

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



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΠΑΤΡΩΝ**  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Τεχνοοικονομική Μελέτη των Ultra-Dense Deployments σε Κινητά**  
**Δίκτυα 5G.**

**Συγγραφέας:**

Νταρζάνος Παναγιώτης, ΑΜ: 5039

**Υπεύθυνος Καθηγητής:**

Χρήστος Ι. Μπούρας, Καθηγητής

**Επιβλέπων:**

Δρ. Ανδρέας Παπαζώης

ΠΑΤΡΑ, Μάρτιος 2016



## Πρόλογος

Αρχικά νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα, για την επίβλεψη της εργασίας, την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου στην ανάθεσή της, και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον ερευνητικό αντικείμενο όπως αυτό των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Ακόμα θα ήθελα να απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Ανδρέα Παπαζώη γιατί η βοήθειά του, η υπομονή του και η διάθεσή του να με υποστηρίξει υπήρξε καταλυτική στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου, διότι χωρίς την ψυχική και υλική βοήθειά τους, αλλά και την αμέριστη συμπαράστασή τους όποτε τη χρειαζόμουν, δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Πάτρα, Μάρτιος 2016  
Παναγιώτης Νταρζάνος



## Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, παρουσιάζουμε μια τεχνοοικονομική μελέτη που αφορά την ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής στο σχεδιασμό των 5G δικτύων, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν τεθεί από τον οργανισμό ETSI. Τα δίκτυα 5G, θα πρέπει να εξασφαλίζουν τη διαρκή συνδεσιμότητα των χρηστών, παρέχοντας παράλληλα το απαιτούμενο QoS (Quality of Service) και θα κάνουν πραγματικότητα το λεγόμενο IoT (Internet of Things).

Το 5G θα σχεδιαστεί με γνώμονα την ευελιξία και επεκτασιμότητα. Για αυτό το λόγο, οι πάροχοι υπηρεσιών στρέφονται στην ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το Software Defined Networking (SDN), το Network Function Virtualization (NFV) και το Cloud Computing.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής, κάνουμε μια ερευνητική ανασκόπηση των παραπάνω τεχνολογιών, ενώ εντοπίζουμε και παραθέτουμε τα πλεονεκτήματα που θα αποφέρει η υιοθέτηση τους στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, τόσο σε τεχνολογικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Στη συνέχεια, προτείνουμε μια αρχιτεκτονική η οποία ενσωματώνει όλες τις παραπάνω τεχνολογίες και περιγράφουμε αναλυτικά την αρχιτεκτονική του Radio Access Network αλλά και του δικτύου κορμού (vEPC).

Η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών στα δίκτυα 5G, θα συμβάλλει στην αυτοματοποίηση του δικτύου και θεωρείται ότι θα οδηγήσει σε μείωση του Total Cost of Ownership (TCO) για τους παρόχους. Για το λόγο αυτό, παραθέτουμε ένα οικονομικό μοντέλο για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους OPEX, του κεφαλαιακού κόστους CAPEX και του Total Cost of Ownership (TCO) για το δίκτυο που υλοποιήσαμε πιο πάνω.

Τέλος, προκειμένου να ποσοτικοποιήσουμε τις θεωρητικές προβλέψεις που υπόσχονται μείωση του TCO λόγω της υιοθέτησης των παραπάνω τεχνολογιών, πραγματοποιούμε μια σειρά πειραμάτων τα οποία βασίζονται σε διαφορετικές υποθέσεις εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, με βάση το οικονομικό μοντέλο που υλοποιήσαμε, υπολογίζουμε τα προαναφερθέντα οικονομικά μεγέθη για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική αλλά και για μία παραδοσιακή αρχιτεκτονική και πραγματοποιούμε τη μεταξύ τους σύγκριση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα, επιβεβαιώνουν τις θεωρητικές προβλέψεις για μείωση του συνολικού κόστους του δικτύου από την ενσωμάτωση των παραπάνω τεχνολογιών, πετυχαίνοντας μάλιστα σημαντική μείωση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX, του λειτουργικού κόστους OPEX και του Total Cost of Ownership (TCO).



## *Executive Summary*

This thesis presents a techno-economic analysis, regarding the integration of new technologies in the 5G architecture, in order to fulfil the requirements provided by the ETSI organization. 5G networks must ensure ubiquitous connectivity and Quality of Service, realizing the “Internet of Things”.

Flexibility is another key requirement of 5G network architecture. In order for it to be achieved, “softwarization” of 5G networks will be imperative and will become a reality through the adoption of new technologies, such as Software Defined Networking (SDN), Network Function Virtualization (NFV) and Cloud Computing.

This thesis presents an overview of these technologies and a thorough analysis of their main advantages and disadvantages, with regard to technical characteristics and economic viability. Furthermore, we propose an architecture which integrates all the above-mentioned technologies and we analyze the different modes/ways of implementation of the Radio Access Network (RAN) and the Core Network (vEPC).

The integration of these technologies will accomplish the automation of network processes, leading to the reduction of Total Cost of Ownership (TCO). Towards this, we provide a techno-economic model in order to estimate the capital expenditure (CAPEX), the operational expenditure (OPEX) and the Total Cost of Ownership (TCO) for the proposed architecture.

Finally, in order to verify the predictions for TCO reduction due to the integration of the above-mentioned technologies, we carry out a series of experiments based on different use-case scenarios. Specifically, we use the proposed techno-economic model, in order to estimate the above-mentioned network costs for the proposed network architecture and then, we compare the costs with those of a traditional network architecture respectively.

The experimental results, verify and sometimes they even surpass the predictions for network cost reduction, due to the integration of those state of the art technologies in next-generation architectures. We conclude that adopting the proposed network architecture, we can achieve significant reduction in capital expenditure (CAPEX), operational expenditure (OPEX) and Total Cost of Ownership (TCO).



# Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	1
Περίληψη	3
Executive Summary	5
Πίνακας Περιεχομένων	7
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων	13
Ακρωνύμια	15
1. Εισαγωγή	17
2. Ερευνητική και Τεχνολογική Ανασκόπηση	19
2.1 Δίκτυα LTE	19
2.1.1 Femtocells και Δίκτυα LTE	21
2.2 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα 5ης Γενιάς	24
2.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Νέες Τεχνολογίες	27
2.2.2 Ultra Dense Deployments	31
2.3 Network Function Virtualization	34
2.3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Κατευθυντήριες Γραμμές	35
2.3.2 Αρχιτεκτονική και Business Model	37
2.3.3 Προσδοκώμενα Οφέλη	41
2.4 Software Defined Networking	42
2.4.1 Στόχοι και Γενικά Χαρακτηριστικά	44
2.4.2 Αρχιτεκτονική SDN δικτύου	47
2.4.3 Προσδοκώμενα Οφέλη	49
2.5 Cloud Computing	50
2.5.1 Cloud-RAN: Radio Access μέσω Cloud	52
2.5.2 Αρχιτεκτονική του Cloud-RAN	52
2.5.3 Προσδοκώμενα Οφέλη	54
2.6 Τεχνοοικονομικές Μελέτες και Επιχειρηματικά Μοντέλα	57
2.6.1 Βασικές Οικονομικές Έννοιες	57

2.6.2 Τεχνοοικονομικές Μελέτες που αφορούν τα Small Cells	60
2.6.3 Τεχνοοικονομικές Μελέτες που αφορούν το Cloud Computing	68
3. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική	73
3.1 Παρουσίαση του SoftAir	76
3.2 Data Plane	78
3.2.1 Radio Access Network	78
3.2.2 Core Network (EPC)	82
3.3 Control Plane	88
3.4 Προσδοκώμενα Οφέλη	90
4.Τεχνοοικονομική Ανάλυση	93
4.1 Οικονομικό Μοντέλο για το Radio Access Network	93
4.1.1 Υπολογισμός CAPEX	94
4.1.2 Υπολογισμός OPEX	96
4.2 Οικονομικό Μοντέλο για το Core Network	99
4.2.1 Υπολογισμός CAPEX	99
4.2.2 Υπολογισμός OPEX	100
4.3 Total Cost of Ownership (TCO)	103
5. Θεωρητική Αξιολόγηση	105
6. Πειραματική Αξιολόγηση	111
6.1 Περιβάλλον Αξιολόγησης	111
6.2 Περιγραφή Πειραμάτων	113
6.2.1 1 <sup>ο</sup> Πείραμα: Ανάλυση Κόστους για Μεταβαλλόμενο Αριθμό Virtual Slices (VBSs)	114
6.2.2 2 <sup>ο</sup> Πείραμα: Ανάλυση Κόστους για Μεταβαλλόμενη Τιμή Κιλοβατώρας	126
6.2.3 3 <sup>ο</sup> Πείραμα: Ανάλυση Κόστους για Μεταβαλλόμενο Αριθμό Σταθμών Βάσης	120
7. Συμπεράσματα	125
8. Μελλοντική Έρευνα	127
Βιβλιογραφία	129

# Κατάλογος Σχημάτων

2.1-Σχήμα 1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LTE και πως ικανοποιήθηκαν στις επερχόμενες εκδόσεις [2].	19
2.1- Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική ενός ετερογενούς δικτύου αποτελούμενο από Macrocells και Small Cells [41].	21
2.1.1-Σχήμα 3: Αντιπαραβολή των Αρχιτεκτονικών Macrocell-Picocell [7].	22
2.2-Σχήμα 4: Τα τρία «κύματα» των μελλοντικά συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο 5G [9].	25
2.2.1-Σχήμα 5: Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps [11].	27
2.2.1-Σχήμα 6: Σύγκριση του latency μεταξύ του δικτύου 4G και της πρόβλεψης για το 5G [24].	28
2.2.1-Σχήμα 7: Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη [24].	29
2.2.1-Σχήμα 8: Radar Chart των θεωρητικών δυνατοτήτων του 5G [10].	31
2.2.2-Σχήμα 9: Επέκταση της κάλυψης ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification [18].	33
2.3.1-Σχήμα 10: Control και Data Plane χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας SDN [64].	36
2.3.1-Σχήμα 11: Λογικά Στρώματα σε μια SDN Αρχιτεκτονική [59].	38
2.3.2-Σχήμα 12: Η αρχιτεκτονική του SDN όπως έχει οριστεί από τον οργανισμό ONF [62].	39
2.4.1-Σχήμα 13: Παραδείγματα Network Functions Virtualization [57].	41
2.4.2-Σχήμα 14: Μοντέλο Υπηρεσιών Cloud Computing και αντιστοίχισή τους στην Αρχιτεκτονική του NFV [59].	44
2.4.2-Σχήμα 15: Ένα Network Virtualization Περιβάλλον [26].	46
2.4.2-Σχήμα 16: Η αρχιτεκτονική ενός NFV περιβάλλοντος εργασίας [58].	48
2.5-Σχήμα 17: Τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του Cloud Computing [42].	51
2.5.2-Σχήμα 18: Μια Cloud-Based Αρχιτεκτονική για το δίκτυο 5G [12].	53
2.5.2-Σχήμα 19: Cloud-RAN αρχιτεκτονική με κεντρική επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης και RRHs [35].	54
2.5.3-Σχήμα 20: Σύγκριση μεταξύ της παραδοσιακής σχεδίασης των cellular δικτύων και με κεντροποιημένη επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης [50].	55

