων μεταξύ των τεμαχίων βάσει μιας προκαθορισμένης πολιτικής. Το πρόβλημα RAN τεμαχισμού σε ένα δίκτυο πολλαπλών κυψελών σε σχέση με τις λειτουργίες RRM (Radio Resource Management), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποστήριξη για τον διαχωρισμό των ραδιοφωνικών πόρων μεταξύ των slices RAN, αναλύεται στο [71] εξετάζοντας διαφορετικές προσεγγίσεις από άποψη της λεπτομέρειας στην εκχώρηση ραδιοφωνικών πόρων, την απομόνωση και την προσαρμογή. Ένα κοινό πρόβλημα προγραμματισμού και επανάκτησης πολλαπλών αντικειμένων εξετάζοντας την λανθάνουσα κατάσταση, την απόδοση και την ανθεκτικότητα αναλύεται στο [69], εισάγοντας μια ευρετική λύση που βασίζεται σε μια κατανομή πόρων, προγραμματισμό και επιλογή διαδρομής με slicetail, χρησιμοποιώντας προσαρμοστική δρομολόγηση. Μια λύση πολλαπλών στόχων, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή χωρητικότητας ανά slice και την εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ διαφορετικών slices, εκπονείται στο [68]. Ένα μοντέλο μεσολαβητών χωρητικότητας λαμβάνοντας υπόψη ένα φάσμα δυνατοτήτων και επιλογών κοινής χρήσης φάσματος μελετάται στο [69].

4.10.2. Προγραμματισμός RAN (RAN Programmability)

Η δυνατότητα προγραμματισμού RAN, επίσης αναφερόμενη ως λογισμικό RAN (SD-RAN), αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του RAN τεμαχισμού που αφαιρεί τους υποκείμενους πόρους RAN και διευκολύνει τα ανοιχτά API έναντι τρίτων με τη βοήθεια μιας οντότητας Service Orchestrator που διαχειρίζεται δυναμικά τους πόρους μια sliced δικτύου. Μεταξύ των παλαιότερων μελετών, το SoftRAN [130] παρουσιάζει την

ιδέα μιας μεγάλης αφαίρεσης σταθμού βάσης, με στόχο τη διαχείριση των πυκνών εγκαταστάσεων του δικτύου μέσω των μέσων διαχωρισμού του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων. Συγκεκριμένα, το επίπεδο ελέγχου είναι συγκεντρωμένο (π.χ. κεντροποίηση της διαχείρισης της κινητικότητας), με εξαίρεση κρίσιμων για το χρόνο λειτουργιών, όπως ο προγραμματισμός κατερχόμενης ζεύξης, οι οποίες κατανέμονται στους σταθμούς βάσης. Σε αντίθεση με το SoftRAN, το έργο στο [71] πρότεινε μια ιεραρχική αρχιτεκτονική, που ονομάζεται Διαχείριση Συνδεσιμότητας ως Υπηρεσία (CMaaS), η οποία αποτελείται από μια ιεραρχία τεσσάρων επιπέδων όπου κάθε στρώμα είναι υπεύθυνο για μια διαφορετική λειτουργία θεωρώντας την κρισιμότητα του χρόνου. Το κάτω στρώμα αποτελείται από έναν ελεγκτή UE, ο οποίος διαχειρίζεται την επιλογή τεχνολογίας πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων για έναν χρήστη που περιορίζεται από την κατάσταση του τοπικού δικτύου και τις εφαρμοζόμενες πολιτικές. Το επόμενο επίπεδο περιέχει τον ελεγκτή του σταθμού βάσης, ο οποίος διαχειρίζεται τη διαχείριση των ραδιοφωνικών πόρων και τον προγραμματισμό των ροών με μια τοπική προβολή δικτύου. Το επίπεδο ελέγχου ελεγκτή RAN ελέγχει ένα σύνολο σταθμών βάσης με περιφερειακή προβολή, ενώ στην κορυφή ο ελεγκτής δικτύου με μια παγκόσμια προβολή δικτύου διαχειρίζεται υπηρεσίες όπως QoS, δρομολόγηση και διαχείριση κινητικότητας και δίνει εντολή στους ελεγκτές χαμηλότερου επιπέδου.

Πρόσφατα, το πρωτόκολλο FlexRAN [71] έχει ορίσει και υλοποιήσει μια αρχιτεκτονική SD-RAN με βάση το εργαλείο OpenAirInterface (OAI). Το FlexRAN εκτελεί αφαίρεση RAN παρέχοντας ένα ανοιχτό API και επιτρέποντας την προγραμματισμό RAN, ενώ καθορίζει ένα νότιο API για να μεταφράσει τις οδηγίες τρίτων σε ένα σύνολο κατάλληλων διαμορφώσεων για το OAI eNB. Το FlexRAN βασίζεται στην έννοια των παραγόντων, όπου ένας κεντρικός κεντρικός ελεγκτής FlexRAN επικοινωνεί μέσω των API νότια με ένα σύνολο καταναμημένων παραγόντων που φιλοξενούνται από τα eNB που εκτελούν λειτουργίες ελέγχου κρίσιμου χρόνου, π.χ. μια διαδικασία προγραμματισμού UE. Στη [71], εισάγεται μια νέα αρχιτεκτονική για την επιβολή slices RAN, χρησιμοποιώντας FlexRAN τροποποιώντας το eNB με την ενσωμάτωση ενός προγραμματιστή MAC δύο επιπέδων (όπως περιγράφεται στην Ενότητα VII-B) για να μοιράζονται τους πόρους RAN μεταξύ διαφορετικών slices. Οι συγγραφείς εφάρμοσαν έναν τέτοιο προγραμματιστή δύο επιπέδων που χρησιμοποίησε το εργαλείο OAI και παρουσίασε τη διαχείριση του κύκλου ζωής του RAN μέσω του FlexRAN. Ένα μοντέλο προγραμματισμού RAN βασισμένο σε SDN, το οποίο αντικατοπτρίζει τις απαιτήσεις υπηρεσιών τρίτων, εκπονείται στο [71], επιτρέποντας την ελαστική κατανομή πόρων μεταξύ των συστημάτων Duplex Division Duplex (FDD) και Time Duplex Division (TDD) βελτιώνοντας την ευελιξία της διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Μια επέκταση ενός τέτοιου συστήματος θεωρώντας την κατανομή slice προσανατολισμένη προς την υπηρεσία αναλύεται στα [70] και [71], όπου κάθε τεμάχιο μπορεί να υιοθετήσει διαφορετικό ρυθμό UL / DL που αντικατοπτρίζει καλύτερα τις απαιτήσεις υπηρεσίας μέσα σε ένα επιτρεπόμενο ποσό ραδιοφωνικών πόρων για τη διάρκεια της υπηρεσίας, προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των τεμαχίων με το κόστος πολλαπλασιασμού κέρδους.

Το xRAN (επεκτάσιμο RAN) [71] είναι μια πρωτοβουλία που δημιουργήθηκε από μια βιομηχανική κοινοπραξία για να φέρει στο φως μια νέα αρχιτεκτονική RAN για το σχεδιασμό των μελλοντικών προγραμματιζόμενων ασύρματων πυκνών δικτύων. Ο στόχος του xRAN είναι να αποσυνδέσει την υπηρεσία από το υλικό, επινοώντας ένα Επισκόπηση και Ανάλυση Επίδρασης Αρχιτεκτονικών Κινητών Επικοινωνιών 5G

γενικό και προγραμματιζόμενο υπόστρωμα για να υλοποιήσει ένα ευέλικτο δίκτυο πολλαπλών υπηρεσιών. Τα κύρια συστατικά του xRAN περιλαμβάνουν:

- ένα αποσυνδεδεμένο επίπεδο δεδομένων από το επίπεδο ελέγχου και μέσω ενός ανοιχτού API που επιτρέπει ένα προγραμματιζόμενο επίπεδο χρήστη,
- ένα επίπεδο ελέγχου καθορισμένο από το λογισμικό για τη διαχείριση σύνθετου δικτύου
- ένα επίπεδο τεμαχισμού για την κοινή χρήση της φυσικής υποδομής μεταξύ πολλαπλών εφαρμογών με προσαρμοσμένες στοίβες δικτύου.

Πρόσφατα, το xRAN και το CORD ενώνουν τις προσπάθειες για τη δημιουργία μιας ανοιχτής αναφοράς αναφοράς για τον αερομεταφορέα του xRAN στο πλαίσιο του MCORD. Εκτός από τις λύσεις του επιπέδου ελέγχου, το OpenRadio [137] και το PRAN [71] ασχολούνται με την προγραμματισιμότητα του επιπέδου δεδομένων και επιτρέπουν την άμεση ανάπτυξη νέων ασύρματων πρωτοκόλλων.

4.10.3. Ευέλικτη λειτουργία RAN Virtualization & Functional Split

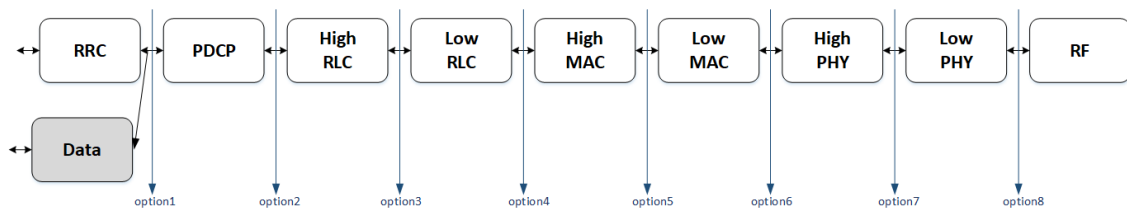
Η εικονικοποίηση RAN βασίζεται στην ιδέα της softwarization του σταθμού βάσης, η οποία επιτρέπει ορισμένες λειτουργίες RAN να εκτελούνται σε απομακρυσμένες πλατφόρμες cloud. Ένα τέτοιο παράδειγμα απέκτησε ορμή μέσα στην εμφάνιση της ιδέας Cloud-RAN (C-RAN) [139], [140], όπου οι λειτουργίες RAN χωρίζονται μεταξύ της βάσης μονάδας βάσης (BBU) που φιλοξενείται στο σύννεφο και των κεφαλίδων απομακρυσμένης ραδιοσυχνότητας (RRH) που παρέχουν εξοπλισμό κεραίας και ραδιοεπικοινωνία. Οι αρχικές αναπτύξεις του C-RAN θεωρούσαν ένα δίκτυο fronthaul υψηλής χωρητικότητας, βασισμένο συνήθως στην οπτική τεχνολογία για τη σύνδεση του BBU, που παρέχει τις αντίστοιχες λειτουργίες RAN με αρκετές RRH. Ωστόσο, η ευρεία διαθεσιμότητα οπτικών ζευγών υψηλής ταχύτητας, ειδικά σε περιβάλλοντα αστικών μικρών κυψελών, είναι αμφισβητήσιμη με πολλές εργασίες, όπως η μελέτη σε πιο ευέλικτες λύσεις που διερευνούν τη λειτουργικότητα RAN που είναι βιώσιμη για να μετακινηθεί σε περιβάλλον σύννεφο. Αυτό οδήγησε στην έννοια της ευέλικτης λειτουργικής διάσπασης θεωρώντας μια σειρά από διαφορετικές επιλογές ανάπτυξης C-RAN βασισμένες στην ικανότητα fronthaul, την καθυστέρηση και τον κρίσιμο χαρακτήρα ορισμένων λειτουργιών RAN λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο των χρηστών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η εικόνα 9 παρέχει μια επισκόπηση των διαφορετικών λειτουργικών επιλογών διαχωρισμού. Στη συνέχεια, οι πιο συνηθισμένες αναλύονται περαιτέρω:

- Επιλογή στρώματος PHY (επιλογή 6): αυτή η επιλογή παρέχει την υψηλότερη συγκέντρωση και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με ένα ιδανικό μέτωπο, δηλ. Ένα υψηλό ποσοστό δεδομένων και οπτικές ίνες χαμηλής καθυστέρησης.
- Επιλογή στρώματος MAC (επιλογή 4): Το επίπεδο MAC και τα επίπεδα πάνω από αυτό είναι εικονικοποιημένα και λειτουργούν σε BBU με προγραμματισμό σε πραγματικό χρόνο που εκτελείται συνολικά για πολλαπλές RRH. Αυτή η επιλογή αξιολογεί τα πλεονεκτήματα της σύνδεσης των καταναμημένων φυσικών στρωμάτων RRH σε μια κοινή MAC, η οποία επιτρέπει τον συντονισμένο προγραμματισμό και τη δυναμική επιλογή σημείων, δηλαδή Coordinated Multi-Point (CoMP). Ωστόσο, αυτή η επιλογή απαιτεί ένα fronthaul χαμηλής λανθάνοντος δεδομένου ότι μερικές από τις διαδικασίες MAC είναι κρίσιμες για

το χρόνο (π.χ. προγραμματισμός UE) και πρέπει να δημιουργούν μια διαμόρφωση στο επίπεδο TTI (χρονικό διάστημα μετάδοσης).

- Επιλογή στρώματος RLC (επιλογή 3): Το στρώμα RLC και άλλα επίπεδα επάνω του είναι εικονικοποιημένα στο BBU επιτρέποντας σε πολλαπλές οντότητες MAC να συσχετιστούν με μια κοινή οντότητα RLC. Αυτή η επιλογή μειώνει τους περιορισμούς καθυστέρησης μετωπιαίου περιγράμματος, καθώς ο προγραμματισμός σε πραγματικό χρόνο εκτελείται τοπικά στο RRH.
- Επιλογή στρώματος PDCP (επιλογή 2): Αυτή η επιλογή δεν είναι κρίσιμη. Εκτελεί τις λειτουργίες PDCP στο BBU και μπορεί να χρησιμοποιεί οποιοδήποτε τύπο δικτύου fronthaul. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της επιλογής είναι η δυνατότητα συγκέντρωσης διαφορετικών τεχνολογιών RRH (π.χ. 5G, LTE και WiFi).



Εικόνα 9. Μια επισκόπηση υψηλού επιπέδου των διαφορετικών λειτουργικών επιλογών διαχωρισμού.

Η ομάδα IEEE NGFI (Next Generation Fronthaul Interface) μελετά τη λειτουργική διάσπαση από την προοπτική των επιδόσεων των fronthaul, εισάγοντας μια σειρά λειτουργικών χωρισμάτων λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις εύρους ζώνης διεπαφής και καθυστέρησης. Η ομάδα μελέτης 3GPP RAN3 εισήγαγε μια μελέτη στην οποία συζητάμε την αρχιτεκτονική 5G RAN που θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αρχιτεκτονική του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτή τη μελέτη, το BBU αποτελείται από δύο νέες οντότητες, ονομαζόμενες Κεντρική Μονάδα (CU), οι οποίες μπορούν να φιλοξενούν λειτουργίες που αντέχουν στο χρόνο, όπως το PDCP, και η Κατανεμημένη Μονάδα (DU) που διαθέτει χρονικές λειτουργίες όπως MAC ή / και μέρος των λειτουργιών του φυσικού στρώματος. Ο CU προβλέπεται να καλύψει μια περιοχή ακτίνας 100-200 km, ενώ ο DU θα πρέπει να λειτουργεί σε μια περιοχή 10-20 km. Η ομάδα RAN3 συζητά επίσης: (i) τη διάσπαση μεταξύ CU και DU, (ii) το μέτωπο διασπασμένο προς το RRH και (iii) τον εσωτερικό διαχωρισμό του RAN του επιπέδου χρήσης και του επιπέδου ελέγχου.

Αυτός ο ευέλικτος λειτουργικός διαχωρισμός μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του δικτύου και ο βέλτιστος διαχωρισμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας στόχου. Για παράδειγμα, μια sliceuRLLC μπορεί να απαιτήσει περισσότερες λειτουργίες RAN να εκτελούνται σε DU προκειμένου να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις λανθάνουσας κατάστασης, ενώ σε μια sliceeMBB, μια υψηλότερη συγκέντρωση μπορεί να ενισχύσει την απόδοση μέσω της συσσωμάτωσης RRHs (π.χ. επιτρέποντας Coordinated Multipoint - CoMP). Στο πλαίσιο του network slicing, ορισμένες λειτουργίες RAN μπορούν επίσης να μοιραστούν μεταξύ διαφορετικών slices. Για παράδειγμα, κάθε τεμάχιο δικτύου μπορεί να έχει δική του εμφάνιση RRC (διαμορφωμένη και προσαρμοσμένη στοίβα πρωτόκολλο χρήστη επίπεδο), PDCP και RLC (λειτουργίες μη πραγματικού χρόνου), ενώ η χαμηλή RLC (λειτουργία πραγματικού χρόνου), MAC προγραμματισμός -slice scheduler) και το

φυσικό στρώμα μπορεί να μοιραστεί. Ορισμένες φέτες δικτύου ενδέχεται επίσης να έχουν δικό τους χρονοδιακόπτη προγραμματισμού εφαρμογής ή να προσαρμόσουν τις λειτουργίες RLC και PDCP στον συγκεκριμένο τύπο slice. Για παράδειγμα, σε μια sliced δικτύου που υποστηρίζει χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση, η συμπίεση κεφαλίδας ενδέχεται να μην χρησιμοποιηθεί και η λειτουργία διαφάνειας RLC μπορεί να ρυθμιστεί, ενώ μια υπηρεσία που απαιτεί υψηλή QoS / QoE μπορεί να ενεργοποιήσει μια αναγνωρισμένη λειτουργία RLC.

4.10.4. 5G Slicing και Fronthaul/Backhaul Integration

Τα αναδύμενα δίκτυα 5G εισάγουν ένα ετερογενές τοπίο fronthaul / backhaul που αποτελείται από διάφορες τεχνολογίες όπως οπτικό, χιλιοστόμετρο, Ethernet και IP. Επί του παρόντος, η εικονικοποίηση δικτύων στο backhaul κινητής τηλεφωνίας βασίζεται σε αποκλειστικά και επικαλυπτόμενα δίκτυα σε μια κοινή υποδομή, η οποία συγκλίνει ξεχωριστές υπηρεσίες δικτύου μεταφορών σε ενοποιημένη υποδομή. Ο καταλύτης για την ενεργοποίηση αυτού του κλιμακούμενου κινητού backhaul πολλαπλών υπηρεσιών είναι το Multi-Protocol Label Switching (MPLS) που υποστηρίζει την προοδευτική υιοθέτηση διαφορετικών τεχνολογιών στρώματος μεταφορών που ενοποιούν την πολυπλεξία 2G Time Division Division TDM) και Μεταφορά Ελέγχου Υψηλού Επιπέδου Σύνδεσης Δεδομένων (HDLC), Ασύγχρονη Μεταφορά (ATM) 3G και Αναμετάδοση Πλαίσιο καθώς και 4G Ethernet και IP. Οι αυστηρές απαιτήσεις 5G RAN, από την άποψη της πυκνότητας συσκευής και φορτίου, και της υψηλής κινητικότητας, αναμένεται να διαμορφώσουν το στρώμα του δικτύου μεταφοράς διευκολύνοντας τη βελτιωμένη χωρητικότητα, την υψηλή διαθεσιμότητα και έναν ευκίνητο έλεγχο. Για το fronthaul / backhaul, αυτό σημαίνει συνδεσιμότητα πολλαπλών διαδρομών, αυστηρότερος συγχρονισμός, συντονισμός τόσο των ραδιοφωνικών και μεταφορικών στρώσεων όσο και του καθορισμένου λογισμικού. Για να αντιμετωπιστεί η λανθάνουσα κατάσταση, η αστάθεια και η διαθεσιμότητα, η Deterministic Networking (DetNet) θεωρεί: (i) την ιεράρχηση πακέτων και την κατανομή buffer για να εξασφαλίσει ένα μέγιστο όριο λανθάνουσας απόστασης και αποφυγή jitter, (ii) προστασία συμφόρησης συγχρονίζοντας το ρυθμό μεταξύ κόμβων δικτύου απώλεια πακέτων και (iii) χρήση πολλαπλών διαδρομών που αναπαράγουν πακέτα δεδομένων που σχετίζονται με υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή ανθεκτικότητα και διαθεσιμότητα. Οι αρχικές προσπάθειες για την αντιμετώπιση τέτοιων απαιτήσεων θεωρούνται: (i) μικρές βελτιώσεις κυττάρων για το κινητό backhaul που επικεντρώνονται στην κλιμακούμενη συνδεσιμότητα και διάφορους τύπους συντονισμού με τη μακροεντολή, δηλαδή σφιχτά ή χαλαρά, και ii) συγκεντρωτική RAN χρησιμοποιώντας το κοινό δημόσιο ραδιόφωνο Διεπαφή διασύνδεσης (CPRI), η οποία επιτρέπει την ιδανική πρόσοψη οπτικών ινών. Μια ευέλικτη αρχιτεκτονική βασισμένη σε SDN που μπορεί να προγραμματίσει το δίκτυο fronthaul που συσχετίζει ευέλικτα τα RRH με ένα BBU και εξετάζει τη δυναμική των επιδόσεων των χρηστών και του δικτύου. Ωστόσο, το CPRI είναι ακριβό και δύσκολο να αναπτυχθεί. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι οι εναλλακτικές λύσεις μεταφορικού στρώματος, όπως το eCPRI (Enhanced CPRI), χαλαρώνουν τέτοιες απαιτήσεις, επιτρέποντας τη διάσπαση ενός ευέλικτου σταθμού βάσης.

Κατ 'αρχήν, διαφορετικές γεύσεις του διαχωρισμού του σταθμού βάσης μπορούν να προσφέρουν μια συγκεκριμένη απόδοση υπηρεσιών, απαιτώντας χωριστή χωρητικότητα και καθυστέρηση από το στρώμα του δικτύου μεταφοράς. Μια ενσωματωμένη

αρχιτεκτονική fronthaul / backhaul, δηλαδή η προσφορά υπηρεσιών fronthaul / backhaul σε κοινούς συνδέσμους, μπορεί να εξασφαλίσει την επιθυμητή απόδοση επιτρέποντας μια διαφορετική συγκέντρωση των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων για κάθε υπηρεσία, ενώ παράλληλα βελτιστοποιεί την απόδοση των πόρων δικτύου. Ο τεμαχισμός σε δίκτυο μπορεί να εξασφαλίσει απομόνωση και εγγυήσεις απόδοσης μεταξύ των διαφόρων λογικών δικτύων που χρησιμοποιούν διαφορετικό άρωμα fronthaul / backhaul σύμφωνα με τον αντίστοιχο λειτουργικό διαχωρισμό του σταθμού βάσης. Μια τέτοια ενσωματωμένη αρχιτεκτονική fronthaul / backhaul βασίζεται σε ένα ενοποιημένο επίπεδο ελέγχου και σε ένα επίπεδο δεδομένων που βασίζεται σε κόμβους δικτύου που είναι ικανοί να ενσωματώσουν διαφορετικές τεχνολογίες μεταφοράς για fronthaul και backhaul μέσω ενός κοινού πλαισίου δεδομένων.

Κεφάλαιο 5. Δίκτυο Κορμού 5G

Το δίκτυο κινητών πυρήνων έχει σημειώσει σημαντική εξέλιξη κατά τη διάρκεια αυτής της τελευταίας δεκαετίας. Ξεκινώντας από την LTE, η οποία εισήγαγε ένα πλήρες δίκτυο πυρήνα IP, περνώντας μέσω της softwarization και του virtualization των στοιχείων του κεντρικού δικτύου και τελειώνοντας με το 5G και τον τεμαχισμό του δικτύου. Πράγματι, η ανάγκη μεγαλύτερης ευελιξίας και ελαστικότητας οδήγησε στην εξέταση των SDN και NFV ως βασικών παραγόντων για πιο δυναμικά δίκτυα EPC, ανοίγοντας το δρόμο προς ένα δίκτυο δυνατοτήτων. Για το σκοπό αυτό, το 3GPP έχει αναμορφώσει πλήρως το κεντρικό δίκτυο, καθορίζοντας μια πιο αρθρωτή αρχιτεκτονική, όπου οι κύριες οντότητες EPC έχουν χωριστεί σε κοκκώδεις λειτουργίες δικτύου. Επιπλέον, το 3GPP έχει προσαρμόσει λύσεις όπως το eDeco και τις ενσωματωμένες προδιαγραφές (π.χ. ανακάλυψη και επιλογή slice δικτύου και κοινή χρήση λειτουργιών δικτύου) για να επιτρέψει την κατανομή του δικτύου μέσω δημιουργίας παρουσιών δικτύου πυρήνα για διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών.

5.1. Εικονικοποίηση EPC (EPC Virtualization)

Το δίκτυο κινητού πυρήνα αποτελεί σημαντικό τμήμα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, το οποίο λειτουργεί ως η ναυαρχίδα ενός παρόχου κινητής τηλεφωνίας. Η έλευση της softwarization δικτύου και των προόδων στο NFV γενικά έχει χρησιμεύσει ως μεγάλες τεχνολογίες που επιτρέπουν το virtualization του βασικού δικτύου. Οι οντότητες του κεντρικού δικτύου όπως το MME, ο κεντρικός διακομιστής συνδρομητών (HSS), το δίκτυο πακέτων δεδομένων GateWay (PGW), το Serving GateWay (SGW) και οι λειτουργίες κανόνων πολιτικής και φόρτισης (PCRF) μπορούν τώρα να αναπτυχθούν σε εξελιγμένες εικονικές πλατφόρμες. Οι προοδευτικές δραστηριότητες τυποποίησης που διεξάγονται στην περιοχή του NFV. Το γεγονός ότι αυτές οι οντότητες δομικού μπλοκ του κινητού πυρήνα δικτύου μπορούν να αναπτυχθούν ως εικονικές περιπτώσεις φέρνει μεγαλύτερη ευελιξία, ελαστικότητα και διασφάλιση QoS στις τεχνικές παροχής υπηρεσιών του δικτύου EPC. Η ευελιξία και η ελαστικότητα στην παροχή υπηρεσιών συνεπάγεται ότι ένας φορέας εκμετάλλευσης κινητού δικτύου μπορεί τώρα να αναπτύξει πολλαπλές περιπτώσεις του EPC, όλες ταυτόχρονα, για να εξυπηρετήσει διαφορετικές κατηγορίες χρηστών βάσει των απαιτήσεων υπηρεσίας τους. Επιπλέον, ενώ κάποιες υπηρεσίες μπορεί να χρειαστούν όλα τα στοιχεία που συνθέτουν το EPC, άλλα δεν (π.χ. μια υπηρεσία mIoT με περιορισμένη κινητικότητα δεν χρειάζεται MME στο EPC). Ως εκ τούτου, η έννοια του τεμαχισμού του κεντρικού δικτύου επικεντρώνεται γύρω από τη δυνατότητα ανάπτυξης πολλαπλών στιγμιότυπων του εικονικού EPC (vEPC) που εκτελούνται παράλληλα προκειμένου να ικανοποιήσει ο καθένας διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών, π.χ. μια υπηρεσία ευαίσθητη στην καθυστέρηση μπορεί να απαιτεί ένα κατανομημένο vEPC πιο κοντά τον τελικό χρήστη. Χάρη στα NFV και SDN, το vEPC μπορεί να ενορχηστρωθεί και να διαχειριστεί καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του μέσω των πλατφορμών του cloud. Στην πραγματικότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά συστήματα ενορχηστρωμάτων που προσφέρουν αποτελεσματική διαχείριση και λειτουργία των φορέων του EPC. Τόσο η οντότητα ελέγχου (MME και HSS) όσο και ο χρήστης του αεροπλάνου (SGW και PGW) του EPC μπορούν τώρα να παρασχεθούν ως υπηρεσία σε διακομιστές βασικών προϊόντων, ο οποίος φέρνει νέες διαστάσεις στα λειτουργικά μοντέλα της αγοράς της MVNO. Η υπηρεσία EPC ως υπηρεσία (EPCaaS) αξιοποιεί την αποδοτικότητα κόστους που προσφέρεται από την ανάπτυξη vEPCs στο

σύννεφο για την εισαγωγή δύο μεγάλων προσεγγίσεων εικονικοποίησης για την παροχή του μοντέλου EPCaaS και τεσσάρων διαφορετικών αρχιτεκτονικών σεναρίων εφαρμογής. Το πλαίσιο EPCaaS πρότεινε πρώτα μια προσέγγιση πλήρους εικονικοποίησης, όπου και οι δύο οντότητες ελέγχου και χρήστη του EPC είναι εικονικοποιημένες. Για τη δεύτερη προσέγγιση, μόνο οι οντότητες του επιπέδου ελέγχου είναι εικονικοποιημένες, ενώ τα στοιχεία του αεροπλάνου δεδομένων αναπτύσσονται σε ιδιόκτητο υλικό και αυτό εξασφαλίζει υψηλές διεργασίες και επιτρέπει την εφαρμογή πολιτικών ελέγχου της κυκλοφορίας. Τα προτεινόμενα σεναρία εφαρμογής περιλαμβάνουν χαρτογράφηση 1: 1, όπου κάθε λειτουργικό συστατικό EPC εκτελείται σε χαρτογράφηση VM, 1: N, όπου κάθε λειτουργικό στοιχείο EPC εκτελείται σε πολλαπλές VMs, χαρτογράφηση N: 1, όπου όλα τα λειτουργικά συστατικά του EPC διατρέχουν μία χαρτογράφηση VM και N: 2, όπου το επίπεδο ελέγχου και τα στοιχεία επιπέδου δεδομένων του EPC εκτελούνται σε ένα VM το καθένα. Ομοίως, η εργασία του cloud carrier καταδεικνύει όχι μόνο πώς μπορεί να προσφερθεί το EPC ως υπηρεσία σε ένα εμπορικό διακομιστή off-the-shelf, αλλά και πώς να επεκτείνει και να διευρύνει το μοντέλο υπηρεσιών των παρόχων υποδομής cloud από την παροχή μόνο υπολογιστών και τις δυνατότητες αποθήκευσης ως υπηρεσία στα κέντρα δεδομένων, ώστε επίσης να επιτρέπεται η σύνδεση κινητής τηλεφωνίας από άκρο σε άκρο ως υπηρεσία. Η εργασία του cloud carrier εξήγησε πώς όλοι οι LTE, EPC και ακόμη και PDN μπορούν να προσφερθούν ως υπηρεσία, δηλαδή (LTEaaS), (EPCaaS) και (PDNaaS), στην πραγματικότητα οτιδήποτε μπορεί να προσφερθεί και ως υπηρεσία με την εισαγωγή τεσσάρων σημαντικών ενδιαφερομένων, οι οποίοι αποτελούν πρωταρχικούς παράγοντες της αρχιτεκτονικής των παρόχων υπηρεσιών σύννεφο, δηλαδή τον πάροχο υπηρεσιών, την πλατφόρμα υπηρεσιών cloud, την εικονική υποδομή και τη φυσική υποδομή. Όλα αυτά τα έργα εκτελούνται για να επιτρέψουν την υποστήριξη διαφόρων απαιτήσεων υπηρεσίας, οι οποίες θα επιτρέψουν την υλοποίηση του δικτύου 5G.

5.2. Δίκτυα προσανατολισμένα στον Πυρήνα (Dedicated Core Networks)

Με στόχο την παροχή ενός συνόλου λειτουργιών EPC σε ένα συγκεκριμένο σύνολο χρηστών ή υπηρεσιών, όπως το IoT, το 3GPP εισήγαγε την έννοια DECOR στην έκδοση 13. Η DECOR αποτελεί μια πρώιμη μορφή δικτύου, όπου τα eNB μπορούν να επιλέξουν κατάλληλες λειτουργίες δικτύου πυρήνα για τα επίπεδα ελέγχου και χρήστη συγκεκριμένων UEs. Η διαδικασία επιλογής δικτύου DECOR προϋποθέτει ότι ένα UE πρώτα συνδέεται με ένα προεπιλεγμένο MME, το οποίο ανακατευθύνει τη ρύθμιση σύνδεσης μη-πρόσβασης Stratum (NAS), με βάση το HSS, στο κατάλληλο MME. Μια τέτοια διαδικασία εισήγαγε πολλή σηματοδότηση για την ανακατεύθυνση της κίνησης των ΕΕ. Ως μέσον αντιμετώπισης αυτού του ζητήματος αναπτύχθηκε το ενισχυμένο DECOR (eDECOR). Το eDECOR βασίζεται στη συμμετοχή των ΕΕ για τη μείωση της σηματοδότησης. Κατά τη διάρκεια της ρύθμισης σύνδεσης, δηλ. RRC, ένα UE ενσωματώνει μια παράμετρο επιλογής DCN που λαμβάνεται από το δίκτυο, η οποία είναι ειδική για τον χειριστή και μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο DCN.