2.6.1-Σχήμα 21: Οι κατηγορίες λειτουργικού κόστους (OPEX) για έναν πάροχο υπηρεσιών [68].	59
2.6.2-Σχήμα 22: Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Femtocells [37].	61
2.6.2-Σχήμα 23: Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Macrocells [37].	62
2.6.2-Σχήμα 24: Κατανάλωση ενέργειας για κάθε είδος σταθμού βάσης [81].	63
2.6.2-Σχήμα 25: Σύγκριση κόστους εγκατάστασης των Small Cells και το κέρδος που έχουμε σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells [82].	65
2.6.2-Σχήμα 26: Απεικόνιση του σεναρίου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση [83].	66
2.6.2-Σχήμα 27: Μελέτη απόδοσης του κόστους και της ενέργειας για τις διαφορετικές στρατηγικές εγκατάστασης [83].	67
2.6.3-Σχήμα 28: Pie Chart του μηνιαίου λειτουργικού κόστους ενός Data Center [84].	70
2.6.3-Σχήμα 29: Κεντροποιημένη Cloud-RAN αρχιτεκτονική [85].	71
3-Σχήμα 30: Network Virtualization του SoftAir [78].	75
3-Σχήμα 31: Hardware Δικτυακές συσκευές και η υλοποίησή τους σε Virtual Machines [79].	76
3.1-Σχήμα 32: Συνολική αρχιτεκτονική του SoftAir [78].	77
3.2.1-Σχήμα 33: Απεικόνιση του Network Hypervisor [78].	80
3.2.1-Σχήμα 34: Function Virtualization στο SoftAir [78].	81
3.2.2-Σχήμα 35: Απεικόνιση Virtual Network Functions [87].	84
3.2.2-Σχήμα 36: Δυναμικός διαμοιρασμός των διαθέσιμων πόρων ανάμεσα σε CP και DP, ανάλογα με την προσφερόμενη υπηρεσία [87].	85
3.2.2-Σχήμα 37: Γενικά Χαρακτηριστικά του vEPC της NEC [87].	86
3.2.2-Σχήμα 38: Διαχείριση των Virtual Machines του vEPC της NEC [87].	87
3.2.2-Σχήμα 39: Η τεχνολογία Virtualization της Intel (Intel VT) [87].	88
3.3-Σχήμα 40: Απεικόνιση του traffic classifier του SoftAir [64].	89
3.4- Σχήμα 41: Σχέση μεταξύ των τεχνολογιών SDN, NFV και Cloud Computing [59].	92
5.-Σχήμα 42: Εκτιμήσεις ποσοστών μείωσης του OPEX [68].	106
5.-Σχήμα 43: Ποιοτική Εκτίμηση μείωσης κάθε κατηγορίας CAPEX όταν χρησιμοποιείται το SDN [51].	107

5.-Σχήμα 44: Ποιοτική Εκτίμηση μείωσης του TCO σε βάθος πενταετίας [48].	108
5.-Σχήμα 45: Ποιοτική Εκτίμηση μείωσης κάθε κατηγορίας OPEX σε βάθος πενταετίας [48].	108
6.- Σχήμα 46: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης ανάλογα με τον αριθμό εικονικών σταθμών βάσης που υλοποιούμε σέ ένα φυσικό σταθμό βάσης.	116
6.-Σχήμα 47 Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για ένα παραδοσιακό δίκτυο ανάλογα με την τιμή κόστους της κιλοβατώρας.	118
6.-Σχήμα 48: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ανάλογα με την τιμή κόστους της κιλοβατώρας.	119
6.-Σχήμα 49: Σύγκριση του λειτουργικού κόστους OPEX για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση.	120
6.- Σχήμα 50: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για το παραδοσιακό δίκτυο ανάλογα με τον αριθμό σταθμών βάσης.	122
6.-Σχήμα 51: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ανάλογα με τον αριθμό των σταθμών βάσης.	122
6.- Σχήμα 52: Σύγκριση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση.	123
6.- Σχήμα 53: Σύγκριση του λειτουργικού κόστους OPEX για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση.	124
6.- Σχήμα 54: Σύγκριση του Total Cost of Ownership για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση.	125



## Κατάλογος Πινάκων

4.1- Πίνακας 1: Μέρη του σταθμού βάσης και ενεργειακή κατανάλωση.	97
4.2- Πίνακας 2: Πόροι XEON Blade Server.	101
4.2- Πίνακας 3: Διαθέσιμοι πόροι για κάθε VM που φιλοξενείται στον XEON Blade Server.	101
6.- Πίνακας 4: Τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό του CAPEX και του OPEX για την εγκατάσταση του Radio Access Network (RAN).	111
6.- Πίνακας 5: Τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό του CAPEX και του OPEX για την εγκατάσταση του Virtual Core Network (vEPC).	112
6.- Πίνακας 6: Μέση Τιμή των μεταβλητών κατά την εκτέλεση του πειράματος 1.	114
6.- Πίνακας 7: Μέση Τιμή των μεταβλητών κατά την εκτέλεση του πειράματος 2.	120



## Ακρωνύμια

**ICT:** Information and Communication Technology

**SD-BS:** Software-Defined Base Station

**API:** Application Programming Interface

**BSS:** Business Support System

**OSS:** Operating Support System

**M2M:** Machine to Machine

**NO:** Network Operator

**VNO:** Virtual Network Operator

**VNF:** Virtual Network Function

**SP:** Service Provider

**InP:** Infrastructure Provider

**UDN:** Ultra Dense Networks

**OVS:** Open Virtual Switch

**RAN:** Radio Access Network

**vEPC:** Virtual Evolved Packet Core

**SDN:** Software Defined Networking

**NFV:** Network Function Virtualization

**CAPEX:** Capital Expenditure

**EPC:** Evolved Packet Core

**OPEX:** Operational Expenditure

**LTE:** Long Term Evolution

**QOS:** Quality of Service

**TCO:** Total Cost of Ownership

**CoMP:** Cooperative Multi-Point

**4G:** Τέταρτη γενιά (Fourth generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας

**5G:** Πέμπτη γενιά (Fifth Generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας

**BS:** Base Station

**VM:** Virtual Machine

**SME:** Small and Medium Enterprises

# 1.Εισαγωγή

Παρά την πρόοδο που πραγματοποιήθηκε στο σχεδιασμό και στην εξέλιξη των cellular δικτύων 4ης γενιάς, οι νέες απαιτήσεις που προκύπτουν από τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό των έξυπνων συσκευών κάνουν επιτακτική την υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G). Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς προσφέρουν μεγάλη προοπτική τόσο για τους πελάτες όσο και για τη βιομηχανία. Πέρα από το γεγονός ότι το 5G θα είναι αρκετά γρηγορότερο από τις υπάρχουσες τεχνολογίες, υποστηρίζεται ότι θα προσφέρει applications με σημαντικά κοινωνικά και οικονομικά οφέλη, οδηγώντας έτσι σε μια συνεχώς συνδεδεμένη κοινωνία στην οποία η ασύρματη σύνδεση θα παίζει σημαντικό ρόλο στις ζωές των ανθρώπων. Στην κατεύθυνση αυτή, η στρατηγική φύση του τομέα των επικοινωνιών επεκτείνεται πέρα από την παραδοσιακή βιομηχανική του περιοχή, αφού τα όρια με τον IT τομέα τείνουν να θολώσουν.

Η εκρηκτική αύξηση της διακίνησης δεδομένων δημιούργησε νέες απαιτήσεις για το δίκτυο και οι πάροχοι υπηρεσιών στράφηκαν στην απόκτηση εξοπλισμού που θα βρίσκει τη χρυσή τομή ανάμεσα στο QoS και τη μείωση του κόστους. Στα δίκτυα 5ης γενιάς, ένας μεγάλος αριθμός συσκευών και δικτύων θα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και ο ρυθμός διακίνησης δεδομένων θα αυξάνεται συνεχώς. Κάθε συσκευή θα απολαμβάνει αδιάκοπη συνδεσιμότητα στο δίκτυο ανεξαρτήτως της περιοχής που θα βρίσκεται, ενώ παράλληλα ανοίγει ο δρόμος για την διασύνδεση όλων των συνδεδεμένων στο δίκτυο συσκευών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Τα δίκτυα 5ης γενιάς, θα φέρουν την επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε, υποστηρίζοντας νέες πρωτοπόρες εφαρμογές οι οποίες απαιτούν πολύ μικρό latency και μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης. Η τεχνολογία 5G, θα συναθροίζει τους δικτυακούς, τους υπολογιστικούς και τους αποθηκευτικούς πόρους, σε μια προγραμματιζόμενη και ενοποιημένη υποδομή. Αυτή η υποδομή που περιγράφουμε, μας δίνει τη δυνατότητα για βέλτιστη και δυναμική χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων που βρίσκονται διασκορπισμένοι στο δίκτυο. Η ετερογένεια θα είναι ένα βασικό γνώρισμα των 5G δικτύων, αφού απαιτείται η χρήση cells διαφορετικού μεγέθους και ο συντονισμός σημείων πρόσβασης με διαφορετικά χαρακτηριστικά, τα οποία θα χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης. Ακόμη, η εισαγωγή νοημοσύνης στα δίκτυα 5ης γενιάς θα προσφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση, εξασφαλίζοντας παράλληλα την καλύτερη δυνατή εμπειρία χρήστη. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις που έχουν τεθεί για το 5G, απαιτείται η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, οι οποίες θα στοχεύουν στην αποσύνδεση του software με το hardware και στην κεντρική διαχείριση του δικτύου, έχοντας παράλληλα ως στόχο τη μείωση του απαιτούμενου κόστους.