Τα eNB είναι σε θέση να επιλέξουν το κατάλληλο DCN με βάση μια τέτοια παράμετρο που αποστέλλεται από το UE σε συνδυασμό με μια προκαθορισμένη λογική. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ρύθμισης S1, MME παρέχει τον υποστηριζόμενο τύπο NAS και τις πληροφορίες βοήθειας επιλογής DCN στο eNB ως μέρος του μηνύματος απάντησης εγκατάστασης S1. Οι Ksentini και Nikaiein [65] χρησιμοποίησαν το eDECOR για να

επιβάλουν το κόστος του δικτύου στο επίπεδο του κεντρικού δικτύου και πρότειναν να αντικατασταθεί η παράμετρος επιλογής DCN με ένα ID τεμαχίου. Το τελευταίο θα μπορούσε να κωδικοποιηθεί σκληρά σε UEs (δηλ. UMTS Subscriber Identity Module - USIM) ή να κωδικοποιηθεί μέσω του PLMN

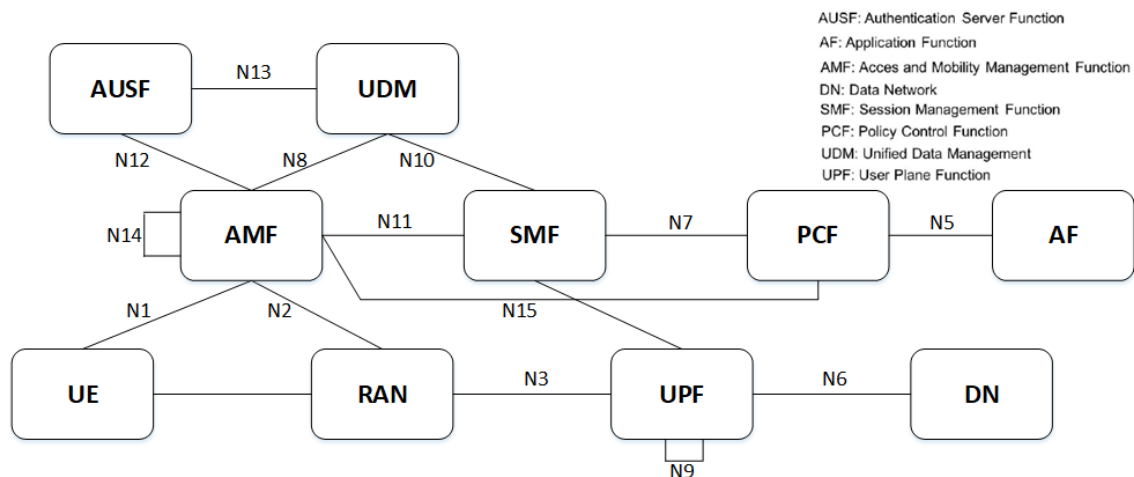
5.3. Δίκτυα Κορμού 5G (5G Core Network)

Η ανάγκη μεγαλύτερης ευελιξίας, ελαστικότητας και επεκτασιμότητας του δικτύου κινητών πυρήνων ώθησε το 3GPP σε [160] να εισαγάγει μια νέα αρχιτεκτονική βασικού δικτύου (δηλαδή τον πυρήνα της επόμενης γενιάς ή της αρχιτεκτονικής του συστήματος 5G), ο οποίος διαχωρίζει τις τρέχουσες λειτουργίες EPC πιο λεπτές κοκκώδεις λειτουργίες δικτύου. Η αναμόρφωση της λειτουργίας του EPC σε πιο κοκκώδεις λειτουργίες προτάθηκε αρχικά στο [55], όπου οι συγγραφείς κατέστρεψαν τις λειτουργίες του μονολιθικού πυρήνα σε πιο αρθρωτές λειτουργίες που συνιστούν υπηρεσία επιπέδου ελέγχου. Σε μια πρόσφατη δουλειά, οι ίδιοι συγγραφείς δείχνουν πώς θα μπορούσαν να συνθέτουν τις αρθρωτές λειτουργίες για την κατασκευή μιας υπηρεσίας επιπέδου ελέγχου προσαρμοσμένου σε μια sliced δικτύου. Στο πλαίσιο της αρχικής αρχιτεκτονικής NG, ορισμένες λειτουργίες δικτύου (NFs) έχουν τα αντίστοιχά τους σε LTE, ενώ άλλα είναι εντελώς νέα. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος πρόσβασης και η διαχείριση των συνεδριάσεων συνδυάζονται στο EPC, αλλά διαχωρίζονται στον κεντρικό πυρήνα για να υποστηρίξουν καλύτερα την σταθερή πρόσβαση και να διασφαλίσουν την επεκτασιμότητα και την ευελιξία. Τα πιο σημαντικά NF όπως ορίζονται στον πυρήνα NG είναι:

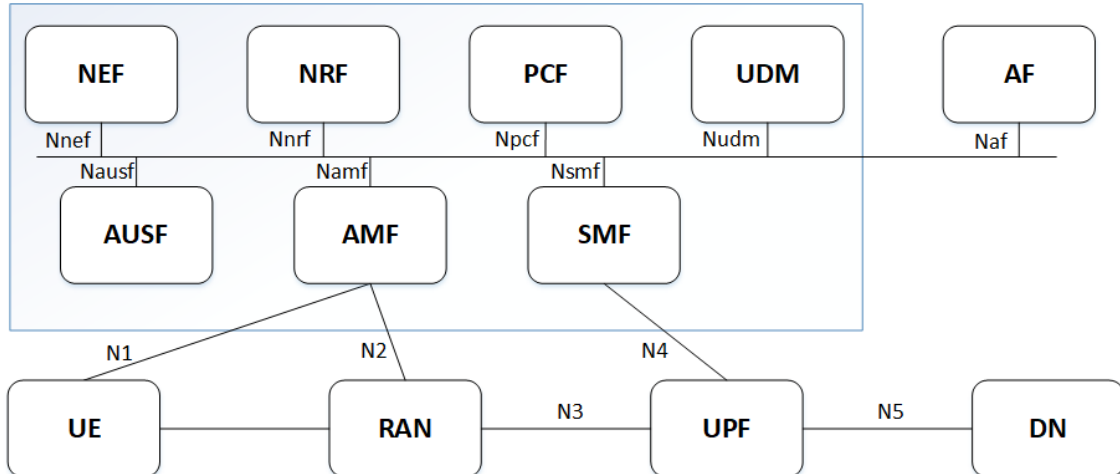
- Η λειτουργία διαχείρισης πρόσβασης και κινητικότητας (AMF) χειρίζεται, μεταξύ άλλων, τον έλεγχο πρόσβασης και την κινητικότητα. Η AMF ενσωματώνει επίσης τη λειτουργικότητα επιλογής slice δικτύου ως μέρος του βασικού συνόλου λειτουργιών της. Σε περίπτωση σταθερής πρόσβασης, η λειτουργία διαχείρισης της κινητικότητας δεν απαιτείται από την AMF.
- Λειτουργία διαχείρισης συνόδων (SMF) - ρυθμίζεται σύμφωνα με την πολιτική δικτύου για τη διαχείριση των περιόδων λειτουργίας χρήστη.
- Πολιτική ελέγχου πολιτικής (PCF) - αντιστοιχεί στην PCRF στο LTE. Αυτή η λειτουργία ενσωματώνει ένα πλαίσιο πολιτικής για τον τεμαχισμό σε δίκτυο.
- Η λειτουργία του User Plane (UPF) - μπορεί να αναπτυχθεί με βάση τον τύπο υπηρεσίας, σε διάφορες διαμορφώσεις και τοποθεσίες.
- Unified Data Management (UDM) - είναι παρόμοιο με το HSS στο LTE. Ωστόσο, προβλέπεται να ενσωματωθούν πληροφορίες συνδρομητών τόσο για τις σταθερές όσο και για τις κινητές προσβάσεις στον πυρήνα NG.
- Λειτουργία καταλόγου NF (NRF) - είναι μια νέα λειτουργία. Παρέχει λειτουργία εγγραφής και ανακάλυψης επιτρέποντας στα NFs να ανακαλύπτουν ο ένας τον άλλον και να επικοινωνούν μέσω ανοιχτών API. Η βασική αρχιτεκτονική NG θεωρείται ότι αναπτύσσεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, τα διάφορα στοιχεία συνδέονται χρησιμοποιώντας μια σύνδεση από σημείο σε σημείο, βασισμένη σε διεπαφές αναφοράς, παρόμοια με την τρέχουσα αρχιτεκτονική LTE. Η εικόνα 10 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος NG χρησιμοποιώντας το μοντέλο point-to-point. Παρόμοια με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική 3GPP, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική συνδέει τα διαφορετικά NF πυρήνα των 5G μαζί με τους UEs καθώς και το δίκτυο Access (AN) μέσω διεπαφών αναφοράς. Ωστόσο, αυτός ο τρόπος καθορισμού της αρχιτεκτονικής δικτύου πυρήνα NG μπορεί να εισαγάγει πολυπλοκότητα για την προσθήκη νέων

στοιχείων / περιπτώσεων δικτύου, καθώς απαιτεί από τον φορέα εκμετάλλευσης να επαναδιαμορφώσει πολλαπλές διεπαφές από άκρο σε άκρο.

Η αρχιτεκτονική προσανατολισμένη από σημείο σε σημείο αναμένεται να εξελιχθεί στη δεύτερη φάση σε αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στις υπηρεσίες. Ενώ το τελευταίο ενσωματώνει τα ίδια λειτουργικά στοιχεία και την ίδια διαδρομή επεξεργασίας του επιπέδου χρήστη μεταξύ του UE και των εξωτερικών δικτύων δεδομένων, διαφέρει στο επίπεδο ελέγχου (εικόνα 11). Αντί των προκαθορισμένων διεπαφών μεταξύ των στοιχείων, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο υπηρεσίας στο οποίο τα στοιχεία ζητούν από ένα NRF να ανακαλύψει και να επικοινωνήσει μεταξύ τους. Στο νέο μοντέλο, οι λειτουργίες του δικτύου χρησιμοποιούν την έννοια του παραγωγού / καταναλωτή, όπου ένα NF μπορεί να εγγραφεί για συγκεκριμένα συμβάντα που παρέχονται από άλλο NF μέσω API. Έτσι, είναι δυνατή η επικοινωνία 1: 1 ή 1: N. Για παράδειγμα, η υπηρεσία AMF εκθέτει σε άλλα Εθνικά Φορέα πληροφορίες σχετικά με τα γεγονότα και τα στατιστικά στοιχεία σχετικά με την κινητικότητα. Παρομοίως, η PCF παρέχει σε όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τους κανόνες πολιτικής σε άλλα Εθνικά Φορέα. Η βασική αρχιτεκτονική πυρήνα NG μπορεί να αναπτυχθεί εύκολα σε ένα λογισμικό / εικονικό περιβάλλον (π.χ. VM ή δοχείο), όπου μπορούν να ζητηθούν βιβλιοθήκες λειτουργιών από έναν κατάλογο VNF και να συντίθενται σε αλυσίδες εξυπηρέτησης τελικού χρήστη κατόπιν αιτήσεως. Επιπλέον, η σύνθεση συγκεκριμένης λειτουργίας θα επέτρεπε την προσαρμογή του δικτύου πυρήνα 5G στο συγκεκριμένο δίκτυο.



Εικόνα 10. Αρχιτεκτονική NG core architecture: Μοντέλο point to point.



Εικόνα 11. Αρχιτεκτονική NG core architecture: Μοντέλο service-oriented model.

Εκτός από μια προσαρμοσμένη σύνθεση NF, ένα από τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης λεπτών κοκκωδών NF για το κόψιμο του δικτύου είναι η δυνατότητα να μοιράζονται μερικά NFs μεταξύ των slices με στόχο: (i) τη μείωση της πολυπλοκότητας διαχείρισης των slices του δικτύου με την κοινή χρήση της λειτουργίας Authentication Server Function (AUSF) και την ενοποιημένη διαχείριση δεδομένων (UDM), τη διαδικασία διαχείρισης της κινητικότητας (δηλαδή, AMF); (ii) μείωση της σηματοδότησης μέσω του αέρα - όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των συμμετρικών επιπέδων ελέγχου κεντρικού δικτύου NF, τόσο χαμηλότερο είναι το φορτίο σηματοδότησης και (iii) διαχείριση ενός κοινού υλικού, στην περίπτωση των NF που δεν μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα περιβάλλον λογισμικού (δηλ. PNF όπως τα eNBs). Συνεπώς, είναι σημαντικό να εντοπιστούν κοινά NF που πρέπει να μοιράζονται από διάφορες φέτες δικτύου από άκρο σε άκρο, επωφελούμενοι από την αναδιαμόρφωση των λειτουργιών του RAN και των βασικών δικτύων (δηλαδή, λεπτών κοκκωδών) χάρη στη λειτουργική διαίρεση και την πυρηνική αρχιτεκτονική NG.

Στο [30] συζητούνται τρεις ομάδες. Κάθε ομάδα έχει ένα σύνολο κοινών NF μεταξύ των slices του δικτύου. Η πρώτη ομάδα (A) είναι παρόμοια με την έννοια του eDECOR, όπου τα RAN NFs είναι κοινά σε όλες τις φέτες του δικτύου, ενώ κάθε slice του δικτύου έχει αποκλειστικά NFs core. Έτσι, ένα UE μπορεί να αποκτήσει υπηρεσίες από διαφορετικές φέτες δικτύου και διαφορετικές περιπτώσεις κεντρικού δικτύου, γεγονός που επιτρέπει λογικό διαχωρισμό και απομόνωση των πυρήνων NFs. Στην περίπτωση αυτή, τα αποκλειστικά κεντρικά NFs θα μπορούσαν να είναι διαχείριση συνδρομής, διαχείριση κινητικότητας ή διαχείριση συνεδριών (π.χ. AUSF, AMF, SMF και UDM). Αυτή η λύση μπορεί να διευκολύνει την απομόνωση μεταξύ των πυρήνων NFs, αλλά μπορεί να αυξήσει την επιβάρυνση σηματοδότησης. Η δεύτερη ομάδα (B), που χρησιμοποιείται επίσης στο [71], υποθέτει ότι μερικές φράσεις NF είναι κοινές μεταξύ των slices του δικτύου (π.χ. RLC χαμηλό, MAC scheduler, AUSF, UDM και AMF), PDCP, RRC, UPF, SMF). Η τρίτη ομάδα Ο θεωρεί ότι η διαχείριση του επιπέδου ελέγχου είναι κοινή μεταξύ των slices, ενώ το επίπεδο χρήστη χειρίζεται ως διαφορετικές φέτες δικτύου (π.χ. PDCP και UPF).

5.4. Network Exposure Function

Η σχέση μεταξύ ενός παρόχου συστήματος δικτύου και ενός καταναλωτή slice διέπεται από ένα SLA μεταξύ των δύο μερών. Η συμφωνία αυτή θα πρέπει να ορίζει τους όρους και τις συνθήκες εξυπηρέτησης, το επίπεδο έκθεσης και το ύψος του ελέγχου που θα έχουν οι καταναλωτές / ενοικιαστές slice κατά τη λειτουργία του τμήματος του δικτύου. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μπορούν να προσφέρουν τέσσερις βασικές λειτουργίες, όπως επικοινωνίες (π.χ. υπηρεσία φωνητικών επικοινωνιών και SMS), περιβάλλον (π.χ. πληροφορίες χρηστών σε πραγματικό χρόνο όπως τοποθεσίες και προφίλ χρηστών), συνδρομή (π.χ. και ασφάλεια), τα οποία μπορούν να εκτεθούν σε τρίτους, όπως MVNO, παρόχους εφαρμογών και verticals μέσω ασφαλών API ανοικτών δικτύων. Σε μια αρχική μελέτη, η 3GPP εισήγαγε τη λειτουργία SCEF [163], η οποία βρίσκεται στον ασφαλές τομέα του MNO, για να εκθέσει τις προαναφερόμενες υπηρεσίες δικτύου, παρέχοντας ταυτόχρονα ζωτικές λειτουργίες δικτύου όπως έλεγχο ταυτότητας / εξουσιοδότηση και ασφαλή πρόσβαση στο δίκτυο.

Η λειτουργία έκθεσης δικτύου (NEF) είναι μια εξέλιξη SCEF και ορίζει μια στρώση API που σχετίζεται με τον πυρήνα 5G NG, ο οποίος μπορεί να ελέγξει αποτελεσματικά τις φέτες δικτύου. Το επίπεδο ελέγχου μπορεί να εξαρτάται από τους τύπους slice δικτύου, με βάση τη λειτουργική και μη λειτουργική απαίτηση που πρέπει να ενσωματώνει η slice του δικτύου. Οι καταναλωτές slice δικτύου πρέπει να εκτίθενται σε πολύπλευρα επίπεδα ελέγχου για την επιτυχή παροχή υπηρεσιών δικτύου από τις αντίστοιχες φέτες δικτύου τους. Τα πολύπλευρα επίπεδα έκθεσης ελέγχου slice πρέπει να διαχειρίζονται σωστά ανάμεσα σε διαφορετικές φέτες δικτύου από τον παροχέα τεμαχίων δικτύου. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι ο πάροχος δικτύου πρέπει να εφαρμόσει εξελιγμένες διασυνδέσεις διαχείρισης slice δικτύου οι οποίες θα δημιουργήσουν στρώματα αφαίρεσης διεπαφών, τα οποία μπορούν εύκολα να αντιστοιχιστούν στα διαφορετικά επίπεδα ελέγχου slice δικτύου που εκτίθενται στους ιδιοκτήτες / ενοικιαστές slice. Στο πλαίσιο αυτού του άρθρου, τα ακόλουθα είναι τα κοινά επίπεδα έκθεσης και ελέγχου που θα μπορούσε να έχει ένας ενοικιαστής slice πάνω από το κομμάτι του δικτύου:

- Βασικός ή παθητικός έλεγχος επιπέδου: Σε αυτό το επίπεδο ελέγχου, ένας μισθωτής slice μπορεί να δει και να παρακολουθήσει την απόδοση μιας slice δικτύου, π.χ. μέσω μιας διασύνδεσης Web. Μέσω της ίδιας διεπαφής στο Web, ο κάτοχος slice μπορεί να τοποθετήσει ένα αίτημα διαμόρφωσης slice δικτύου από έναν προκαθορισμένο κατάλογο φτιαγμάτων, ο οποίος μπορεί να διατεθεί από τον παροχέα τεμαχίων δικτύου. Αυτό το επίπεδο ελέγχου επιτρέπει μόνο στον κάτοχο slice δικτύου να πραγματοποιήσει μια παθητική μορφή ελέγχου.
- Εκτεταμένος έλεγχος και διαχείριση: Σε αυτό το επίπεδο ελέγχου, ο ενοικιαστής δεν παρακολουθεί μόνο ή ασκεί παθητικό έλεγχο, αλλά μπορεί επίσης να ενημερώσει (π.χ. αυξάνοντας ή μειώνοντας) τις λειτουργίες του υπάρχοντος δικτύου, εισάγοντας διαφορετικές διαμορφώσεις slice με βάση τόσο διαθέσιμες και επιθυμητές λειτουργίες δικτύου, οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν από τον παροχέα τεμαχίων δικτύου. Χρησιμοποιώντας τις διεπαφές που παρέχονται από τον παροχέα slice δικτύου, ο καταναλωτής slice μπορεί να αλλάξει τη σύνθεση μιας slice δικτύου για να ταιριάζει στις ανάγκες της υπηρεσίας. Αυτή η μορφή ελέγχου είναι ένα βήμα μπροστά από το προηγούμενο επίπεδο, υπό την έννοια ότι δίνει στους ιδιοκτήτες slices πρόσθετα προνόμια για να εκτελούν μια ενεργή μορφή ελέγχου δικτύου, επομένως, η ονομασία τους ως ενεργός έλεγχος δικτύου.

- Πλήρης έλεγχος και διαχείριση: Σε αυτό το επίπεδο ελέγχου, ένας μισθωτής slice έχει το υψηλότερο επίπεδο ελέγχου και προνομίων slice δικτύου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το SLA επιτρέπει στον καταναλωτή slice να λειτουργεί και να διαχειρίζεται την πλατφόρμα εικονικοποίησης και άλλα συναφή συστήματα υποστήριξης διαχείρισης και ως εκ τούτου μπορεί να αναπτύξει οποιαδήποτε μορφή λειτουργιών δικτύου, όπως απαιτείται, για να παραδώσει το επιθυμητό σύνολο υπηρεσιών δικτύου. Ωστόσο, ο καταναλωτής slice δεν επιτρέπεται να επανασχεδιάσει ή να αλλάξει τη σύνθεση των λειτουργιών δικτύου που διαθέτει ο διαχειριστής του δικτύου, οι οποίοι μπορούν να αναπτυχθούν πάνω από την εικονική πλατφόρμα που τους έχει χορηγηθεί.

Αξιοποιώντας τα οφέλη της NEF, τα δίκτυα 5G θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν και να χειριστούν τις επιχειρηματικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών τρίτων. Με βάση την πολιτική SLA και την προσαρμογή της υπηρεσίας δικτύου που παρέχεται από το δίκτυο, οι κάθετες βιομηχανίες και τρίτα μέρη μπορούν να ζητήσουν τη δημιουργία προσαρμοσμένων δυνατοτήτων υπηρεσιών για τις εφαρμογές τους και να αξιοποιήσουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο αυτές τις εκτεθειμένες δυνατότητες δικτύου για την αποτελεσματική εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου.

5.5. Ανακάλυψη και Επιλογή Slice

Η λειτουργία επιλογής και εντοπισμού slice δικτύου αποτελείται από τη συσχέτιση ενός χρήστη με την κατάλληλη παράσταση slice. Στο [71], το 3GPP έχει ορίσει μια πρώτη σειρά διαδικασιών για την ενεργοποίηση της επιλογής και της ανεύρεσης slice δικτύου. Οι προτεινόμενες διαδικασίες βασίζονται στην εισαγωγή των Πληροφοριών Υποστήριξης Επιλογής Slice Δικτύου (NSSAI), οι οποίες αποστέλλονται από τον UE κατά τη διάρκεια των διαδικασιών εγγραφής μηνυμάτων RRC και NAS. Το NSSAI είναι ένας φορέας μέγιστων τιμών 8 μονάδων NSSAI (S-NSSAI) που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση και την επιλογή παρουσιών slice. Βασικά, η NSSAI αποτελείται από: (i) αναγνωριστικό τύπου SAS / Service (SST), το οποίο αντιστοιχεί στην αναμενόμενη συμπεριφορά slice δικτύου ως προς χαρακτηριστικά και υπηρεσίες, και (ii) μια προαιρετική πληροφορία, συγκεκριμένα το Slice Differentiator (SD), για να επιτρέψει περαιτέρω διαφοροποίηση για την επιλογή μιας slice δικτύου από πολλαπλές περιπτώσεις τεμαχίου δικτύου, ικανοποιώντας την ενδεικνυόμενη λειτουργικότητα τύπου slice / υπηρεσίας. Το S-NSSAI μπορεί να έχει τυπικές τιμές ή τιμές σχετικές με το PLMN. Οι τυπικές τιμές S-NSSAI είναι περίπου κυρίως το τμήμα SST. Ο στόχος κάτω από τις τυπικές τιμές SST είναι να εξασφαλίσει μια παγκόσμια διαλειτουργικότητα για το τεμαχισμό, επιτρέποντας την περιαγωγή για τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες φέτες / υπηρεσίες, όπως eMBB, uRLLC και mMTC. Για παράδειγμα, ο τύπος slice eMBB έχει SST = 1, ο τύπος slice uRLLC έχει SST = 2, και το SST = 3 αντιστοιχεί στον τύπο slice mMTC.

Μόλις το δίκτυο πρόσβασης (δηλ. RANorfixed- (R) AN) λάβει το μήνυμα δημιουργίας σύνδεσης RRC, εξάγει τις πληροφορίες NSSAI και εκπέμπει τα μηνύματα NAS σε μια οντότητα AMF που σχετίζεται με το NSSAI. Η επαγόμενη AMF ξεκινά την επιλογή slice χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες NRF και ρυθμίζει μια συνεδρία μονάδας δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU) με τις κατάλληλες λειτουργίες του αεροπλάνου για το κομμάτι. Στην πραγματικότητα, η AMF επιλέγει το SMF σε μια slice δικτύου για να δημιουργήσει

μια συνεδρία PDU κατά τη λήψη του μηνύματος SM. Η ανακάλυψη / επιλογή SMF βασίζεται είτε στο NRF είτε στο S-NSSAI και στο όνομα δικτύου δεδομένων (DNN). Το επιλεγμένο SMF δημιουργεί μια συνεδρία PDU χρησιμοποιώντας S-NSSAI και DNN. Δεδομένου ότι ένας μόνο UE μπορεί να εξυπηρετηθεί από το πολύ 8 φέτες δικτύου κάθε φορά, απαιτείται η AMF να ανήκει λογικά σε κάθε slice του δικτύου, επομένως η AMF θα είναι κοινή στις φέτες του δικτύου που εξυπηρετούν ένα UE.

5.6. Συνδεσιμότητα πολλαπλών slices

Προβλέπεται ότι οι UEs μπορούν δυναμικά να συνδεθούν σε πολλαπλά network slices. Ανάλογα με τις ικανότητες και τις δυνατότητες σχεδίασης αυτών των UEs, θα αξιοποιήσουν αυτή τη δυνατότητα για να αποκτήσουν την καλύτερη εμπειρία σύνδεσης στο δίκτυο και υπηρεσίες δικτύου. Με βάση αυτό το όραμα, το 3GPP στην [30] εξέτασε το σχεδιασμό του πυρήνα NG για να καλύψει τις ανάγκες των ακόλουθων τριών κατηγοριών UE:

- Οι UE μπορούν να αποκτήσουν συνδεσιμότητα από πολλαπλές φέτες που ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα πυρήνα με λογικό διαχωρισμό ο ένας από τον άλλο τόσο στο επίπεδο ελέγχου όσο και στο επίπεδο χρήστη, δηλ. Χωρίς να μοιράζονται κανένα NF. Αυτός ο λογικός διαχωρισμός θα επέτρεπε την απομόνωση, η οποία εγγυάται την ασφάλεια των τεμαχίων μεταξύ των δικτύων, αλλά με την προϋπόθεση ότι θα επιβαρυνθούν επιπλέον έξοδα.
- Οι UE μπορούν να συνδεθούν σε ένα ενιαίο κεντρικό δίκτυο κάθε φορά. Ως εκ τούτου, μπορούν να έχουν πρόσβαση μόνο σε φέτες που ανήκουν στο ίδιο κεντρικό δίκτυο. Για αυτήν την κατηγορία, παρόλο που το επίπεδο χρήστη της ξεχωριστής στιγμιότυπου διαχωρίζεται, ορισμένες λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου εξακολουθούν να μοιράζονται. Έτσι, φέτες δικτύου έχουν μόνο ένα μερικό επίπεδο απομόνωσης ανάλογα με τον αριθμό των κοινών NF.
- Τα UE έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη κατηγορία εκτός από το ότι όλες οι φέτες μοιράζονται όλα τα NF στο επίπεδο ελέγχου. Ως εκ τούτου, η πιθανότητα συμβιβασμού με το κομμάτι του δικτύου είναι το υψηλότερο.

Κεφάλαιο 6 Προκλήσεις και Ανοικτά Ζητήματα Έρευνας

Όπως και σε άλλες αναδυόμενες τεχνολογίες, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ο τεμαχισμός στο δίκτυο παρουσιάζει σημαντικό δυναμικό, αλλά εισάγει επίσης πολλές τεχνικές και επιχειρηματικές προκλήσεις. Αν και ο τεμαχισμός στο δίκτυο βρίσκεται σήμερα σε φάση τυποποίησης, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά ανοικτά ερευνητικά προβλήματα και προκλήσεις εφαρμογής που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ορισμένες από τις οποίες περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται, την τεχνολογία, την αρχιτεκτονική, την ασφάλεια, τα API διεπιφάνειας εργασίας και έκθεσης, τη βελτιστοποίηση των τεμαχίων και τον τεμαχισμό στην UE.

6.1. Τεχνοοικονομικές πτυχές του Network Slicing

Ο προγραμματισμός και η ανάπτυξη του network slicing θεωρείται ως βασικός παράγοντας για την προώθηση νέων επιχειρηματικών ευκαιριών, μειώνοντας παράλληλα τόσο το OPEX όσο και το CAPEX σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Τα κέρδη από τη διανομή του δικτύου επικεντρώνονται στις προσφερόμενες δυνατότητες δικτύου, όπως τα NF και τη διασφάλιση της απόδοσης, ενώ οι υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας περιλαμβάνουν μεγάλα δεδομένα, εντοπισμό και υπολογιστική άκρη [165]. Ωστόσο, τα μοντέλα χρέωσης σχετικά με τις δυνατότητες δικτύου, τη δυναμική χρήση slice, τις υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας και τη διαχείριση και ενορχήστρωση εξακολουθούν να είναι ανοικτές. Εστιάζοντας στην επίδραση στο CAPEX, μελέτες έδειξαν ότι η ανάπτυξη δικτύων κινητής τηλεφωνίας στην ίδρυση των SDN και NFV θα μπορούσε να εξοικονομήσει έως και 13,85% του κόστους των επενδύσεων κεφαλαίου των διαχειριστών δικτύων. Αυτές οι εξοικονομήσεις από το κόστος επένδυσης θα μπορούσαν ακόμη και να αυξηθούν έως και κατά το ήμισυ του συνολικού κόστους των επενδύσεων, όταν υιοθετήθηκε η ενεργός διαμεσολάβηση με τη μορφή δικτύων. Ωστόσο, τα περισσότερα, εάν όχι όλα, από αυτά τα συμπεράσματα βασίζονται σε προσομοιωμένα αποτελέσματα και μαθηματικά μοντέλα. Η κατανόηση μιας πρακτικής διορατικότητας θα ήταν μια ενδιαφέρουσα πρόκληση που θα χρειαζόταν για περαιτέρω διερεύνηση.

6.2. RAN Slicing & Traffic Isolation

Μια παραμένουσα πρόκληση όσον αφορά τον τεμαχισμό RAN είναι η εικονικοποίηση του φυσικού καναλιού (δηλαδή η απομόνωση της κυκλοφορίας RAN). Πράγματι, αν δεν χρησιμοποιηθεί διαμόρφωση δέσμης, η στατική εκχώρηση PRB στις μονάδες UE επιτρέπει την εξασφάλιση της απομόνωσης της κυκλοφορίας RAN από τη μία πλευρά, αλλά περιορίζει το κέρδος πολυπλεξίας. Οι προσαρμογές slice με βάση την πρόβλεψη της κυκλοφορίας μπορούν να αυξήσουν τα κέρδη πολυπλεξίας με κόστος της επεκτασιμότητας του δικτύου, ενώ μια κατανομή PRB που βασίζεται στην πολιτική, λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το φάσμα, μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω κέρδη πολυπλεξίας, αλλά με κόστος ασφάλειας δεδομένου ότι δεν υπάρχει απομόνωση σκληρού φάσματος. Το 5G αναμένεται επίσης να βασιστεί στη διαμόρφωση δέσμης. Συνεπώς, απαιτούνται νέες λύσεις για την εικονικοποίηση του φυσικού καναλιού και την ενεργοποίηση των slices RAN για να επωφεληθούν από τη διαμόρφωση δέσμης. Τέτοιες λύσεις θα πρέπει να δημιουργήσουν ένα συγκεκριμένο φυσικό κανάλι για ένα (I / Q) (π.χ. ορθογώνια πολυπλεξία πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) σε απομακρυσμένη διαμόρφωση LTE) πριν να είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει την κίνηση που είναι αφιερωμένη στο UE από μια slice που είναι πολύ καταναλώσιμο και μη αποδοτικό.

Ωστόσο, η επεξεργασία συγκεκριμένων χρηστών του χρήστη (π.χ., κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση turbo σε LTE) μπορεί να εικονικοποιηθεί (δηλ. Να μοιραστεί), ανάλογα με το απαιτούμενο επίπεδο απομόνωσης.

6.3. Slice Security

Οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια σε εικονικές πλατφόρμες ή πλατφόρμες σύννεφων είναι καλά καθορισμένες. Ωστόσο, όσον αφορά τις προκλήσεις ασφάλειας για τον τεμαχισμό σε δίκτυο, οι απειλές είναι πολύπλευρες. Πρώτον, το ζήτημα των απειλών ασφάλειας μεταξύ των τμημάτων και στην περίπτωση μιας ομοσπονδιακής αρχιτεκτονικής, το δεύτερο είναι οι προκλήσεις ασφάλειας της εναρμόνισης των πόρων των δικτύων και της συγχώνευσης μεταξύ τμημάτων slice μεταξύ τομέων. Προκύπτουν περαιτέρω προβλήματα ασφάλειας λόγω των διαφορετικών επιπέδων αλληλεπίδρασης μεταξύ των τομέων τεχνολογίας που παρέχουν τους πόρους slice, των ενοικιαστών που μοιράζονται τους πόρους και των διαφορετικών επιπέδων έκθεσης που υπάρχουν μεταξύ των slices του δικτύου και των φιλοξενούμενων ενοικιαστών. Με βάση τις τρέχουσες αρχιτεκτονικές τεμαχισμού δικτύου, υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα αλληλεπιδράσεων και στρώματα απομονώσεων μεταξύ διαφορετικών slices ανάλογα με τις επιχειρηματικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Οι φέτες δικτύου χρησιμοποιούν αυτές τις διεπαφές αλληλεπίδρασης για την ανταλλαγή ορισμένων σημαντικών πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση δικτύου και τους πόρους του δικτύου. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των VNF που οι κοινόχρηστοι κόμβοι του δικτύου μπορεί να έχουν κοινό ή να μοιραστούν, τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο των τρωτών σημείων ασφαλείας που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ τους. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαφορές στα επίπεδα ασφαλείας που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των slices, το σχέδιο [169] για το δίκτυο διανομής σε δίκτυα (SDD) πρότεινε τη χρήση πρόσθετων ποσοτικών ή ποιοτικών παραμέτρων για τη διάκριση των επιπέδων ασφαλείας που απαιτούνται από μεμονωμένες φέτες.