Έτσι λοιπόν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, θα παρουσιάσουμε τις τεχνολογίες που θεωρείται ότι θα παίξουν σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, θα αναλύσουμε την αρχιτεκτονική τους και τα πλεονεκτήματά τους και στο τέλος θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια εκτίμηση του TCO για την δημιουργία ενός δικτύου 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Στο επόμενο Κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια ερευνητική και τεχνολογική ανασκόπηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, των προτεινόμενων τεχνολογιών και κάποιων τεχνοοικονομικών μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για τις προτεινόμενες τεχνολογίες. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται βασικές ερευνητικές εργασίες που σχετίζονται με τεχνολογίες όπως οι Ultra Dense Deployments, το Software Defined Networking, το Network Function Virtualization και το Cloud Computing. Πιο συγκεκριμένα, παραθέτουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά, την αρχιτεκτονική και τα προσδοκώμενα οφέλη από την ενσωμάτωση κάθε τεχνολογίας στην αρχιτεκτονική του δικτύου, καθώς και μια σειρά από τεχνοοικονομικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί και συνηγορούν στην υιοθέτηση των παραπάνω τεχνολογιών.

Στο τρίτο Κεφάλαιο, παραθέτουμε τη δομή της αρχιτεκτονικής που προτείνουμε για ένα 5G δίκτυο, η οποία περιέχει όλες τις παραπάνω τεχνολογίες. Για την καλύτερη κατανόηση, αναλύουμε ξεχωριστά κάθε τμήμα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής του δικτύου (RAN, vEPC, Control Plane) και συγκεντρώνουμε όλα τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μέσω της ενσωμάτωσης των παραπάνω τεχνολογιών.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο, παραθέτουμε το οικονομικό μοντέλο βάση του οποίου υπολογίζουμε το κεφαλαιακό κόστος CAPEX, το λειτουργικό κόστος OPEX και το Total Cost of Ownership (TCO) για την υλοποίηση ενός εικονικού δικτύου.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο πραγματοποιούμε μια θεωρητική αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Πιο συγκεκριμένα, παραθέτουμε κάποιες τεχνοοικονομικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το SDN και τη χρήση virtualized Core Network και οι οποίες πραγματοποιούν εκτιμήσεις για τη μείωση του κεφαλαιακού και του λειτουργικού κόστους.

Στο έκτο Κεφάλαιο, πραγματοποιούμε μια σειρά πειραμάτων για διάφορα σενάρια υλοποίησης και με βάση το οικονομικό μοντέλο που παραθέσαμε στο Κεφάλαιο 4, συγκρίνουμε τα προαναφερθέντα οικονομικά μεγέθη που προκύπτουν για μια παραδοσιακή αρχιτεκτονική, σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

Στο έβδομο Κεφάλαιο σημειώνονται τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τη διενέργεια των πειραμάτων του έκτου Κεφαλαίου. Τέλος, στο όγδοο Κεφάλαιο σημειώνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στην κατεύθυνση υλοποίησης των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, καθώς και των κινητών τηλεπικοινωνιών γενικότερα.

## 2.Ερευνητική και Τεχνολογική Ανασκόπηση

### 2.1.Δίκτυα LTE

Η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και καλύτερο QoS στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών 4<sup>ης</sup> γενιάς, είχε ως απαραίτητη προϋπόθεση την εφαρμογή μιας νέας και πιο ευέλικτης τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης. Η τεχνολογία αυτή ονομάστηκε LTE και πραγματοποιήθηκε από το 3GPP (Third Generation Partnership Project) [1]. Η πρώτη επίσημη εμπορική έκδοση του LTE ήταν διαθέσιμη το 2008 και ήταν η έκδοση 8, η οποία πρόσφερε ταχύτητες μέχρι 300 Mb/s για downlink και 75 Mb/s για uplink. Κάποιες από τις βασικές τεχνολογίες του LTE Release 8, ήταν η χρήση του OFDM, μιας τεχνικής βάση της οποίας διαιρούμε το εύρος της μπάντας συχνοτήτων σε N επικαλυπτόμενα κανάλια, κερδίζοντας έτσι σε εξοικονόμηση του εύρους ζώνης σε σχέση με τα συστήματα μονής φέρουσας. Η ελαστικότητα στη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LTE και μία από τις βασικές ανάγκες που μας οδήγησε στη δημιουργία του [2].

Ωστόσο, η παραπάνω έκδοση παρά τα οφέλη που προσέφερε και παρά το γεγονός ότι άνοιξε το δρόμο για μεγάλες αλλαγές στην περιοχή της ραδιοπρόσβασης, δεν κατάφερε να ικανοποιήσει τους αρχικούς στόχους σε ταχύτητα μετάδοσης, σε χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και σε latency που είχε θέσει η ITU στο IMT-Advanced, όπως παρατηρούμε και πιο κάτω στο Σχήμα 1.

	IMT-Advanced requirement	LTE Release 8	LTE Release 10
Transmission bandwidth	At least 40 MHz	Up to 20 MHz	Up to 100 MHz
Peak spectral efficiency – Downlink – Uplink	15 b/s/Hz 6.75 b/s/Hz	16 b/s/Hz 4 b/s/Hz	16.0 [30.0]* b/s/Hz 8.1 [16.1]** b/s/Hz
Latency – Control plane – User plane	Less than 100 ms Less than 10 ms	50 ms 4.9 ms	50 ms 4.9 ms

\*Value is for a 4 × 4 antenna configuration. Value in brackets for 8 × 8.

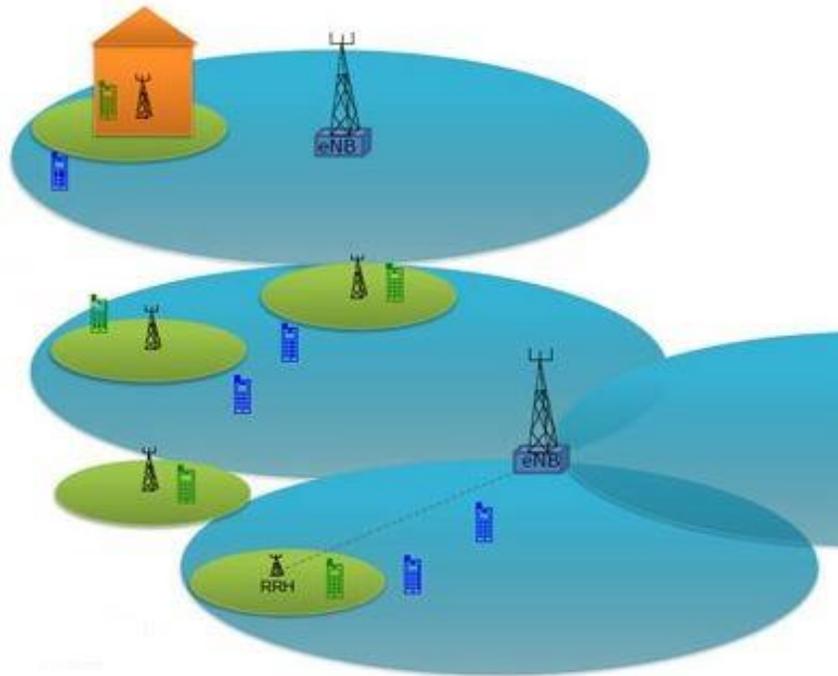
\*\* Values is for a 2 × 2 antenna configuration. Value in brackets for 4 × 4.

#### **Σχήμα 1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LTE και πως ικανοποιήθηκαν στις επερχόμενες εκδόσεις [2].**

Αφού ακολούθησε άλλη μια μεταβατικού τύπου έκδοση του LTE -Release 9, 2009-, φτάνουμε το 2010 στην τελική έκδοση του LTE με την Release 10 ή όπως είναι ευρέως γνωστή LTE-Advanced. Η έκδοση αυτή, ενισχύει σημαντικά την υφιστάμενη

LTE Release 8 και υποστηρίζει πολύ υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη κάλυψη και μικρότερο latency, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη εμπειρία χρήστη [3]. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, το LTE-Advanced κατάφερε όχι μόνο να φτάσει τις επιθυμητές τεχνικές απαιτήσεις αλλά κατάφερε και να τις ξεπεράσει. Αυτό οφείλεται κυρίως στις νέες τεχνολογίες που εισήχθησαν στην έκδοση αυτή προκειμένου να γίνει καλύτερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Οι κυριότερες εξ' αυτών ήταν οι α) carrier-aggregation β) relaying γ) ενισχυμένη μετάδοση πολλαπλών κεραιών δ) υποστήριξη ετερογενών παρατάξεων [4].

- Η τεχνολογία carrier-aggregation, διευρύνει το εύρος φάσματος συνδυάζοντας πολλαπλούς φορείς (φάσματα) για μετάδοση από ένα τερματικό. Το LTE-Advanced υποστηρίζει το συνδυασμό μέχρι και 5 φορέων φτάνοντας το μέγιστο φάσμα που μπορεί να παραχωρηθεί σε ένα χρήστη στα 100 Mhz, αυξάνοντας έτσι το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Το σημείο κλειδί σε αυτή την τεχνολογία η οποία ωφελεί στην καλύτερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, είναι το γεγονός ότι οι φορείς που συνδυάζονται δεν απαιτείται να είναι διαδοχικοί στο πεδίο της συχνότητας. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται η εκμετάλλευση απομονωμένου φάσματος ενώ παράλληλα αποτρέπεται ο κατακερματισμός του διαθέσιμου φάσματος και οι πάροχοι απαλλάσσονται από την κοστοβόρα ανάγκη να αποκτήσουν έναν μεγάλο μέρος διαδοχικού φάσματος.
- Η τεχνολογία ενισχυμένης μετάδοσης πολλαπλών κεραιών αφορά την επέκταση της χωρικής πολυπλεξίας στο downlink ώστε να υποστηρίζει 8 στρώματα μετάδοσης. Στο uplink υποστηρίχθηκε η πολυπλεξία μέχρι και τεσσάρων στρωμάτων. Η τεχνολογία αυτή, έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης και μεγαλύτερη φασματική απόδοση για κάθε περίπτωση.
- Η τεχνολογία relaying αναφέρεται στην προσέγγιση βάση της οποίας ένα τερματικό επικοινωνεί με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης. Ο κόμβος είναι ασύρματα συνδεδεμένος με το βασικό cell χρησιμοποιώντας την ασύρματη διασύνδεση του LTE. Για το τερματικό, ο ενδιάμεσος κόμβος εμφανίζεται σαν κανονικό cell, εξασφαλίζοντας έτσι το backward-compatibility με τερματικά προηγούμενων εκδόσεων. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας, επιτρέπει την βελτίωση της κάλυψης σε μέρη με ασθενές σήμα.
- Οι ετερογενείς παρατάξεις ή αλλιώς Heterogeneous Networks (HetNets) αναφέρεται σε δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν ένα σύνολο cells με διαφορετικά επίπεδα στο εύρος μετάδοσης. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι η εναπόθεση Small Cells (Femtocells, Picocells) μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός cell προκειμένου να καλύψει κενά κάλυψης που δημιουργούνται ανάμεσα στα υπάρχοντα cells ή για να αποσυμφορήσουν τα μεγαλύτερα cells, εξυπηρετώντας τερματικά που θέλουν να συνδεθούν. Στο σχήμα 2 απεικονίζεται μια τυπική αρχιτεκτονική ενός ετερογενούς δικτύου, στο οποίο συνυπάρχουν Macrocells και Small Cells.



**Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική ενός ετερογενούς δικτύου αποτελούμενο από Macrocells και Small Cells [41].**

### 2.1.1 Femtocells στα Δίκτυα LTE

Όσο αφορά την αρχιτεκτονική του LTE, διακρίνουμε ότι το δίκτυο αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα είναι το δίκτυο κορμού το οποίο καλείται Evolved Packet Core (EPC) και το άλλο είναι το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης το οποίο καλείται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (e-UTRAN). Το e-UTRAN αποτελείται από σταθμούς βάσης που αναφέρονται ως eNodeBs. Κάθε σταθμός βάσης ελέγχει διαφορετικά cells, τα οποία παρέχουν κάλυψη και συνδεσιμότητα μεταξύ της συσκευής χρήστη (UE) και του EPC [7]. Το EPC αποτελείται από διάφορες δικτυακές συσκευές όπως οι:

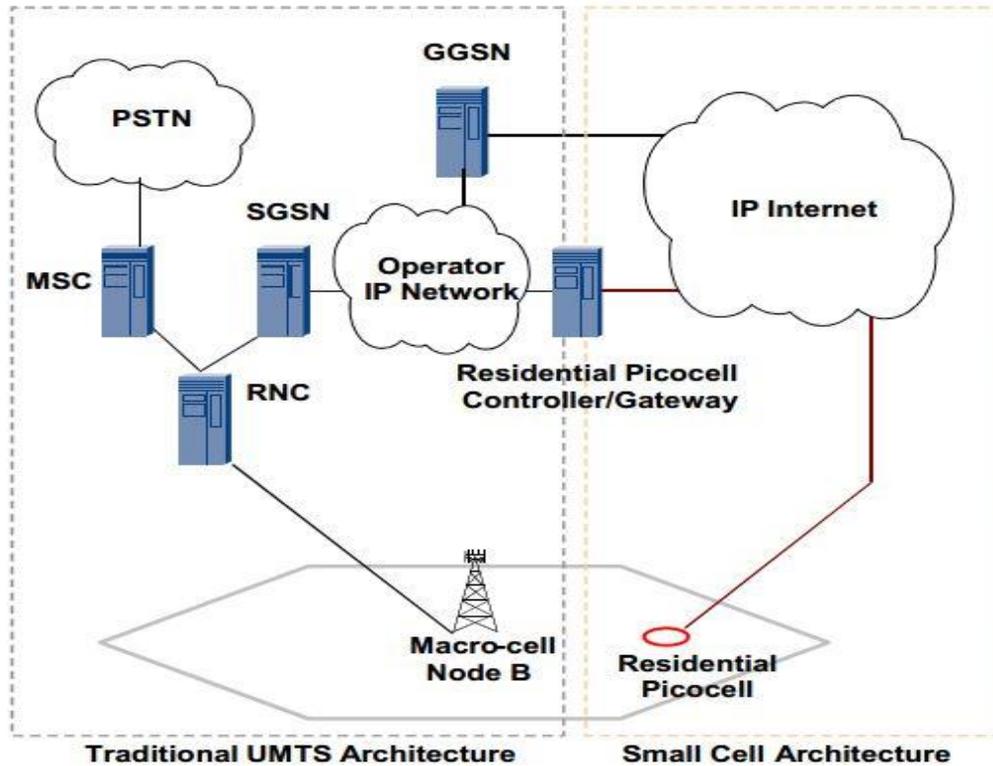
1. Serving Gateway (S-GW): Λειτουργεί ως router, δρομολογεί τα πακέτα δεδομένων μέσω του δικτύου πρόσβασης.
2. Packet Data Network (P-GW): Ενεργεί ως διεπαφή μεταξύ του δικτύου LTE και άλλων δικτύων πακέτων δεδομένων. Διαχειρίζεται την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) και παρέχει υπηρεσίες ελέγχου πακέτων (DPI).
3. Mobility Management Entity (MME): Είναι ένας κόμβος ελέγχου και επιτελεί τη σηματοδότηση ελέγχου μεταξύ δικτύου κορμού (EPC) και της συσκευής χρήστη (UE).
4. Home Subscriber Server (HSS): Είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές του δικτύου.

5. Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): Είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της πολιτικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων, ενώ επιπλέον υποστηρίζει και την ανίχνευση της ροής δεδομένων υπηρεσίας.

Παρατηρώντας λοιπόν τις νέες τεχνολογίες που εισήχθησαν στην τελευταία έκδοση του LTE, μπορούμε να καταλάβουμε ότι τα ζητήματα - κίνητρα που οδήγησαν στη δημιουργία του, ήταν η καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος, η εισαγωγή και η αποδοτική λειτουργία των Small Cells και η ανάγκη να αυξήσουμε την πυκνότητα των σταθμών βάσης, άρα και την αύξηση της πυκνότητας των cells του δικτύου.

Στα cellular δίκτυα πραγματοποιείται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, προσέχοντας όμως στα γειτονικά cells να αποδίδονται διαφορετικές συχνότητες, με σκοπό να αποφεύγεται η παρεμβολή. Με στόχο να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών cells, σε γειτονικά cells δεν ανατίθενται ποτέ ίδιες ζώνες συχνοτήτων. Η αύξηση χωρητικότητας συντελείται με την προσθήκη νέων καναλιών, αφού αυτά εξασφαλίζουν, με το δανεισμό καναλιών από γειτονικά cells τα οποία δεν παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά συμφόρησης. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση Small Cells, όπου περιλαμβάνει την εισαγωγή Microcells, Picocells, Femtocells κλπ. [6].

Η μαζική εισαγωγή των Small Cells είναι απαραίτητη για την υποστήριξη της απαιτούμενης χωρητικότητας -η οποία είναι απαραίτητη εφόσον αυξάνεται συνεχώς η κίνηση και ο όγκος των δεδομένων- αλλά και για τη μείωση φόρτου της κυκλοφορίας στα υπάρχοντα Macrocell. Αυτό μας δίνει την μεγαλύτερη εικόνα για τα «ετερογενή δίκτυα» ή HetNet, όπου Macrocells, Small Cells και σημεία πρόσβασης WiFi συνεργάζονται για την καλύτερη διαχείριση της χωρητικότητας του δικτύου και για να προσφέρουν την καλύτερη δυνατή εμπειρία στο χρήστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 που ακολουθεί.



**Σχήμα 3: Αντιπαραβολή των Αρχιτεκτονικών Macrocell-Picocell [7].**

Προκειμένου να δώσει στους χρήστες των ασύρματων δικτύων μια "πραγματική ευρυζωνική εμπειρία", η βιομηχανία αύξησε την χωρητικότητα του δικτύου με τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιούσε κατά τα τελευταία 20 χρόνια: διάσπαση / πύκνωση των cells. Η διαφορά αυτή τη φορά ήταν ότι μικρύνουμε ακόμα πιο πολύ το μικρότερο μέγεθος cell και εισαγάγαμε τα Femtocells [5].

Συμπερασματικά, μερικά από τα οφέλη της ανάπτυξης Femtocells είναι:

- Η ελάττωση και η αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας από το δίκτυο Macrocell στο επίπεδο Femtocell.
- Παρέχει αδιάκοπη κάλυψη σε όλο το εύρος δικτύου.
- Βελτίωση του QoS των χρηστών.
- Η αυξημένη χωρητικότητα, που παρέχεται και η οποία παραμένει σταθερή, ενόσω κανείς βρίσκεται στο σπίτι ή το γραφείο.
- Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.
- Οικονομική λύση με καλύτερη εκμετάλλευση του υπάρχοντος ευρυζωνικού δικτύου.
- Μεγαλύτερη τοπικότητα υπηρεσιών, αφού το σύστημα μεταφέρεται από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο στο μικρό αυτό cell.
- Αξιοποίηση της χωρητικότητας εκεί που είναι απαραίτητη κι όχι σε άλλα σημεία, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η μη αξιοποίηση του συνόλου του

διαθέσιμου εύρους ζώνης.

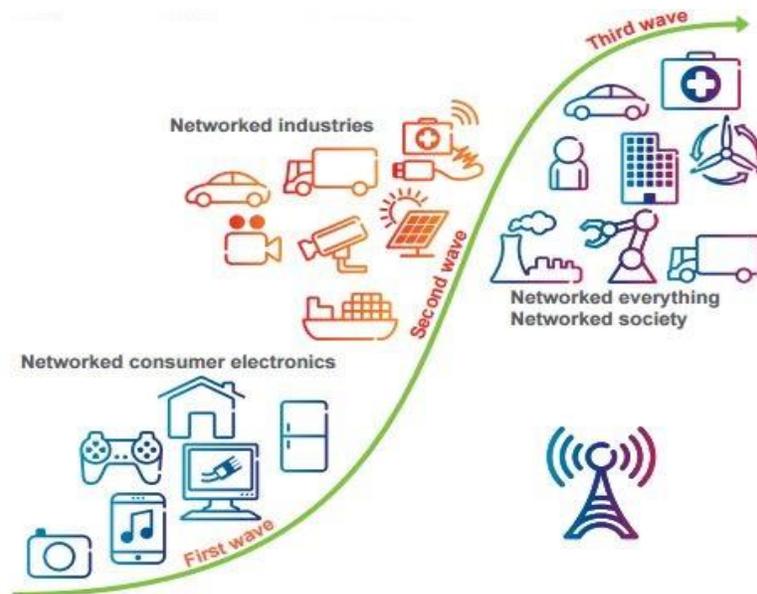
Τα Femtocells θεωρήθηκαν η λύση για την κάλυψη των τότε αναγκών για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και χωρητικότητα στα ασύρματα cellular δίκτυα. Τα Femtocells θα αντιμετωπίσουν πολλά προβλήματα όταν η ανάπτυξη γίνει σε μεγάλη κλίμακα και η πυκνότητά τους αυξηθεί. Τα μελλοντικά δίκτυα απαιτούν υψηλότερη χωρητικότητα και ρυθμούς δεδομένων, καλύτερη κάλυψη, βελτιωμένη συνδεσιμότητα και βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας, όμως σύντομα δεν θα είναι εφικτό για τα δίκτυα βασισμένα σε Macrocells να παρέχουν την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας σε όλους του χρήστες.