Οι φέτες, αν και με διαφορετικές απαιτήσεις, μπορούν να ενορχηστρωθούν χρησιμοποιώντας πόρους σε πολλούς τεχνολογικούς τομείς. Κάθε ένας από τους τομείς αυτούς έχει διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης για τις αντίστοιχες υποκείμενες φυσικές υποδομές, οι οποίες μπορεί να έχουν εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες αιχμής ανίχνευσης ασφαλείας και ενδεχομένως πρόληψης. Η ενορχήστρωση ενός τεμαχίου δικτύου σε τέτοιες διαφορετικές ιδιότητες εικονικές πλατφόρμες με τις αντίστοιχες μοναδικές ιδιότητες ασφαλείας τους θα εκθέσει το προκύπτον κομμάτι του δικτύου σε διαφορετικές μορφές τόσο της απειλής ασφάλειας μέσα στο slice, δηλαδή των απειλών για την ασφάλεια εντός των ενορχηστρωμένων slices και της ασφάλειας μεταξύ των τομέων, δηλαδή την ασφάλεια μεταξύ των τομέων από τους οποίους οι πόροι τεμαχίων ενορχηστρώνονται. Στην περίπτωση κοινής χρήσης δικτύου που περιλαμβάνει φέτες διαφορετικών ενοικιαστών, τα τρωτά σημεία ασφαλείας είναι ακόμα πιο πολύπλοκα. Το γεγονός ότι καθένας από τους λειτουργικούς μισθωτές μπορεί να μοιράζεται πόρους μαζί με τις απομονωμένες φέτες δικτύου τους με διαφορετικές παραμέτρους ασφαλείας εκθέτει τις ατομικές τους φέτες δικτύου σε μια μορφή απειλής ασφαλείας εντός του ενοικιαστή.

6.4. Βελτιστοποίηση Network Slicing

Μία από τις πιο δύσκολες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τεμαχισμός του δικτύου είναι η βέλτιστη περιγραφή, ο καθορισμός και η δυναμική προσαρμογή των προτύπων τεμαχίων του δικτύου (δηλ. Η δυναμική κατανομή πόρων και η βέλτιστη τοποθέτηση VNF). Παραδοσιακά, τα εικονικά δίκτυα δημιουργούνται με τη στατική κατανομή ενός συνόλου αναμενόμενου ποσού πόρων δικτύου, δηλαδή δικτύωσης, επεξεργασίας / υπολογιστικής και αποθήκευσης. Αυτή η μέθοδος είναι συχνά μη βέλτιστη, υπό την έννοια ότι οι πόροι του δικτύου συνήθως είναι είτε υπερπληθωρισμένοι είτε ανεπαρκείς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φέτες του δικτύου, ειδικά εκείνες που δεν αναπτύσσονται για γνωστό αριθμό χρηστών, αντιμετωπίζουν συχνά την πρόκληση ανεπαρκών πόρων καθώς ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται, με αποτέλεσμα την κακή απόδοση του δικτύου. Για τον μετριασμό αυτής της πρόκλησης, οι αποτελεσματικοί αλγόριθμοι κατανομής των πόρων του δικτύου πρέπει να ενσωματώσουν μια μορφή τεχνικών βελτιστοποίησης Pareto, όπου οι πόροι του δικτύου μπορούν να κλιμακωθούν δυναμικά προς τα επάνω ή προς τα κάτω ή προς τα έξω για να εξυπηρετήσουν βέλτιστα τον συνολικό αριθμό φτιαγμένων φέτες δικτύου με ανεπαρκείς πόρους, δηλαδή επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση οποιωνδήποτε ενεργών slices δικτύου. Από τεχνικής απόψεως, η ανάπτυξη μιας τέτοιας ευέλικτης κατανομής πόρων είναι η βέλτιστη κατανομή των πόρων, ιδιαίτερα όταν εξετάζεται ένα σύνολο λειτουργικών απαιτήσεων που πρέπει να γνωρίζουμε προηγουμένως προκειμένου να εκπληρωθούν. Επιπλέον, θα ήταν ακόμη πιο δύσκολο και σύνθετο αν ληφθεί υπόψη πρωτόγνωρη συμπεριφορά δικτύου στο σχεδιασμό του αλγορίθμου.

6.5. UE Slicing

Στο 4G, οι ΕΕ δεν διαφοροποιούνται ο ένας από τον άλλο όσον αφορά τις απαιτήσεις υπηρεσιών και τις λειτουργικές απαιτήσεις. Ως εκ τούτου, το δίκτυο τις αντιμετωπίζει με τον ίδιο τρόπο. Αντίστροφα, τα δίκτυα 5G αναμένεται να χειριστούν UEs με βάση τα ατομικά τους χαρακτηριστικά ή τους τύπους κατηγοριών χρήσης. Αυτό σημαίνει ότι κάθε UE δεν θα πρέπει να συνδέεται πια σε ένα ενιαίο μέγεθος, αλλά σε ένα προσαρμοσμένο κομμάτι, το οποίο δημιουργείται ειδικά για αυτόν τον τύπο UE. Για παράδειγμα, μια UE που ανήκει στον τύπο κλάσης χρήσης Cric θα συνδεθεί με την φράση δικτύου Cric, ομοίως, μια UE που ανήκει στον τύπο τάξης χρήσης eV2X θα συνδεθεί με την sliced δικτύου eV2X, εξασφαλίζοντας έτσι έναν υψηλό βαθμό QoS. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά του δικτύου 5G, κάποιες περαιτέρω ερευνητικές προσπάθειες εισάγουν μια νέα αντίληψη για τον τεμαχισμό στην ΕΕ, ιδιαίτερα τις φορητές και έξυπνες συσκευές όπως τα τηλέφωνα, τα δισκία, τα μαξιλάρια και ενδεχομένως φορητούς υπολογιστές. Ο τεμαχισμός στην ΕΕ υποτίθεται ότι θα επιφέρει περισσότερη ελευθερία, προσαρμογή και τεράστια ποικιλία εφαρμογών στους τελικούς χρήστες. Ο τεμαχισμός UE θεωρεί τις έξυπνες συσκευές ως πλατφόρμα εξοπλισμού βασικών προϊόντων που διαθέτει ένα προεγκατεστημένο μεσαίο λογισμικό (παρόμοιο με έναν hypervisor σε διακομιστές γενικής χρήσης ή υπολογιστές), το οποίο μπορεί να φιλοξενήσει, να διαχειριστεί και να προγραμματίσει πόρους μεταξύ πολλών οντοτήτων κινητού OS. Αυτά τα λειτουργικά συστήματα εγκαθίστανται σε λογικά χωρίσματα δοχείων που δημιουργούνται από το μεσαίο λογισμικό για τα έξυπνα προϊόντα υλικού και διαχειρίζονται τους πόρους μεταξύ τους. Αυτά τα λογικά διαμερίσματα των λειτουργικών συστημάτων θα παρουσιάσουν την UE ως πλατφόρμα όπου εκτελούνται

φέτες διαφορετικών λειτουργικών συστημάτων. Τα λειτουργικά συστήματα διατηρούν τις προσαρμόσιμες λειτουργίες που τους επιτρέπουν να εγκαθιστούν και να εκτελούν τις αντίστοιχες εφαρμογές τους, παρέχοντας έτσι στους τελικούς χρήστες πλούσια πηγή εφαρμογών που εκτελούνται σε φέτες του UE.

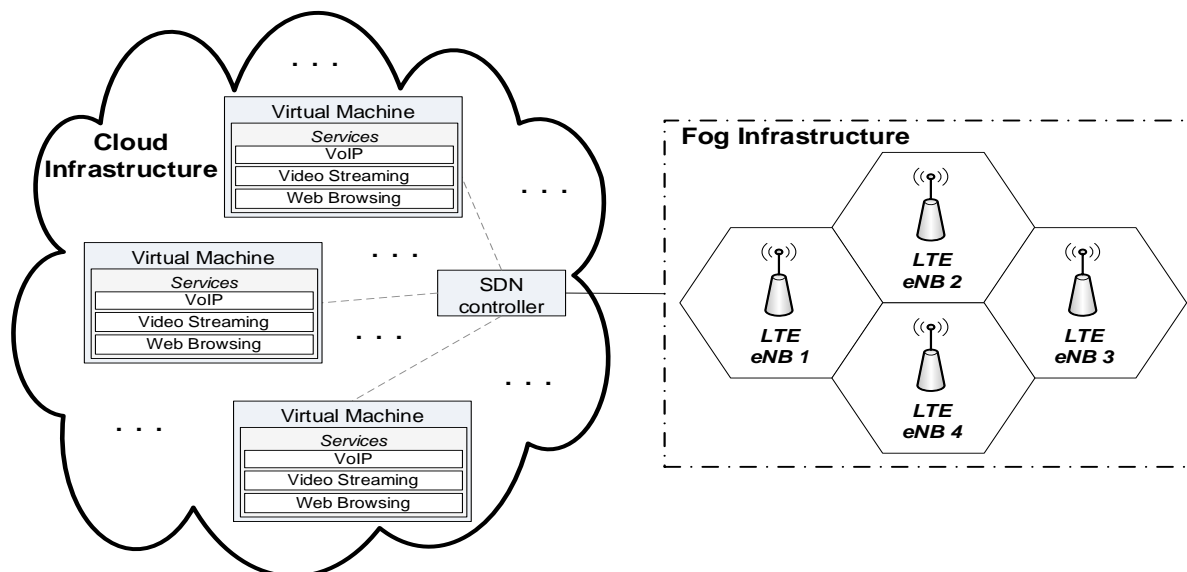
6.6. Εξέλιξη του Network Slicing Evolution & APIs

Οι τρέχουσες δραστηριότητες έρευνας και τυποποίησης γύρω στα 5G επεσήμαναν την ανάγκη για μια βελτιωμένη αρχιτεκτονική δικτύου κινητών και μεταφορικών δικτύων για την υποστήριξη νέων ραδιοτεχνολογιών όπως το 5G New Radio (NR) και το χιλιοστόμετρο. Επιπλέον, μια τέτοια αρχιτεκτονική 5G θα πρέπει να υποστηρίζει την έγκαιρη δρομολόγηση νέων υπηρεσιών και ανταλλαγής πόρων μέσω virtualization, επιτρέποντας κατ'αυτόν τον τρόπο τον τεμαχισμό του δικτύου 5G. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται στενότερη ολοκλήρωση των τεχνολογιών δικτύωσης και cloud computing, προσφέροντας έναν ευέλικτο βαθμό προσαρμοστικότητας για λειτουργίες δικτύου και υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας. Παρόλο που πολλά τρέχοντα έργα ασχολούνται με ειδικά αρχιτεκτονικά ζητήματα που σχετίζονται με το 5G, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση να προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση λαμβάνοντας υπόψη τις νέες πτυχές του ραδιοφώνου, του cloud και των υπηρεσιών, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν τις αυστηρές απαιτήσεις όλων των αναδυόμενων περιπτώσεων χρήσης 5G. Τα τρέχοντα δίκτυα 4G βασίζονται σε ένα στατικό προρυθμισμένο δίκτυο στρώματος μεταφορών, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά της κίνησης που σχετίζεται με διαφορετικούς φορέα GTPS Tunneling Protocol (GTPS Tunneling Protocol). Με την εισαγωγή του φτυαρισμού του δικτύου στο επίπεδο του κινητού δικτύου, αυξάνονται επίσης οι νέες απαιτήσεις σχετικά με την αυτόματη και δυναμική διαμόρφωση του δικτύου για το επίπεδο δικτύου μεταφοράς. Για να ενεργοποιηθεί αποτελεσματικά αυτό, υπάρχει ανάγκη για μια νέα διεπαφή μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και του δικτύου μεταφορών, όπως προσδιορίστηκε από την ομάδα εργασίας 3GPP Network Management SA5. Μια τέτοια διασύνδεση προβλέπεται να συνδέει το σύστημα διαχείρισης του κινητού δικτύου με τον ελεγκτή δικτύου μεταφοράς. Ο κύριος στόχος του είναι να διευκολύνει την έκθεση στις δυνατότητες του δικτύου μεταφορών και τη χαρτογράφηση μιας slice κινητού δικτύου στους υποκείμενους πόρους του δικτύου μεταφορών. Οι βασικές προκλήσεις για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η ανάπτυξη: (i) μοντέλων δεδομένων που θα αντικατοπτρίζουν τις απαιτήσεις για το δίκτυο που συνδέονται με το δίκτυο μεταφορών, (ii) τις διαδικασίες και τις λειτουργίες δικτύου που είναι υπεύθυνες για τη χαρτογράφηση των απαιτήσεων μιας slice κινητού δικτύου προς τις μεταφορές τους πόρους δικτύου λαμβάνοντας υπόψη την υποκείμενη τεχνολογία των μεταφορών και (iii) μια βάση δεδομένων για την παρακολούθηση των πόρων που σχετίζονται με ένα τμήμα του δικτύου μεταφορών για την υποβοήθηση της διαδικασίας χαρτογράφησης, λαμβάνοντας υπόψη κοινούς και ειδικούς πόρους.

Κεφάλαιο 7 Προσομοίωση

7.1. Τοπολογία Δικτύου

Για τις ανάγκες της αξιολόγησης της απόδοσης των δικτύων 5G για περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται Network Slicing, η 5G αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στην εικόνα 12, υλοποιήθηκε με χρήση του περιβάλλοντος προσομοίωσης Network Simulator 3 (NS3). Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελείται από μία υποδομή Fog και από μία υποδομή Cloud. Πιο συγκεκριμένα, η υποδομή Fog περιλαμβάνει 4 σταθμούς βάσεις LTE (4 LTE eNBs) με 4 κεραιοστοιχεία εγκατεστημένα στον κάθε σταθμό βάσης, ενώ ο πίνακας 1 παρουσιάζει τις συχνότητες (spectrum) που έχουν ανατεθεί στον εκάστοτε σταθμό βάσης. Αντίστοιχα, η υποδομή Cloud περιλαμβάνει ένα σύνολο από Εικονικές Μηχανές (Virtual Machines - VMs) οι οποίες παρέχουν-υποστηρίζουν υπηρεσίες Voice over IP (VoIP), Video Streaming (VS) και Web Browsing (WB). Επιπροσθέτως, ένας SDN controller παρέχει κεντρικοποιημένο έλεγχο ολόκληρης της αρχιτεκτονικής 5G. Ο πίνακας Y συνοψίζει όλες τις παραμέτρους τις προσομοίωσης.



Εικόνα 12. Η αρχιτεκτονική 5G που υλοποιείται κατά την προσομοίωση.

Πίνακας 1. Οι συχνότητες (spectrum) που έχουν ανατεθεί στον εκάστοτε σταθμό βάσης.

Σταθμός Βάσης	Συχνότητες για το Downlink σε MHz (Μπάντα LTE)			
	Κεραία 1	Κεραία 2	Κεραία 3	Κεραία 4
LTE eNB 1	3510-3515 (22)	3515-3520 (22)	3520-3525 (22)	3525-3530 (22)
LTE eNB 1	3530-3535 (22)	3535-3540 (22)	3540-3545 (22)	3545-3550 (22)
LTE eNB 1	3550-3555 (22)	3555-3560 (22)	3560-3565 (22)	3565-3570 (22)
LTE eNB 1	3570-3575 (22)	3575-3580 (22)	3580-3585 (22)	3585-3590 (22)

Ένα σύνολο από 2 έως 10 χρήστες μετακινούνται εντός της περιοχής κάλυψης του LTE eNB 1. Κάθε χρήστης λαμβάνει μία ροή δεδομένων από την κάθε υπηρεσία, ενώ οι απαιτήσεις της εκάστοτε υπηρεσίας παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Οι απαιτήσεις αυτές είναι σύμφωνες με τα service requirements που έχει ορίσει ο οργανισμός 5G-PPP σχετικά με την κάθε υπηρεσία, όταν εκείνη εξυπηρετείται από μία υποδομή 5G.

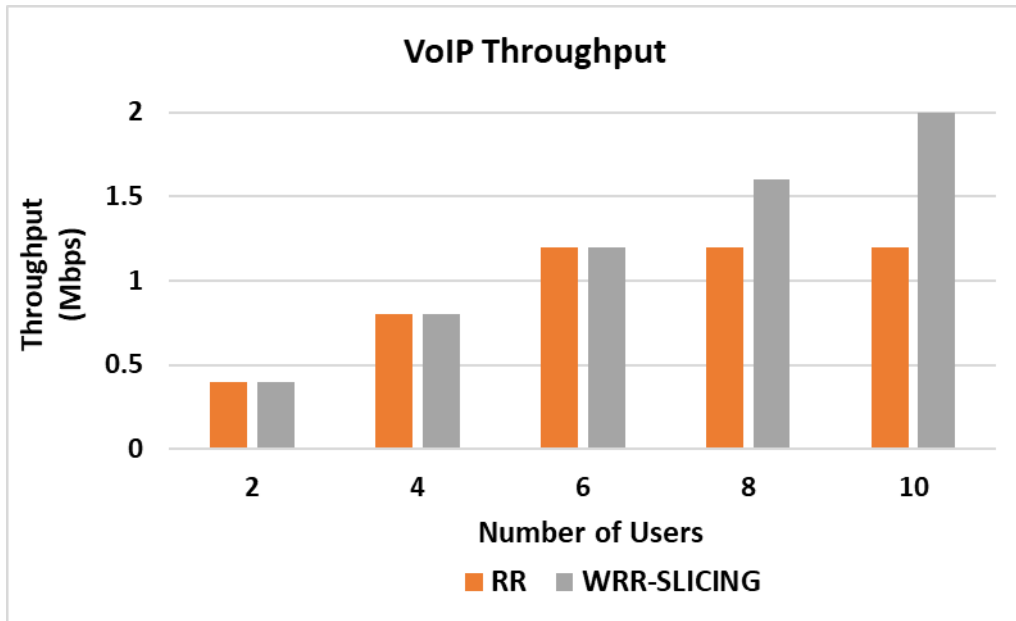
Πίνακας 2. Οι απαιτήσεις για την εκάστοτε υπηρεσίας όπως ορίζονται από τον οργανισμό 5G-PPP.

Υπηρεσία	5QI	Τύπος πόρου	Προτεραιότητα	Μέγιστο αποδεκτό Delay	Μέγιστο αποδεκτό Packet Loss
Voice over IP (VoIP)	1	GBR	20	100 ms	10^{-2}
Video Streaming	2	GBR	40	150 ms	10^{-3}
Web Browsing	6	Non-GBR	60	300 ms	10^{-6}

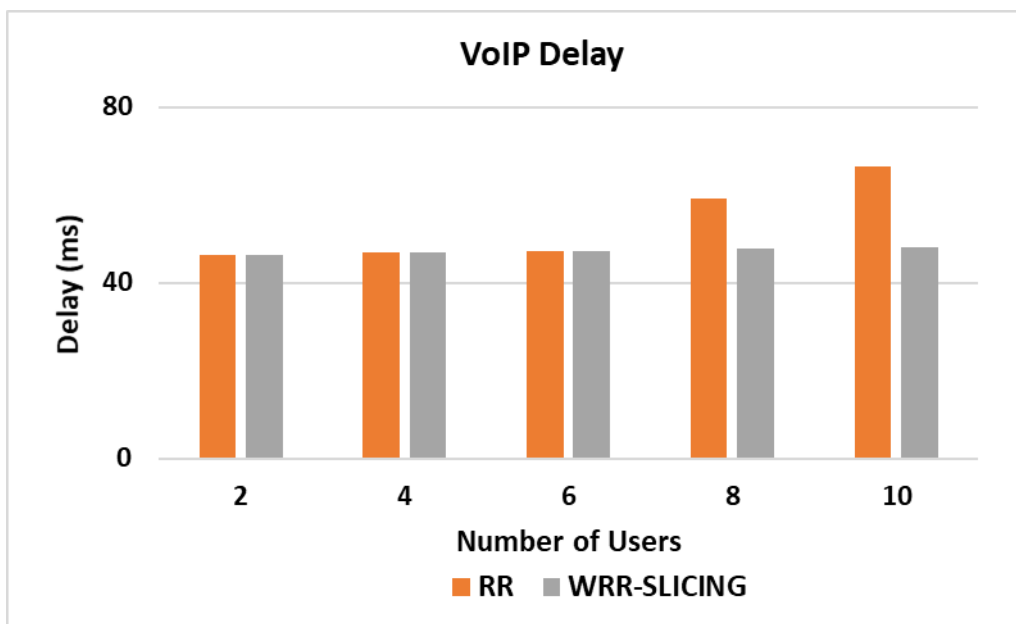
7.2. Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα, αξιολογείται η απόδοση της αρχιτεκτονικής 5G για την περίπτωση όπου εφαρμόζεται Network Slicing σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται κάποιος μηχανισμός Network Slicing. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση όπου εφαρμόζεται Network Slicing λαμβάνεται υπόψη ο αλγόριθμος διαμοιρασμού πόρων δικτύου Weighted Round Robin with Network Slicing (WRR-SLICING) [72] ενώ για την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται κάποιο μηχανισμός για Network Slicing προσομοιώνεται ο απλός αλγόριθμος Round Robin (RR). Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση της απόδοσης περιλαμβάνουν το throughput, το από άκρο σε άκρο delay και το packet loss ratio.

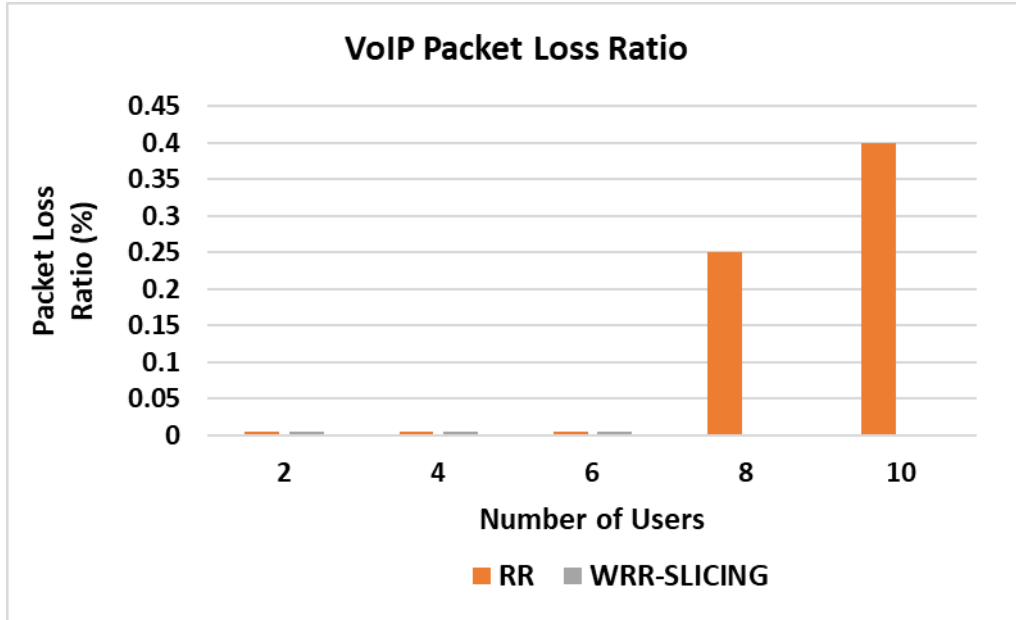
Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρακάτω, ο αλγόριθμος RSDR επιτυγχάνει υψηλότερο throughput για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (VoIP και Video Streaming) καθώς αναθέτει υψηλότερη προτεραιότητα στις υπηρεσίες αυτές σε σύγκριση με την υπηρεσία του Web Browsing. Πιο συγκεκριμένα, σε ό,τι αφορά την υπηρεσία του VoIP, ο αλγόριθμος RSDR επιτυγχάνει έως και 800 kbps υψηλότερο Throughput σε σύγκριση με τον αλγόριθμο RR, ενώ σε ό,τι αφορά την υπηρεσία του Video Streaming επιτυγχάνει έως περίπου 8,5 Mbps υψηλότερο Throughput. Ωστόσο, λόγω ότι ο αλγόριθμος RSDR εφαρμόζει Network Slicing, η υψηλότερη απόδοση των υπηρεσιών VoIP και Video Streaming, στο σενάριο που εξετάζουμε, δεν επιφέρει μείωση απόδοσης για την υπηρεσία Web Browsing. Ο λόγος που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι ότι λόγω του Network Slicing, ένας σταθμός βάσης που εξυπηρετεί χρήστες (στην περίπτωση μας ο eNB1) μπορεί να «δανείζεται» επιπρόσθετους τηλεπικοινωνιακούς πόρους από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Παρόμοια απόδοση παρατηρείται και στη περίπτωση όπου εξετάζονται οι παράμετροι του Delay και του Packet Loss Ratio. Συγκεκριμένα, σε ό,τι αφορά το Delay που παρατηρείται για την υπηρεσία του VoIP, ο αλγόριθμος RSDR επιτυγχάνει έως και 20 ms χαμηλότερη καθυστέρηση, ενώ σε ό,τι αφορά το Delay για την υπηρεσία του Video Streaming επιτυγχάνει έως περίπου 40 ms χαμηλότερη καθυστέρηση μετάδοσης. Αντίστοιχα, σε ό,τι αφορά το Packet Loss Ratio που παρατηρείται για τις δύο υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, δηλαδή την υπηρεσία VoIP και την υπηρεσία Video Streaming, ο αλγόριθμος RSDR επιτυγχάνει έως και 40% χαμηλότερες απώλειες πακέτων σε σύγκριση με τον αλγόριθμο RR. Τέλος, σε ό,τι αφορά την υπηρεσία Web Browsing, οι δύο αλγόριθμοι επιτυγχάνουν παρόμοιες τιμές και για τις παραμέτρους Delay και Packet Loss Ratio.



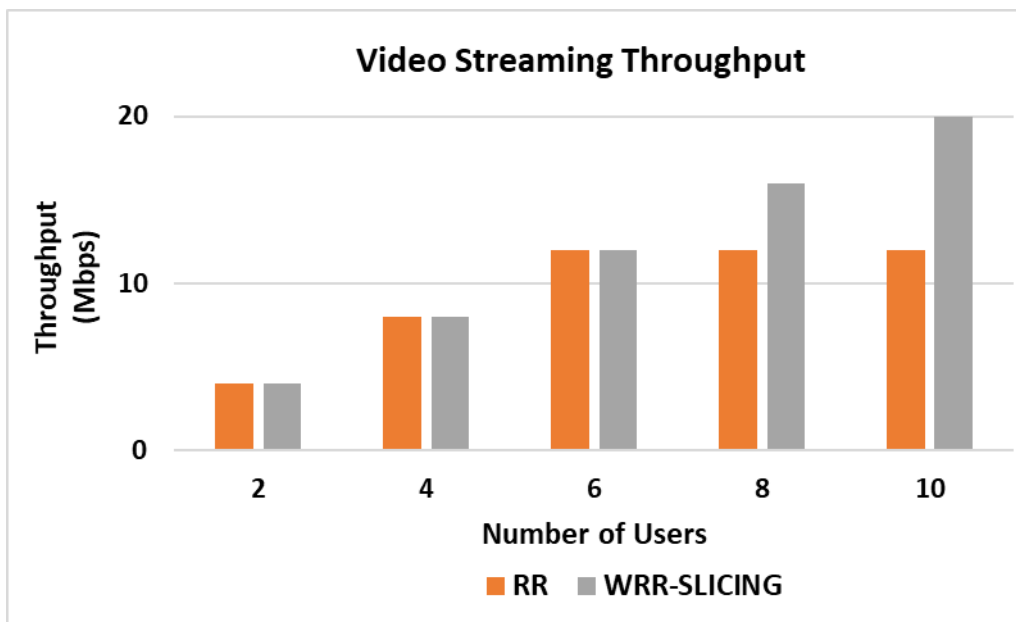
Εικόνα 13. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Throughput για την υπηρεσία VoIP.



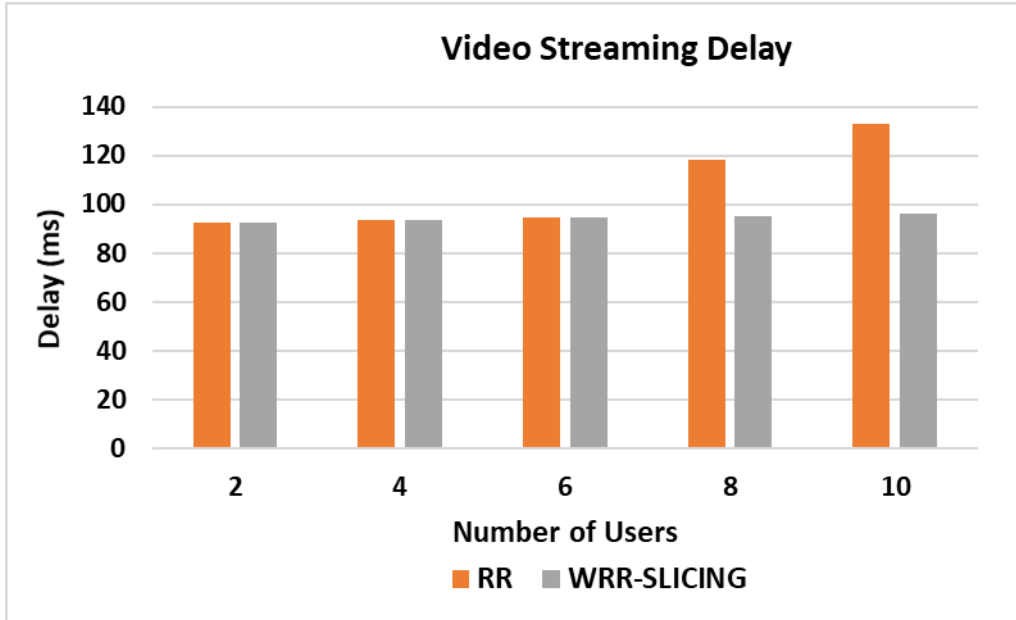
Εικόνα 14. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Delay για την υπηρεσία VoIP.



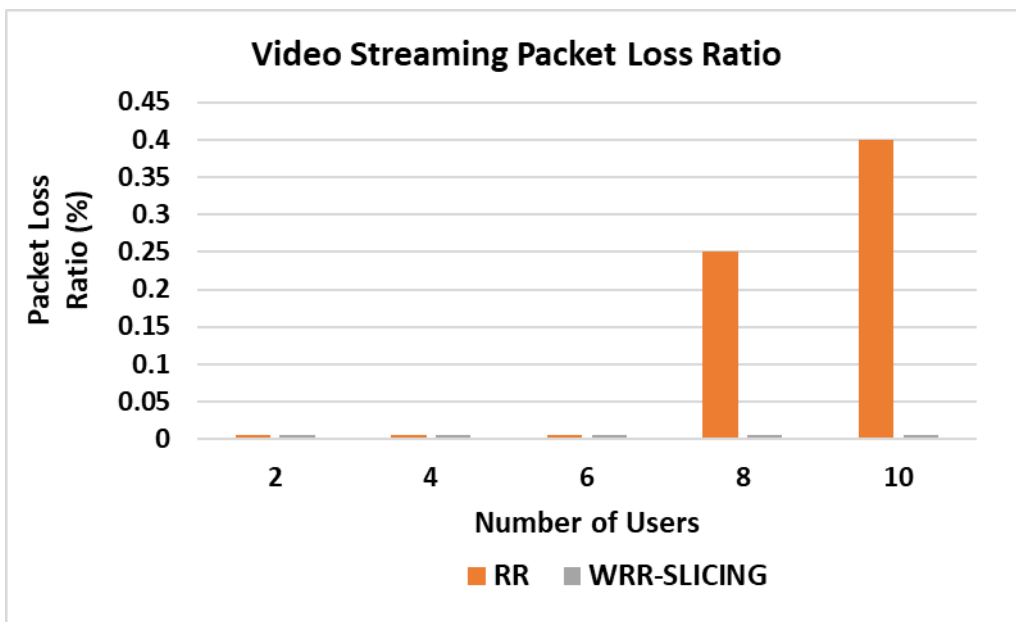
Εικόνα 15. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Packet Loss Ratio για την υπηρεσία VoIP.