Τα Femtocells και τα HetNets αποτέλεσαν αναπόσπαστο κομμάτι για τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς. Η αύξηση της πυκνότητας των cells (cell densification) έδωσε τη δυνατότητα να βελτιωθεί κατά πολύ η κάλυψη και η αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας από το δίκτυο Macrocell, με μια ουσιαστικά φθηνή επιλογή όταν μιλάμε για Femtocells. Ωστόσο, όπως θα δούμε παρακάτω η αύξηση της πυκνότητας των cells (cell densification) έχει φτάσει σε ένα τέλμα και από άποψη διαθέσιμου εύρους αλλά και από άποψη κόστους. Επομένως για να μπορέσουμε να ικανοποιήσουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά που απαιτούν τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, δηλαδή πολύ μικρό latency, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, δυναμική δέσμευση και διάθεση πόρων, πρέπει να πραγματοποιήσουμε δραστικές αλλαγές στα cellular δίκτυα τόσο στις υποδομές όσο και στην αρχιτεκτονική τους [16].

## 2.2 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς

Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των κινητών έξυπνων συσκευών, του όγκου δεδομένων και της αύξησης του ρυθμού διακίνησης δεδομένων, μας υποχρεώνουν να δούμε υπό διαφορετικό πρίσμα τα 5<sup>ης</sup> γενιάς cellular δίκτυα. Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς ή αλλιώς τα 5G δίκτυα με μια πρώτη ανάγνωση θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από τρία βασικά γνωρίσματα: α)αδιάκοπη συνδεσιμότητα, β)ελάχιστο latency και γ)πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Υπολογίζεται ότι το 2020 θα έχουμε περισσότερες από 50 δισεκατομμύρια συσκευές οι οποίες σκοπεύουν να χρησιμοποιούν τα cellular δίκτυα για τη διασύνδεσή τους [9]. Αυτό θα αποτελέσει έκρηξη στον όγκο των διακινούμενων δεδομένων (data traffic) και θα οδηγήσει σε κατάρρευση το δίκτυο, αν παραμείνει με τη σημερινή του μορφή. Το παραπάνω γεγονός θα μας οδηγήσει στο να εξετάσουμε διαφορετικές και προσανατολισμένες στο software τεχνικές για να υλοποιήσουμε τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η ανάγκη αυτή φαίνεται και από το γεγονός ότι το 5G δεν θα είναι απλά μια επέκταση του 4G -όπως οι προηγούμενες γενιές των cellular δικτύων- αλλά θα εισαγάγει πολλές νέες τεχνολογίες όπως π.χ. Network Function Virtualization, Software Defined Networking, cloud-based communication κ.α. Η εποχή του 5G αναμένεται να φέρει επαναστατικές αλλαγές στον κόσμο των επικοινωνιών, υποστηρίζοντας πάρα πολύ

υψηλές ταχύτητες, πάρα πολύ μικρές καθυστερήσεις, αποδοτική εκμετάλλευση τόσο του φάσματος [23], όσο και της ενέργειας του δικτύου, ενώ θα κάνει πραγματικότητα και το λεγόμενο Internet of Things (IoT) [24]. Το IoT συνδέει τις έξυπνες συσκευές στο Internet. Μπορεί να εγκαθιδρύσει την ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ των συσκευών και πηγαινει την διασύνδεση των συσκευών σε άλλο επίπεδο. Η Cisco εκτιμά, ότι το IoT θα αποτελείται από 50 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες στο Internet έως το 2020 [38], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4 που ακολουθεί. Με άλλα λόγια βλέπουμε το 5G ως το μέσο το οποίο θα εξασφαλίσει ένα καθολικό περιβάλλον επικοινωνίας και θα ανοίξει το δρόμο για την ενασχόληση με νέες καινοτομίες στο χώρο των μεταφορών, της ενέργειας και των αυτοματισμών. Αυτά θα πραγματοποιηθούν, σχεδιάζοντας τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς με δυνατότητες όπως flexibility, programmability, μειωμένα κεφαλαιακά και λειτουργικά κόστη, καθώς και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.



**Σχήμα 4: Τα τρία «κύματα» των μελλοντικά συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο 5G [9].**

Πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με τα 4G cellular δίκτυα, τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, σύμφωνα με τον οργανισμό 5G Infrastructure Public Private Partnership (5GPPP) θα πρέπει να ικανοποιούν [10]:

1. 10-100\*πλάσιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών.
2. 1000 φορές υψηλότερο εύρος ζώνης ανά περιοχή.
3. 10-100\*φορές υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
4. Latency 1 millisecond.
5. 99.99% διαθεσιμότητα δικτύου.

6. 100% κάλυψη.

7. 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιήσουν τα 5G cellular δίκτυα είναι μεγάλες. Ωστόσο, τι είναι αυτό που καθιστά αδύνατη την ικανοποίηση τους από τα 4G δίκτυα και γιατί μια επέκταση του δικτύου -κατά τα πρότυπα των προηγούμενων γενεών- δεν είναι ικανή για την ικανοποίηση των στόχων[12];

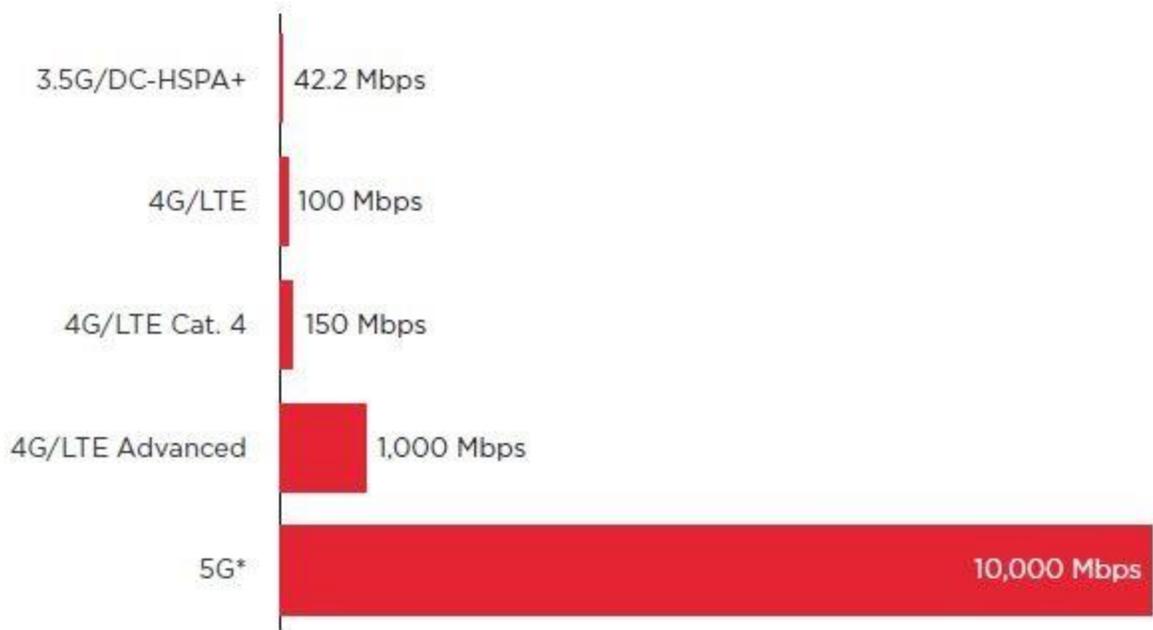
- Δεν υποστηρίζονται bursts κατά τη διακίνηση δεδομένων: Υπάρχουν πολλές εφαρμογές οι οποίες κατά την εκτέλεση τους μπορούν να στείλουν σήμα ζητώντας ένα μεγάλο αριθμό πόρων (π.χ. ρυθμό μετάδοσης) για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Όταν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο κατά τη μετάδοση, έχουμε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας της μπαταρίας της συσκευής χρήστη και επίσης λόγω του bursting υπάρχει ο κίνδυνος να δημιουργηθούν προβλήματα στο δίκτυο κορμού. Επομένως το γεγονός ότι δεν υπάρχει πρόβλεψη στη σηματοδότηση ελέγχου ανάλογα με την κίνηση που δημιουργείται και η απουσία μηχανισμού για δυναμική δέσμευση πόρων ανάλογα με την κίνηση, αποτελεί ένα πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του 5G.
- Μη-βέλτιστη χρησιμοποίηση της επεξεργαστικής ισχύος του σταθμού βάσης: Στα σημερινά cellular δίκτυα, η επεξεργαστική ισχύς του σταθμού βάσης χρησιμοποιείται μόνο από τους χρήστες που συνδέονται με αυτόν και διαμοιράζεται ομοιόμορφα σε αυτούς. Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει διακύμανση στην κίνηση που ανατίθεται στους σταθμούς βάσης π.χ. σε κάποιες ώρες τις μέρας κάποιοι σταθμοί μπορεί να έχουν μεγάλη κίνηση ενώ κάποιοι άλλοι να παρουσιάζουν μηδενική κίνηση. Ωστόσο, ανεξαρτήτως της κίνησης σε ένα σταθμό, οι σταθμοί καταναλώνουν το ίδιο ποσό ενέργειας πράγμα το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος δικτύου.
- Παρεμβολές μεταξύ των καναλιών: Τα συμβατικά cellular δίκτυα, χρησιμοποιούν δύο ξεχωριστά κανάλια, ένα για uplink όπου υπάρχει μετάδοση από το χρήστη στο σταθμό βάσης και ένα για downlink που πραγματοποιείται το αντίστροφο. Ωστόσο η χρήση δύο διαφορετικών καναλιών για έναν χρήστη δεν αποτελεί βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης μπάντας συχνοτήτων, ενώ το πρόβλημα με την έλλειψη διαθέσιμου φάσματος στα cellular δίκτυα είναι καίριο. Από την άλλη, αν και τα δύο κανάλια λειτουργούν στην ίδια συχνότητα τότε υπάρχει το πρόβλημα των παρεμβολών, πράγμα το οποίο παρεμποδίζει την εγκατάσταση πολλών σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή, η οποία σκοπό έχει να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Ακόμη και στα σημερινά δίκτυα το διαθέσιμο φάσμα δεν χρησιμοποιείται με το βέλτιστο τρόπο. Επομένως, είναι απαραίτητο για το 5G να υλοποιήσουμε μια μέθοδο πρόσβασης η οποία θα λαμβάνει υπόψη την βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η διεύρυνση του φάσματος πάνω από τα 3 Ghz.
- Latency: Στα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς, για να αποκτήσει ένας χρήστης πρόσβαση στον «καλύτερο» διαθέσιμο σταθμό βάσης, απαιτούνται μερικές εκατοντάδες milliseconds, γεγονός το οποίο δεν εξυπηρετεί το μηδενικό latency που

θέλουμε να πετύχουμε στο 5G. Τα μελλοντικά cellular δίκτυα, προορίζονται για να τρέχουν real-time εφαρμογές και υπηρεσίες με διάφορα επίπεδα QoS (όσο αφορά το bandwidth, το latency, τα χαμένα πακέτα). Για το λόγο αυτό, τα 5G δίκτυα πρέπει να σχεδιαστούν με zero-latency προοπτική στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό.

### 2.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Νέες Τεχνολογίες

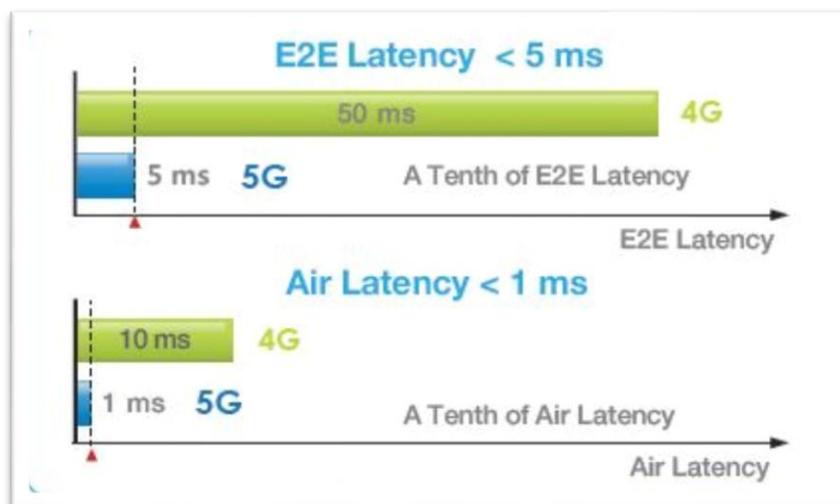
Το 5GPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) είναι ένας οργανισμός ο οποίος αποτελεί μια συντονισμένη ευρωπαϊκή προσπάθεια της ICT βιομηχανίας για να συνεισφέρει στην έρευνα για τη νέα εποχή των ICT υποδομών, προκειμένου να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην παγκόσμια αγορά [27]. Σύμφωνα λοιπόν με το 5GPPP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς οι στόχοι των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς αναμένεται να είναι οι εξής [10]:

- Αύξηση του όγκου των δεδομένων που διακινούνται μέσω των κινητών δικτύων ανά γεωγραφική περιοχή. Εκτιμάται ότι το ποσό αυτό θα είναι της τάξης του 10TB/s/km<sup>2</sup>.
- Μεγάλη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο. Υπολογίζεται ότι θα έχουμε 1.000.000 συνδεδεμένα τερματικά ανά km<sup>2</sup>.
- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, πάνοντας ταχύτητες από 1-10 Gb/s. Στο Σχήμα 5, παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των προηγούμενων τεχνολογιών σε σχέση με το 5G.



**Σχήμα 5: Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps [11].**

- 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε σχέση με το 2010.
- 80% μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX).
- Σημαντική μείωση του latency σε τιμές από 5ms έως 1ms, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



**Σχήμα 6: Σύγκριση του latency μεταξύ του δικτύου 4G και της πρόβλεψης για το 5G [24].**

- Σημαντική μείωση του απαιτούμενου χρόνου δημιουργίας και εγκατάστασης κάποιας υπηρεσίας. Εκτιμάται ότι θα μπορούμε να δημιουργήσουμε εξ 'αρχής μια υπηρεσία και να την παραδώσουμε σε λειτουργική μορφή σε λιγότερο από 90 λεπτά.

Η πραγματοποίηση των παραπάνω στόχων μεταφράζεται σε προκλήσεις και ανάγκη για αλλαγές στα σημερινά δίκτυα, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι λεγόμενοι δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators KPIs) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ακολουθούν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές που θα έπρεπε να ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς προκειμένου να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα:

- QoS: Προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε την εμπειρία του χρήστη, πρέπει το δίκτυο να προσφέρει τις δυνατότητες του (υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρό latency κλπ.) ανεξαρτήτως της γεωγραφικής θέσης που βρίσκεται ο χρήστης. Στα σημερινά δίκτυα, υπάρχουν περιπτώσεις που η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται σε ένα χρήστη, εξαρτάται από το πόσο κοντά βρίσκεται στο σταθμό βάσης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7. Αυτό όμως απαιτεί, το δίκτυο να έχει ανθεκτικότητα, διαθεσιμότητα και καλή κάλυψη έχοντας πάντα ως γνώμονα το TCO (Total Cost of Ownership) να μην είναι απαγορευτικά μεγάλο.

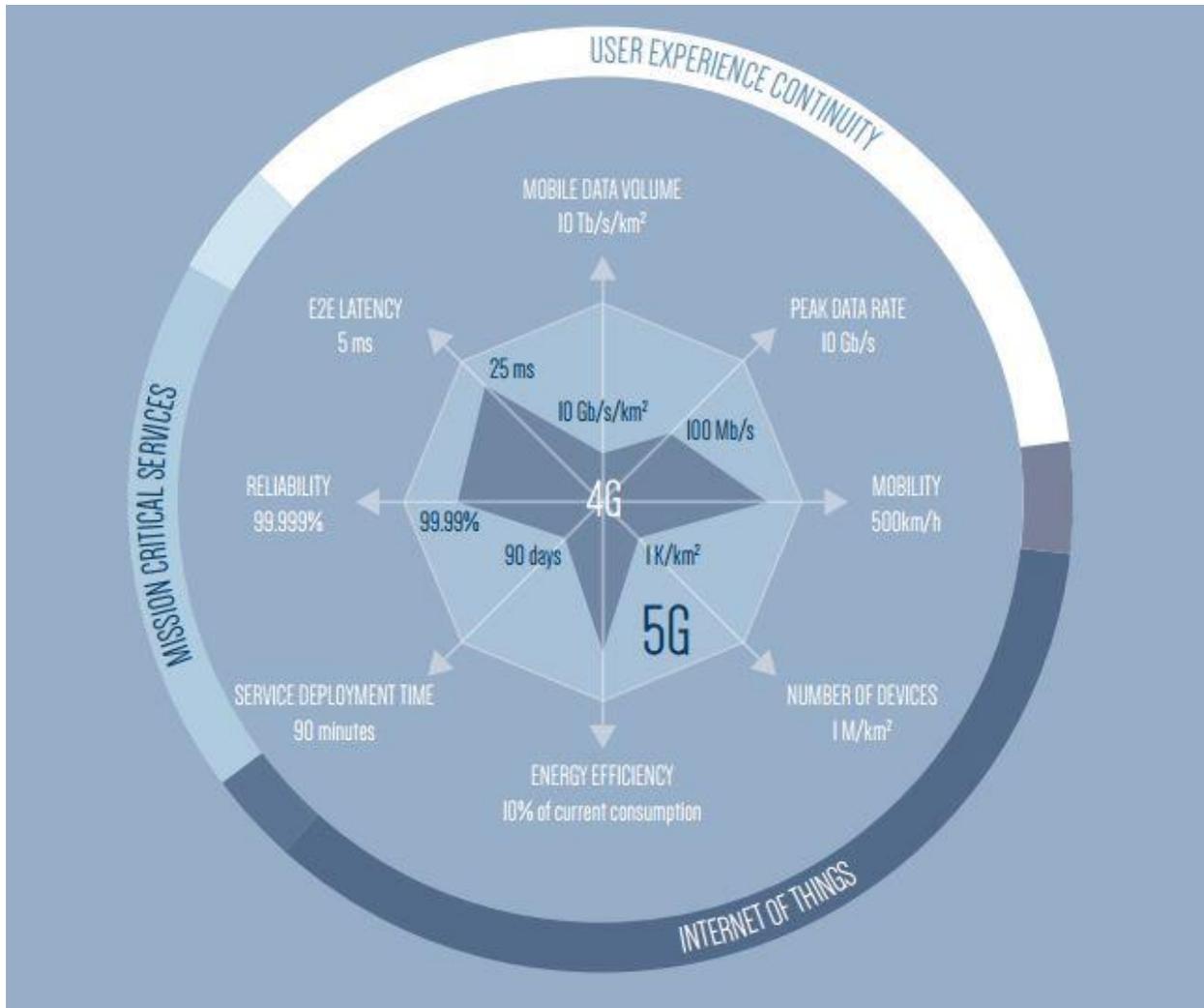


**Σχήμα 7: Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη [24].**

- Multi-tenancy: Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους σε όλες τις φυσικές υποδομές ανεξαρτήτως αν ανήκουν σε έναν ή περισσότερους παρόχους και να μπορούν να εκμεταλλεύονται αποδοτικά τα ήδη υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα περιορίζοντας τις μεταξύ τους παρεμβολές.
- Density: Οι απαιτήσεις των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς για μεγαλύτερη χωρητικότητα, καθιστούν απαραίτητη την βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος –αν όχι την επέκτασή του-. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η πυκνότητα των cells, παρατηρείται το φαινόμενο των παρεμβολών μεταξύ των cells (inter-cell interference) γεγονός που μειώνει την απόδοση του συστήματος, ειδικά όσο πλησιάζουμε στα όρια του cell. Ο έλεγχος αυτών των παρεμβολών, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση CoMP, είτε με συντονισμένη κωδικοποίηση πριν την αποστολή ή με άλλους αλγορίθμους συντονισμού των cells που έχουν προταθεί [22].