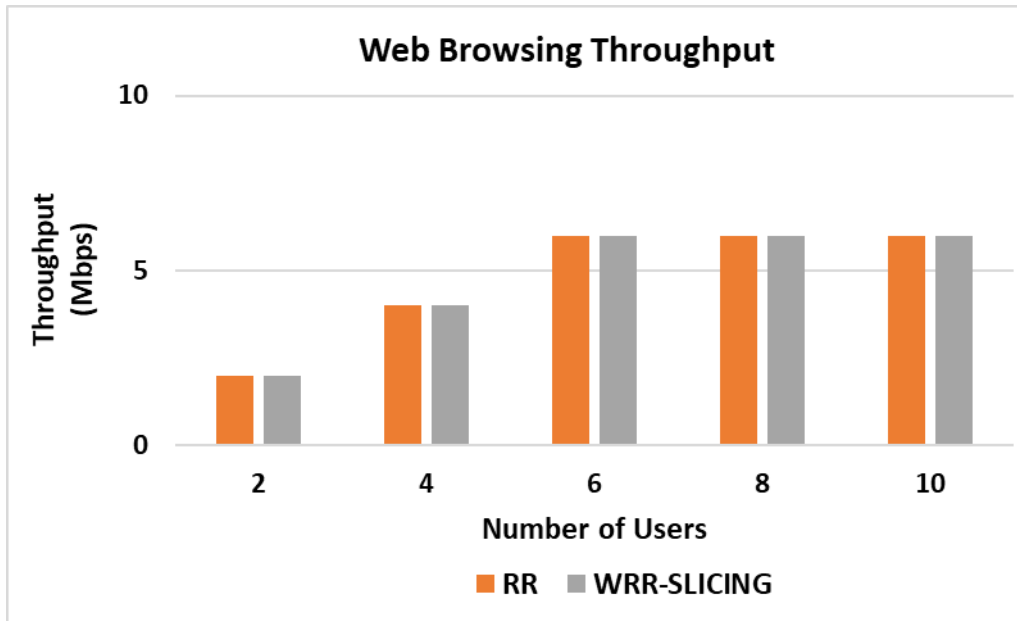
Εικόνα 16. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Throughput για την υπηρεσία Video Streaming.



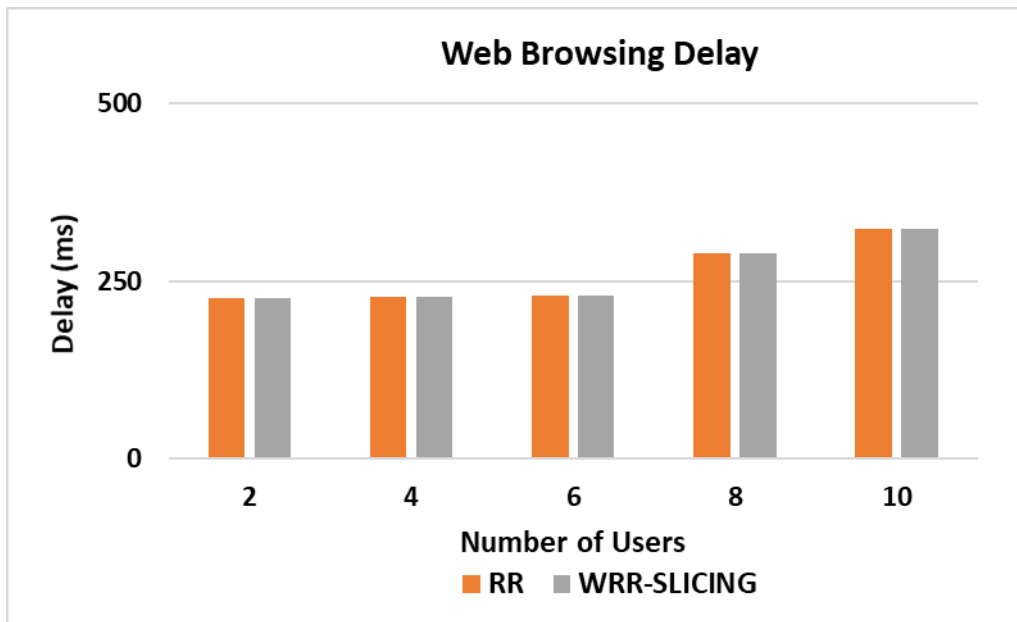
Εικόνα 17. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Delay για την υπηρεσία Video Streaming.



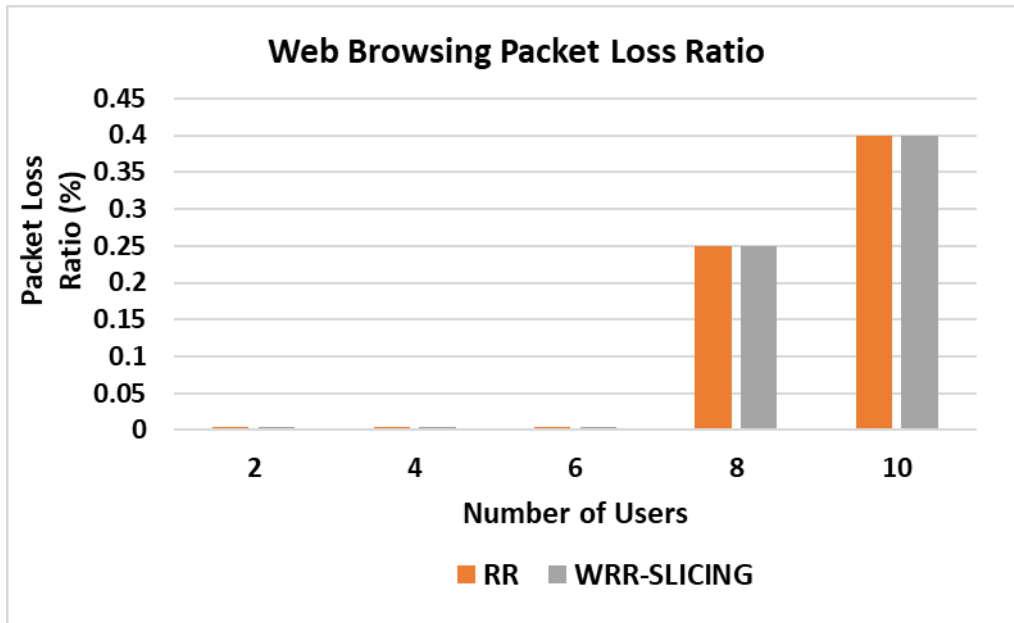
Εικόνα 18. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Packet Loss Ratio για την υπηρεσία Video Streaming.



Εικόνα 19. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Throughput για την υπηρεσία Web Browsing.



Εικόνα 20. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Delay για την υπηρεσία Web Browsing.



Εικόνα 21. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με τον παράγοντα του Packet Loss Ratio για την υπηρεσία Web Browsing.

Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει μια περιεκτική έρευνα σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση ωριμότητας του network slicing σε 5G. Εκθέτει πληροφορίες εκθέτοντας την κύρια ιδέα και τις αρχές του τεμαχισμού ενός δικτύου 5G, εισάγοντας τους παράγοντες που επιτρέπουν τον τεμαχισμό του δικτύου, όπως οι τεχνολογίες NFV, SDN και cloud. Παρουσιάζει επίσης τις υπηρεσίες 5G και τους επιχειρησιακούς οδηγούς, καθώς και τον αντίκτυπο του network slicing μέσω του RAN, του κεντρικού δικτύου και του δικτύου μεταφορών εξετάζοντας κατ'αυτό τον τρόπο τεμαχισμό δικτύου από άκρο σε άκρο. Όσον αφορά τον τεμαχισμό από άκρο σε άκρο, η συγκεκριμένη εργασία περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί ο τεμαχισμός του δικτύου με το κόστος των RAN και των βασικών δικτύων, περιγράφοντας πρακτικά παραδείγματα. Τέλος αναφέρει τις ανοιχτές ερευνητικές προκλήσεις σύμφωνα με την υλοποίηση του τερματικού δικτύου στα 5G κινητά δίκτυα.

Βιβλιογραφία

- [1] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, H. Flinck, “Network Slicing and Softwarization : A Survey on Principles, Enabling Technologies and Solutions”, *Ieee Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 3, Third quarter 2018.
- [2] (2017). *Two Million Devices an Hour to Be Connected in 2025*. [Online]: Available: <http://www.iteuropa.com/?q=two-million-deviceshour-be-connected-2025>
- [3] A. Manzalini *et al.*, “Towards 5G software-defined ecosystems: Technical challenges, business sustainability and policy issues,” *IEEE Future Directions*, White Paper, Jul. 2016.
- [4] P. A. Frangoudis, L. Yala, A. Ksentini, and T. Taleb, “An architecture for on-demand service deployment over a telco CDN,” in *Proc. IEEE ICC*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016, pp. 1–6.
- [5] S. Retal, M. Bagaa, T. Taleb, and H. Flinck, “Content delivery network slicing: QoE and cost awareness,” in *Proc. IEEE ICC*, Paris, France, May 2017, pp. 1–6.
- [6] T. Taleb, B. Mada, M.-I. Corici, A. Nakao, and H. Flinck, “PERMIT: Network slicing for personalized 5G mobile telecommunications,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 88–93, May 2017.
- [7] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, “Network slicing in 5G: Survey and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, May 2017.
- [8] M. Richart, J. Baliosian, J. Serrat, and J.-L. Gorricho, “Resource slicing in virtual wireless networks: A survey,” *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 13, no. 3, pp. 462–476, Sep. 2016.
- [9] T. Taleb *et al.*, “On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, 3rd Quart., 2017.
- [10] R. Mijumbi *et al.*, “Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, 1st Quart., 2016.
- [11] J. G. Herrera and J. F. Botero, “Resource allocation in NFV: A comprehensive survey,” *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 13, no. 3, pp. 518–532, Sep. 2016.

- [12] V.-G. Nguyen, A. Brunstrom, K.-J. Grinnemo, and J. Taheri, “SDN/NFV-based mobile packet core network architectures: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 3, pp. 1567–1602, 3rd Quart., 2017.
- [13] A. Blenk, A. Basta, M. Reisslein, and W. Kellerer, “Survey on network virtualization hypervisors for software defined networking,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 1, pp. 655–685, 1st Quart., 2016.
- [14] Y. Li and M. Chen, “Software-defined network function virtualization: A survey,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2542–2553, 2015.
- [15] S. Lal, T. Taleb, and A. Dutta, “NFV: Security threats and best practices,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 211–217, May 2017.
- [16] “IMT vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, ITU-Recommendation M.2083-0, Sep. 2015.
- [17] (Feb. 2015). *5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership: The Next Generation of Communication Networks and Services*. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf>
- [18] A. Osseiran *et al.*, “Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, May 2014.
- [19] 5G Empowering Vertical Industries, 5GPPP, Heidelberg, Germany, 2016.
- [20] S. Nanda and T. Chiueh. *A Survey on Virtualization Technologies*. Accessed: Mar. 22, 2017. [Online]. Available: <http://www.ecsl.cs.sunysb.edu/tr/TR179.pdf>
- [21] S. Meier, *IBM Systems Virtualization: Servers, Storage, and Software*, IBM Redbook, Armonk, NY, USA, May 2008.
- [22] R. P. Goldberg, “Survey of virtual machine research,” *IEEE Comput.*, vol. C-7, no. 6, pp. 34–45, Jun. 1974.
- [23] A. B. Lindquist, R. R. Seeber, and L. W. Comeau, “A time-sharing system using an associative memory,” *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 12, pp. 1774–1779, Dec. 1966.
- [24] *NGMN 5G White Paper*, NGMN Alliance, Frankfurt, Germany, Feb. 2015.
- [25] “Study on architecture for next generation system, release 14,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 23.799, Dec. 2016.

- [26] “Framework of network virtualization for future networks, next generation network—Future networks,” Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, ITU-T Recommendation Y.3011, Jan. 2012.
- [27] *Description of Network Slicing Concept, NGMN 5G P1 Requirements & Architecture, Work Stream End-to-End Architecture, Version 1.0*, NGMN Alliance, Frankfurt, Germany, Jan. 2016.
- [28] T. Taleb, A. Ksentini, and A. Kobbane, “Lightweight mobile core networks for machine type communications,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1128–1137, 2014.
- [29] “Study on new services and markets technology enablers, release 14,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 22.891, Sep. 2016.
- [30] “Feasibility study on new services and markets technology enablers for enhanced mobile broadband, release 14,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 22.863, Jun. 2016.
- [31] “Feasibility study on new services and markets technology enablers for critical communications, release 14,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 22.862, Jun. 2016.
- [32] “Feasibility study on new services and markets technology enablers for massive Internet of Things, release 14,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 22.861, Jun. 2016.
- [33] T. Taleb, S. Dutta, A. Ksentini, I. Muddesar, and H. Flinck, “Mobile edge computing potential in making cities smarter,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 38–43, Mar. 2017.
- [34] *AT&T Digital Life—Home Security & Automation Systems*. [Online]. Available: <https://www.att.com/digital-life>
- [35] “Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services, release 15,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 22.886, Dec. 2016.
- [36] “Study on RAN sharing enhancements, release 13,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. TR 22.852, Sep. 2014.
- [37] *Telecommunication Management; Network Sharing; Concepts and Requirements, Release 12*, 3GPP Standard TS 32.130, Dec. 2014.
- [38] W. Xia, Y. Wen, C. H. Foh, D. Niyato, and H. Xie, “A survey on software-defined networking,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 1, pp. 27–51, 1st Quart., 2015.
- [39] SDN Architecture Overview, document TR-504, ONF, Menlo Park, CA, USA, Nov. 2014.

- [40] Applying SDN Architecture to 5G Slicing, document TR-526, ONF, Menlo Park, CA, USA, Apr. 2016.
- [41] L. Peterson *et al.*, “Central office re-architected as a data center,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 10, pp. 96–101, Oct. 2016.
- [42] ETSI NFV, “Network functions virtualization: An introduction, benefits, enablers, challenges & call for action,” Darmstadt, Germany, SDN & OpenFlow World Congr., White Paper, Oct. 2012.
- [43] A. M. Medhat *et al.*, “Service function chaining in next generation networks: State of the art and research challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 216–223, Feb. 2017.
- [44] A. Fischer, J. F. Botero, M. T. Beck, H. de Meer, and X. Hesselbach, “Virtual network embedding: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 4, pp. 1888–1906, 4th Quart., 2013.
- [45] P.G. Lopez *et al.*, “Edge-centric computing: Vision and challenges,” *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 45, no. 5, pp. 37–42, Oct. 2015.
- [46] “Mobile-edge computing—Introductory technical,” Sophia Antipolis, France, ETSI NFV, White Paper, Sep. 2014.
- [47] S. Sharma, R. Miller, and A. Francini, “A cloud-native approach to 5G network slicing,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 120–127, Aug. 2017.
- [48] 5GPPP, “View on 5G architecture,” 5G PPP Architecture Working Group, EuCNC, Athens, Greece, Jul. 2016.
- [49] A. Banchs *et al.*, “A novel radio multiservice adaptive network architecture for 5G networks,” in *Proc. IEEE VTC-Spring*, Glasgow, U.K., May 2015, pp. 1–5.
- [50] P. Rost *et al.*, “Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 72–79, May 2017.
- [51] K. Katsalis, N. Nikaein, E. Schiller, A. Ksentini, and T. Braun, “Network slices toward 5G communications: Slicing the LTE network,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 146–154, Aug. 2017.
- [52] K. Samdanis, X. Costa-Perez, and V. Sciancalepore, “From network sharing to multi-tenancy: The 5G network slice broker,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 32–39, Jul. 2016.