- **Manageability:** Στο σχεδιασμό του δικτύου πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές οι οποίες θα εξασφαλίζουν τον απομακρυσμένο συντονισμό των λειτουργιών του δικτύου και θα απαιτούν τη λιγότερο δυνατή συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα. Αυτό, πέρα από την ευκολία της κεντρικής διαχείρισης, μας δίνει και τη δυνατότητα να μειώσουμε το λειτουργικό κόστος (OPEX) του δικτύου.
- **Resource management:** Στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς είναι απαραίτητη η δυναμική δέσμευση πόρων (εύρος ζώνης, μνήμη, επεξεργαστική ισχύ) αναλόγως την υπηρεσία (π.χ. network, data κλπ.) και αναλόγως την περίπτωση κάθε φορά (π.χ. σε περίπτωση αυξημένης κίνησης), έτσι ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα και έλεγχο για τον βέλτιστο διαμοιρασμό των πόρων.
- **Evolution:** Πρέπει να έχουμε προνοήσει για την εύκολη εγκατάσταση και δημιουργία νέων υπηρεσιών, απαγκιστρώνοντας τους παρόχους από τις μεγάλες επενδύσεις σε συγκεκριμένους παρόχους hardware (lock-in) και ευνοώντας τις open-source λύσεις δημιουργώντας έτσι ευκαιρία για να εισέλθουν νέοι παίκτες στην αγορά, αλλά και να μειώσουμε το κεφαλαικό μας κόστος (CAPEX).
- **Flexibility:** Οι ετερογενείς συσκευές, υπηρεσίες και τα ετερογενή δίκτυα πρόσβασης που πρέπει το 5G να υποστηρίζει, αναμφισβήτητα θα οδηγήσουν σε δραστικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Προκειμένου να μπορέσουμε να ανταπεξέλθουμε σε αυτές τις ετερογενείς παρατάξεις, η ελαστικότητα του δικτύου (flexibility) θα είναι σημείο κλειδί για τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η ελαστικότητα του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί κατά το σχεδιασμό του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες όπως το Software Defined Networking, το Network Function Virtualization και το Cloud Computing [21,22].
- **Υποστήριξη των προηγούμενων γενεών δικτύων (backward-compatibility):** Το 5G θα συναθροίζει τις νέες τεχνολογίες κινητών δικτύων και ασύρματης πρόσβασης με τα δίκτυα προηγούμενων γενεών, προκειμένου να επιτυγχάνει την εκ νέου εκμετάλλευσή τους. Η υποστήριξη των προηγούμενων γενεών (Legacy Support), ανέκαθεν αποτελούσε «πονοκέφαλο» όταν θέλαμε να εγκαταστήσουμε μια νέα τεχνολογία. Όλα αυτά τα συστήματα πρέπει να συνεργάζονται και εξασφαλίζουν αδιάκοπη διαλειτουργικότητα [28]. Στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία Network Virtualization, καθώς νεότερες και προηγούμενες εκδόσεις μπορούν να συνυπάρξουν, βλέποντας τις προηγούμενες εκδόσεις ως ιδεατά δίκτυα μέσα στο δίκτυο αυτό [26].

Στο σχήμα 8, παρατίθεται ένα radar chart που απεικονίζει τις θεωρητικές δυνατότητες του 5G εν συγκρίσει με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G.



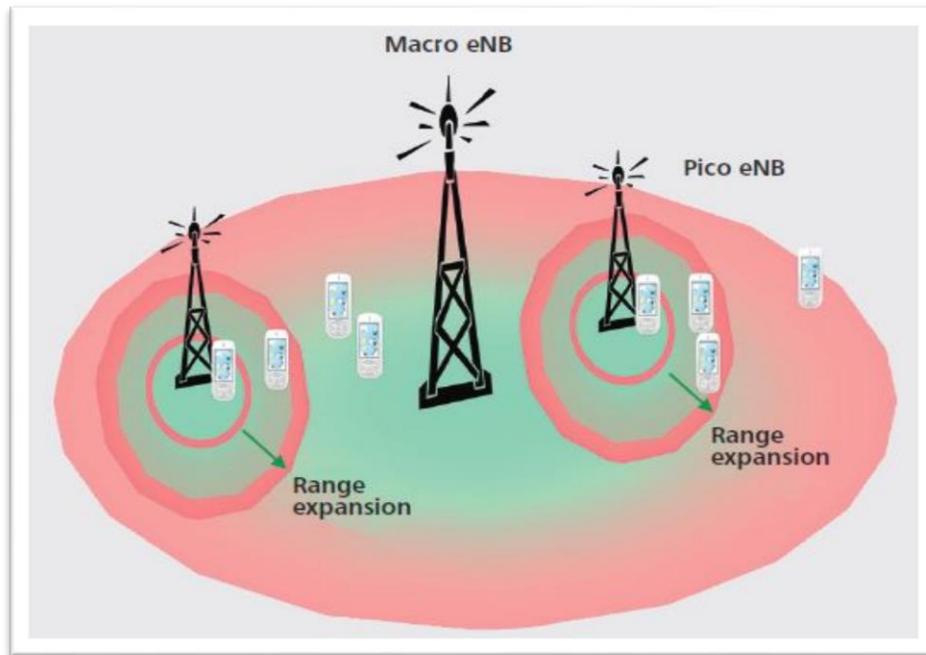
**Σχήμα 8: Radar Chart των θεωρητικών δυνατοτήτων του 5G [10].**

### 2.2.2 Ultra Dense Deployments

Το φάσμα αποτελεί την κύρια πηγή πόρων για τις ραδιοεπικοινωνίες. Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία προοδεύει συνεχώς στην κατεύθυνση της αποδοτικότερης εκμετάλλευσης του φάσματος (π.χ. με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, με την επαναχρησιμοποίηση φάσματος), ωστόσο η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος παραμένει αμετάβλητη. Αυτό το γεγονός, δημιουργεί ένα φυσικό φράγμα στο ρυθμό μετάδοσης bit και στην αποδοτικότητα των καναλιών που μπορεί να επιτευχθεί σε πραγματικές συσκευές με φυσικούς περιορισμούς. Για να συμβαδίσει το 5G με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, πρέπει να λυθεί το πρόβλημα του φάσματος. Υπάρχει ένα μέρος του φάσματος που αυτή τη στιγμή υπόχρησιμοποιείται στην mmWave μπάντα συχνοτήτων, το οποίο ίσως να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση αφού μπορεί να προσφέρει μέχρι και 100 φορές μεγαλύτερη

χωρητικότητα σε σχέση με τα σημερινά 4G cellular δίκτυα. Οι mmWave μπάντες συχνοτήτων είχαν απορριφθεί για τη χρήση σε cellular δίκτυα, κυρίως λόγω της μικρής ακτίνας τους και λόγω προβλημάτων NLOS κάλυψης [28]. Πρόσφατες δημοσιεύσεις έχουν δείξει ότι η mmWave μπάντα συχνοτήτων πολύ πιθανό να αποτελέσει μέρος των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς [13]. Στα 4G δίκτυα, η ανάγκη επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου πραγματοποιήθηκε εν μέρη μέσω της επαναχρησιμοποίησης του φάσματος. Τα μελλοντικά δίκτυα απαιτείται να σχεδιάζονται πολύ πιο πυκνά και επομένως θα γίνουν και πολύ πιο ετερογενή από ότι τα σημερινά. Ένα αναπόσπαστο κομμάτι των 5G δικτύων θα είναι η πυκνή τοποθέτηση Small Cells, τα οποία θα συνυπάρχουν με Microcells και Macrocells αλλά και με άλλα συστήματα όπως WiFi, LTE/A και HSPA δημιουργώντας έτσι ετερογενή δίκτυα (HetNets) [28].

Ακολουθώντας την τακτική network densification θα δημιουργήσουμε πολύ πυκνά cells εγκαθιστώντας πολλούς σταθμούς βάσης επιτυγχάνοντας υψηλό εύρος ζώνης, μικρό latency κ.α. Η πυκνή τοποθέτηση cells έχει ήδη αποφέρει πολλά κέρδη στις συχνότητες κάτω από τα 6Hz. Οι πάροχοι αποφασίζουν πού θα εγκαταστήσουν τα νέα cells με γνώμονα το κόστος προετοιμασίας της περιοχής που θα εγκατασταθεί το συγκεκριμένο cell για την κάλυψη μιας γεωγραφικής περιοχής, να σταθμίζεται με το όφελος που θα δημιουργείται από την κάλυψη που θα παρέχει στη γεωγραφική περιοχή το cell αυτό [11]. Η τεχνική network densification περιλαμβάνει τη χωρική πυκνότητα (densification over space) όπου εγκαθιστούμε σε μεγάλη πυκνότητα νέα Small Cells (Picocells, Femtocells) και τη συχνοτική πυκνότητα (densification over frequency) όπου χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες περιοχές του ραδιοφάσματος σε διαφορετικές συχνότητες. Στο Σχήμα 9 που ακολουθεί, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επεκτείνουμε την κάλυψη ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification. Κατά την χωρική πυκνωση (spatial densification) αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών ανά κόμβο, αυξάνουμε την πυκνότητα των εγκατεστημένων σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή και προσπαθούμε να διανέμουμε ομοιόμορφα τους χρήστες στους σταθμούς βάσης. Κατά την συχνοτική πυκνωση χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τα 500 Mhz ως τις υπερχαμηλές συχνότητες (30-300Mhz) [16].



**Σχήμα 9: Επέκταση της κάλυψης ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification [18].**

Σύμφωνα με τον Martin Cooper [18], η αύξηση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων εξαρτιόταν ανέκαθεν από τους εξής τρεις παράγοντες:

- a) Αύξηση του αριθμού των ασύρματων κόμβων του δικτύου.
- b) Βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.
- c) Βελτίωση της αποδοτικότητας των συνδέσεων.