- [53] V. Sciancalepore *et al.*, “Mobile traffic forecasting for maximizing 5G network slicing resource utilization,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, Atlanta, GA, USA, May 2017, pp. 1–9. G. Tseliou, K. Samdanis, F. Adelantado, X. Costa-Perez, and C. Verikoukis, “A capacity broker architecture and framework for multitenant support in LTE-A networks,” in *Proc. IEEE ICC*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016, pp. 1–6.
- [54] “Study on management and orchestration of network slicing for next generation network, rel.15,” 3GPP, Sophia Antipolis, France, Rep. 3GPP TR 28.801, May 2017.
- [55] “Framework of network virtualization for future networks,” Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, ITU-T Recommendation Y.3011, Jan. 2012.
- [56] A. Ksentini and N. Nikaein, “Toward enforcing network slicing on RAN: Flexibility and resources abstraction,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 6, pp. 102–108, Jun. 2017.
- [57] E. Pateromichelakis, K. Samdanis, Q. Wei, and P. Spapis, “Slicetailed joint path selection & scheduling in mm-Wave small cell dense networks,” in *Proc. IEEE Globecom*, Singapore, Dec. 2017, pp. 1–6.
- [58] P. C. Garces, X. Costa-Perez, K. Samdanis, and A. Banchs, “RMSC: A cell slicing controller for virtualized multi-tenant mobile networks,” in *Proc. IEEE VTC-Spring*, Glasgow, U.K., May 2015, pp. 1–6.
- [59] X. Foukas, N. Nikaein, M. M. Kassem, and K. Kontovasilis, “FlexRAN: A flexible and programmable platform for software-defined radio access networks,” in *Proc. ACM CoNEXT*, Irvine, CA, USA, Dec. 2016, pp. 427–441.
- [60] R. Shrivastava *et al.*, “An SDN-based framework for elastic resource sharing in integrated FDD/TDD LTE-A HetNets,” in *Proc. IEEE CloudNet*, Luxembourg City, Luxembourg, Oct. 2014, pp. 126–131.
- [61] *Next Generation RAN Architecture (Extensible Radio Access Network (xRAN))*. Accessed: May 30, 2017. [Online]. Available: <https://www.xran.org>
- [62] A. Checko, A. P. Avramova, M. S. Berger, and H. L. Christiansen, “Evaluating C-RAN fronthaul functional splits in terms of network level energy and cost savings,” *J. Commun. Netw.*, vol. 18, no. 2, pp. 162–172, Apr. 2016.
- [63] LTE Backhauling Deployment Scenarios, London, U.K., NGMN, White Paper, Jul. 2011.
- [64] A. De la Oliva *et al.*, “XHaul: Toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 5, pp. 32–40, Oct. 2015.
- [65] L. Xi *et al.*, “5G-crosshaul network slicing: Enabling multi-tenancy in mobile transport networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 128–137, Aug. 2017.

- [66] A. S. Thyagaturu, Y. Dashti, and M. Reisslein, “SDN-based smart gateways (Sm-GWs) for multi-operator small cell network management,” *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 13, no. 4, pp. 740–753, Dec. 2016.
- [67] T. Taleb *et al.*, “EASE: EPC as a service to ease mobile core network deployment over cloud,” *IEEE Netw. Mag.*, vol. 29, no. 2, pp. 78–88, Mar./Apr. 2015.
- [68] T. Taleb, “Toward carrier cloud: Potential, challenges, and solutions,” *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 21, no. 3, pp. 80–91, Jun. 2014.
- [69] *An Introduction to Network Slicing*, GSMA, London, U.K., 2017.
- [70] B. Naudts *et al.*, “Techno-economic analysis of software defined networking as architecture for the virtualization of a mobile network,” in *Proc. IEEE EWSDN*, Darmstadt, Germany, Oct. 2012, pp. 67–72.
- [71] “Network simulator 3 (ns3),” <https://www.nsnam.org/>, accessed: 2021.
- [72] C. Bektas, S. Bocker, F. Kurtz, and C. Wietfeld, “Reliable software defined ran network slicing for mission-critical 5g communication networks,” in 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2019, pp. 1–6.

Παράρτημα Α. Οδηγίες εγκατάστασης του Network Simulator 3 (NS3)

Αρχικά, για την εγκατάσταση των προαπαιτούμενων, στο command line μεταφερόμαστε στην τοποθεσία όπου έχουμε τοποθετήσει τα αρχεία εγκατάστασης του NS3, εκτελούμε τις παρακάτω εντολές:

- `sudo apt-get install gcc g++ python`
- `sudo apt-get install gcc g++ python python-dev`
- `sudo apt-get install mercurial`
- `sudo apt-get install bzip`
- `sudo apt-get install gdb valgrind`
- `sudo apt-get install gsl-bin libgsl0-dev libgsl0ldbl`
- `sudo apt-get install flex bison libfl-dev`
- `sudo apt-get install g++-3.4 gcc-3.4`
- `sudo apt-get install tcpdump`
- `sudo apt-get install sqlite sqlite3 libsqlite3-dev`
- `sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev`
- `sudo apt-get install libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev`
- `sudo apt-get install vtun lxc`
- `sudo apt-get install uncrustify`
- `sudo apt-get install doxygen graphviz imagemagick`
- `sudo apt-get install texlive texlive-extra-utils texlive-latex-extra`
- `sudo apt-get install python-sphinx dia`
- `sudo apt-get install python-pygraphviz python-kiwi python-pygoocanvas libgoocanvas-dev`
- `sudo apt-get install libboost-signals-dev libboost-filesystem-dev`
- `sudo apt-get install openmpi*`

Στη συνέχεια, για την εγκατάσταση του NS3, εκτελούμε τις παρακάτω εντολές:

- `sudo ./waf clean`
- `sudo ./waf -d optimized --enable-examples --enable-tests configure`
- `sudo ./waf`

Για να δοκιμάσουμε αν η εγκατάσταση έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία, εκτελούμε την εντολή `./test.py`. Αν το αποτέλεσμα αυτής της εντολής δεν παράξει κάποιο σφάλμα, τότε η εγκατάσταση έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία.


```

double offered_latencies_perRSUandSlice[n_rsu][service_slices_count] = {
    {9.98, 50, 100, 150, 300, 300},
    {10, 50, 100, 150, 300, 300},
    {10, 50, 100, 150, 300, 300},
    {10, 50, 100, 150, 300, 300}
};

double slices_q_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0, 0, 0};

// CVo, CVi, ANav, RG, BS, WB
double slices_throughput_requirements[service_slices_count] =
    {250, 8000, 1000, 150, 2500, 2000}; //kbps
double slices_delay_requirements[service_slices_count] =
    {100, 150, 5, 10, 300, 300}; //ms , according to 3gpp qos classes for 5g
double slices_jitter_requirements[service_slices_count] =
    {40, 40, 4, 9, 100, 200}; //ms
double slices_packetloss_requirements[service_slices_count] =
    {0.01, 0.001, 0.00001, 0.00001, 0.000001, 0.000001};
//ms , according to 3gpp qos classes for 5g

double min_req_throughput = 0;
double min_req_delay = 0;
double min_req_jitter = 0;
double min_req_packetloss = 0;
double max_req_throughput = 0;
double max_req_delay = 0;
double max_req_jitter = 0;
double max_req_packetloss = 0;

// CVo, CVi, ANav, RG, BS, WB
double slices_throughput_norm_requirements[service_slices_count] =
    {0, 0, 0, 0, 0, 0};
double slices_delay_norm_requirements[service_slices_count] =
    {0, 0, 0, 0, 0, 0};
double slices_jitter_norm_requirements[service_slices_count] =
    {0, 0, 0, 0, 0, 0};
double slices_packetloss_norm_requirements[service_slices_count] =
    {0, 0, 0, 0, 0, 0};

double ofanp_weights_for_services[service_slices_count][q_parameters_count] = {
    // th      d      j      pl
    {0.194701, 0.268433, 0.268433, 0.268433}, // CVo
    {0.1719942, 0.252854, 0.252854, 0.3223 }, // CVi
    {0.199673, 0.471965, 0.121544, 0.206818}, // ANav
    {0.200039, 0.454229, 0.145693, 0.200039}, // RG
    {0.537778, 0.139784, 0.134156, 0.188282}, // BS
    {0.428128, 0.145346, 0.145346, 0.281179} // WB
};

```

```
void calculate_req_Q(){
    /****CALCULATE REQUIRED Q - start***/
    min_req_throughput = slices_throughput_requirements[0];
    min_req_delay      = slices_delay_requirements[0];
    min_req_jitter     = slices_jitter_requirements[0];
    min_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[0];
    max_req_throughput = slices_throughput_requirements[0];
    max_req_delay      = slices_delay_requirements[0];
    max_req_jitter     = slices_jitter_requirements[0];
    max_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[0];

    for(int i=1; i<service_slices_count; i++){
        if(min_req_throughput > slices_throughput_requirements[i]){
            min_req_throughput = slices_throughput_requirements[i];
        }

        if(min_req_delay > slices_delay_requirements[i]){
            min_req_delay = slices_delay_requirements[i];
        }

        if(min_req_jitter > slices_jitter_requirements[i]){
            min_req_jitter = slices_jitter_requirements[i];
        }

        if(min_req_packetloss > slices_packetloss_requirements[i]){
            min_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[i];
        }

        if(max_req_throughput < slices_throughput_requirements[i]){
            max_req_throughput = slices_throughput_requirements[i];
        }

        if(max_req_delay < slices_delay_requirements[i]){
            max_req_delay = slices_delay_requirements[i];
        }

        if(max_req_jitter < slices_jitter_requirements[i]){
            max_req_jitter = slices_jitter_requirements[i];
        }

        if(max_req_packetloss < slices_packetloss_requirements[i]){
            max_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[i];
        }
    }
}
```

```

for(int i=1; i<service_slices_count; i++){
slices_throughput_norm_requirements[i] =
(slices_throughput_requirements[i] - min_req_throughput) /
(max_req_throughput - min_req_throughput);
slices_delay_norm_requirements[i] =
(slices_delay_requirements[i] - min_req_delay) /
(max_req_delay - min_req_delay);
slices_jitter_norm_requirements[i] =
(slices_jitter_requirements[i] - min_req_jitter) /
(max_req_jitter - min_req_jitter);
slices_packetloss_norm_requirements[i] =
(slices_packetloss_requirements[i] - min_req_packetloss) /
(max_req_packetloss - min_req_packetloss);
}

for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
slices_q_requirements[i] = (ofanp_weights_for_services[i][0] *
slices_throughput_norm_requirements[i]) +
(ofanp_weights_for_services[i][1] * (1 -
slices_delay_norm_requirements[i])) +
(ofanp_weights_for_services[i][2] * (1 -
slices_jitter_norm_requirements[i])) +
(ofanp_weights_for_services[i][3] * (1 -
slices_packetloss_norm_requirements[i]));

/** ** *CALCULATE REQUIRED Q - end** ** */

for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
std::cout << "Q_req["<<i<<"]": " << slices_q_requirements[i] << std::endl;
}
}

double calculate_service_achievable_Q(int k, int i){

double freeRBs=0;

for(int j=0; j<RBs_perTTI; j++){
if(RBs_perRSU[k][j]==0){
freeRBs++;
}
}

double achievable_throughput =
freeRBs*1000; //1 Mbps per RB according to LTE specification (best case)

double norm_achievable_throughput = (achievable_throughput -
min_req_throughput) / (max_req_throughput - min_req_throughput);

```

```

    if(norm_achievable_throughput>1){
        norm_achievable_throughput=1;
    }else if(norm_achievable_throughput<0){
        norm_achievable_throughput=0.01;
    }

    double norm_achievable_delay = 1/norm_achievable_throughput;
    double norm_achievable_jitter = slices_jitter_norm_requirements[i];
    double norm_achievable_packetloss =
        slices_throughput_norm_requirements[i]-norm_achievable_throughput;

    if(norm_achievable_packetloss>1){
        norm_achievable_packetloss=1;
    }else if(norm_achievable_packetloss<0){
        norm_achievable_packetloss=0;
    }

    double slice_achievable_q =
        (ofanp_weights_for_services[i][0] * norm_achievable_throughput) +
        (ofanp_weights_for_services[i][1] * (1-norm_achievable_delay)) +
        (ofanp_weights_for_services[i][2] * (1-norm_achievable_jitter)) +
        (ofanp_weights_for_services[i][3] * (1-norm_achievable_packetloss));
    return slice_achievable_q;
}

static void slicing ()
{
    std::cout << "Slicing Run" << std::endl;

    for(int i=0; i<service_slices_count; i++){

        double Q_req = slices_q_requirements[i];

        for(int k=0; k<1 ; k++){ // 1: n_rsu

            int no_other_RBQ_required = 0;
            int RBs_assigned_to_service_slice = 0;

            //find the RBs that must be assigned
            double achievable_Q_service = calculate_service_achievable_Q(k, i);
            while(achievable_Q_service >= Q_req &&
                no_other_RBQ_required == 0){
                //local RBs can satisfy q requirements
                std::cout<<"a1: achievable_Q_service: "
                    <<achievable_Q_service<<" , Q_req: "
                    <<Q_req<<std::endl;
            }
        }
    }
}

```

```

//decreasing free local RBs RBrsu(k)
int RBfound=0;
int tmp=RBs_assigned_perRSUperm[k];
for(int j=tmp; j<RBs_perTTI; j++){
    //assign the next free local RB
    if(RBs_perRSU[k][j]==0 && RBfound==0){
        RBs_perRSU[k][j]=1;
        RBfound=1;
        RBs_assigned_to_service_slice++;
        RBs_assigned_perRSU[k]++;
    }
}
achievable_Q_service = calculate_service_achievable_Q(k, i);
std::cout<<"a2: achievable_Q_service: "
    <<achievable_Q_service<<" , Q_req: "
    <<Q_req<<std::endl;

if(RBs_assigned_to_service_slice >=
    (slices_throughput_requirements[i]/1000)){
    no_other_RBQ_required = 1;
}
}
no_other_RBQ_required = 0;
while(achievable_Q_service < Q_req &&
    no_other_RBQ_required == 0){
    //local RBs cannot satisfy q requirements
    int found=0;
    for(int g=1; g<n_rsu; g++){ //for(int g=1 or 0; g<n_rsu; g++){
        if((((double)RBs_assigned_perRSU[g]+1)/
            (double)RBs_perTTI) < A[g][0] ) && found==0 ){
            found = 1;
            if(k != g){
                std::cout<<"b1: achievable_Q_service: "
                    <<achievable_Q_service<<" , Q_req: "
                    <<Q_req<<std::endl;

                //update RBrsu(k')
                int RBfound=0;
                int tmp=RBs_assigned_perRSUperm[g];
                for(int j=tmp; j<RBs_perTTI; j++){
                    //assign the next free local RB
                    if(RBs_perRSU[g][j]==0 &&
                        RBfound==0){
                        RBs_perRSU[g][j]=1;
                        RBfound=1;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        RBs_assigned_to_service_slice++;
        RBs_assigned_perRSU[g]++;
    }
}

//increasing free local RBs RBrSU(k)
RBfound=0;
int tmp2=RBs_assigned_perRSUperm[k];
for(int j=(RBs_perTTI-1); j>=tmp2; j--){ //assign the next free local RB
    if(RBs_perRSU[k][j]==1 && RBfound==0){
        RBs_perRSU[k][j]=0;
        RBfound=1;
        RBs_assigned_to_service_slice--;
        RBs_assigned_perRSU[k]--;
    }
}
achievable_Q_service = calculate_service_achievable_Q_extended(k, g, i);
std::cout<<"b2: achievable_Q_service: "<<achievable_Q_service<<" , Q_req: "
    <<Q_req<<std::endl;
}
}
}

if(RBs_assigned_to_service_slice >= (slices_throughput_requirements[i]/1000)){
    no_other_RBQ_required = 1;
}

if(found==0 && no_other_RBQ_required == 0){
    //assign local RBs RBrSU(k) if remote RBs are not available
    int tmp=RBs_assigned_perRSUperm[k];
    for(int j=tmp; j<RBs_perTTI; j++){ //assign the next free local RB
        if( RBs_perRSU[k][j]==0 && (RBs_assigned_to_service_slice <
            (slices_throughput_requirements[i]/1000)) ){
            RBs_perRSU[k][j]=1;
            RBs_assigned_to_service_slice++;
            RBs_assigned_perRSU[k]++;
        }
    }

    achievable_Q_service = calculate_service_achievable_Q(k, i);
    std::cout<<"c: achievable_Q_service: "<<achievable_Q_service<<std::endl;
}
}
}
}

```

```
for(int g=0; g<n_rsu; g++){
    for(int j=0; j<RBs_perTTI; j++){
        std::cout<<"RBs_perRSU["<<g<<"]["<<j<<"]: "
            <<RBs_perRSU[g][j]<<std::endl;
    }
}

for(int k=0; k<n_rsu; k++){
    RBs_assigned_perRSUperm[k] = RBs_assigned_perRSU[k];
}
std::cout<<"-----"<<std::endl;
}
}

int main (int argc, char *argv[])
{
    calculate_req_Q();
    slicing();
    double simTime = 86400.0;
    Simulator::Schedule (Seconds (simTime-0.4), &slicing);

    Simulator::Stop(Seconds(simTime));
    Simulator::Run();
    Simulator::Destroy();
    return 0;
}
```