Το εύρος ζώνης κάθε σταθμού βάσης, μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας επιπλέον φάσμα το οποίο οδηγεί σε γραμμική αύξηση της χωρητικότητας [18,19]. Όσο αφορά την κίνηση που δέχεται κάθε κόμβος, μπορούμε να την μειώσουμε εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και φροντίζοντας να διαμοιράζεται το φορτίο του δικτύου όσο καλύτερα γίνεται σε κάθε κόμβο. Οι Ultra Dense Deployments θεωρούνται προσεχόμενα για την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας μεταξύ των σταθμών βάσης αλλά και για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Τα Ultra Dense Networks (UDNs), αντιμετωπίζουν την υψηλή κίνηση στη μετάδοση δεδομένων μέσω της πυκνωσης της υποδομής. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα, να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των ραδιοσυνδέσεων και να υπάρξει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Τα UDNs γίνονται και θα γίνονται όλο και πυκνότερα, γεγονός το οποίο θα αυξήσει τις μεταξύ τους παρεμβολές αλλά και το κόστος για κάθε κόμβο πρόσβασης [30].

Εφαρμόζοντας την κλασική τεχνική του network densification, μπορούμε να λύσουμε το θέμα της αυξημένης κίνησης στη μετάδοση δεδομένων, όμως αυτό θα σήμαινε πολύ μεγάλο κόστος για την επένδυση σε υποδομές. Ακόμη, οι επιπλέον σταθμοί βάσης θα συνεπάγονταν και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, η οποία

αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του λειτουργικού κόστους (OPEX) του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου είναι ανάλογη του αριθμού των εγκατεστημένων σταθμών βάσης. Ένα ακόμα πρόβλημα που παρουσιάζεται με την τεχνική αυτή, είναι το γεγονός ότι η μεγάλη εύρους μετάδοση των Macrocells, συρρικνώνει σημαντικά την κάλυψη των Small Cells (Picocells, Femtocells) οδηγώντας σε μη-βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων τους. Ακόμα και αν τα Small Cells έχουν τοποθετηθεί μέσα στο δίκτυο με το βέλτιστο τρόπο, είναι πιθανό να μην χρησιμοποιούνται, αντίστοιχα, με το βέλτιστο τρόπο λόγω διακυμάνσεων στην κίνηση των δεδομένων. Επομένως εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και πυκνώνοντας ακόμα περισσότερο τα υπάρχοντα cells αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση [20], οι εκπομπές CO<sub>2</sub> και το συνολικό κόστος επενδύσεων πράγμα το οποίο αντιτίθεται στους στόχους του 5G [17]. Αυτός ο διαμοιρασμός πόρων που περιγράφουμε πιο πάνω απαιτεί ένα μηχανισμό συγχρονισμού και σηματοδότησης ελέγχου μεταξύ των σταθμών, πράγμα το οποίο θα μας οδηγήσει αργότερα να εισάγουμε «νοημοσύνη» στο δίκτυο μας.

## 2.3 Network Function Virtualization

Οι παραδοσιακές φυσικές υποδομές, περιορίζονται από τον αριθμό των πόρων που μπορούν να αξιοποιήσουν, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να αποτελέσει περιορισμό για το 5G. Επιπλέον, το κόστος των υπολογιστικών συσκευών καθώς και των διαθέσιμων πόρων τους (αποθηκευτικός χώρος, CPU κλπ.) επιβάλλει την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στο σχεδιασμό του δικτυακού μοντέλου. Ακόμη, είναι αναγκαίο στα υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα, να υπάρχει συντονισμένη συνεργασία για την παροχή των πόρων κατά την ανάπτυξη υπηρεσιών. Η υλοποίηση των υπηρεσιών στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, πραγματοποιείται παραδοσιακά από τους παρόχους με την εγκατάσταση φυσικών συσκευών και φυσικού εξοπλισμού οι οποίοι υλοποιούν κάποια συνάρτηση για την λειτουργία κάποιας υπηρεσίας. Οι υπηρεσίες αυτές που περιγράφουμε, απαιτούν συνεργασία μεταξύ των συναρτήσεων που τις υλοποιούν, πράγμα το οποίο πρέπει να αντικατοπτρίζεται και στην τοπολογία του δικτύου και στον εντοπισμό των συσκευών που υλοποιούν τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Αυτοί οι περιορισμοί σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις του 5G για υψηλή ποιότητα και σταθερότητα, οδηγούν σε μεγάλους product-cycles, σε πολύ χαμηλή ταχύτητα δημιουργίας νέων υπηρεσιών καθώς και άμεση εξάρτηση από εξειδικευμένο -άρα και ακριβό- hardware. Οι λόγοι αυτοί, μας επιβάλλουν να πραγματοποιήσουμε το επόμενο βήμα στο σχεδιασμό των δικτύων [59].

Τα δίκτυα, εξελίσσονται προς ένα πολύ δυναμικό και ευέλικτο περιβάλλον που θα αποτελούνται από εικονικούς πόρους (virtual resources), οι οποίοι θα μπορούν να δημιουργούνται στιγμιαία και να παρέχονται κατ' απαίτηση του πελάτη προκειμένου να αναπτύξει τις υπηρεσίες του ή κατ' απαίτηση του παρόχου προκειμένου να μπορέσει να εκτελέσει τις εσωτερικές του λειτουργίες. Αυτές οι εικονικές λειτουργίες (virtual functions) είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους προκειμένου να μπορούν να αλληλοεπιδρούν και να συνεργάζονται, με virtual links τα οποία επίσης μπορούν να δημιουργηθούν δυναμικά για να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες δικτύου [27].

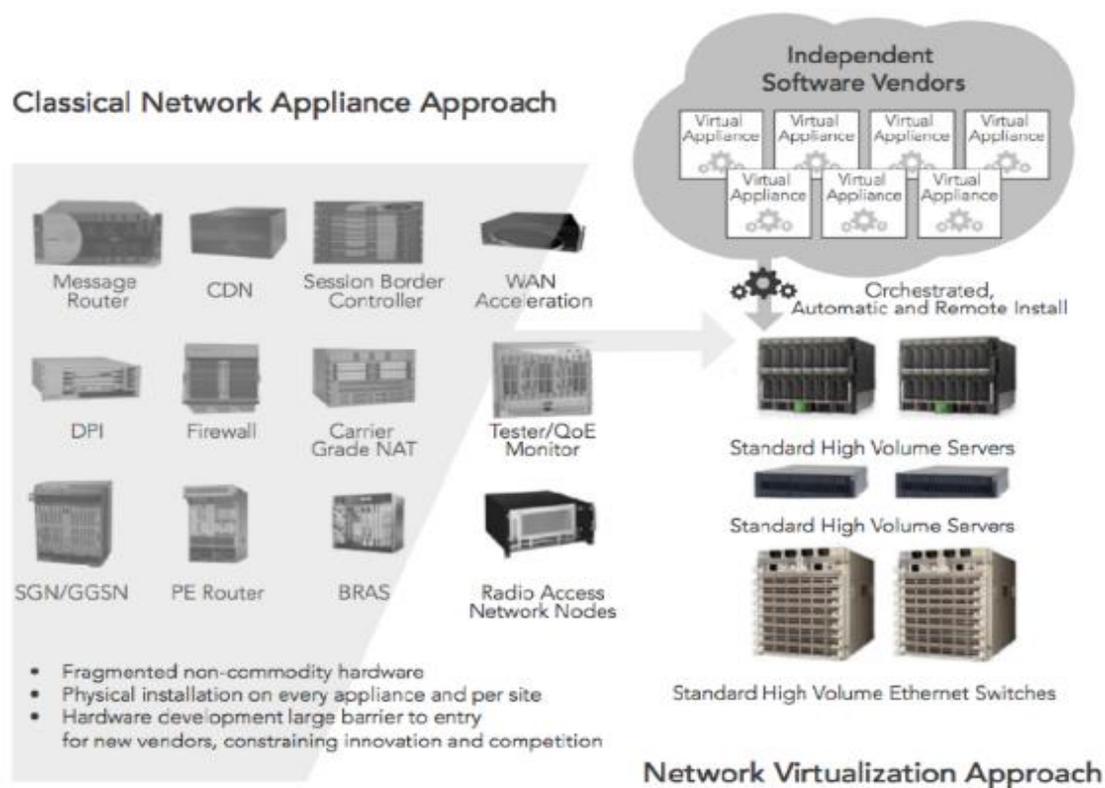
Λαμβάνοντας υπόψιν τα ετερογενή δίκτυα, τα οποία θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς και το γεγονός ότι οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές των δικτύων θα πρέπει να συνυπάρχουν, να μοιράζονται πόρους και να συνεργάζονται στο περιβάλλον του δικτύου, κατανοούμε ότι θα πρέπει να υπάρχει μια ενιαία διαχείριση [25]. Η τεχνολογία Network Virtualization προσφέρει μεγαλύτερη δυνατότητα διαχείρισης, προωθεί την ετερογένεια του δικτύου καθώς και αυξάνει την ευκολία εγκατάστασης νέων τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα, μας δίνεται η δυνατότητα μέσω της χρήσης της παραπάνω τεχνολογίας να υλοποιούμε και να τρέχουμε διαφορετικά στιγμιότυπα εικονικών λειτουργιών (virtual functions) και υπηρεσιών χρησιμοποιώντας hardware «γενικού σκοπού», το οποίο διαμοιράζεται μεταξύ διάφορων χρηστών. Αυτό είναι και το πρώτο βήμα για τη συνεργασία του Networking και του IT, και εκ προοιμίου παρατηρούνται μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως: α) σημαντική μείωση του κεφαλαιακού κόστους (CAPEX) και του λειτουργικού κόστους (OPEX), αφού το hardware γενικού σκοπού είναι φθηνότερο από τη χρήση εξειδικευμένων συσκευών, β) επίσης μειωμένο θα είναι και το λεγόμενο time-to-market, δηλαδή ο χρόνος να δημιουργήσουμε μια υπηρεσία και να είναι έτοιμη για εμπορική χρήση, γ) και μεγαλύτερη ευκολία όσο αφορά την αναβάθμιση των υπάρχουσών υπηρεσιών [26, 27]. Επιπλέον, μια άλλη προοπτική που μας παρέχει η τεχνολογία Network Virtualization, είναι η δημιουργία εικονικών δικτύων, δηλαδή δικτύων τα οποία είναι «ανεξάρτητα» από το υπάρχων hardware. Ακόμη, μπορούμε να πάμε ένα βήμα πιο πέρα, συγχωνεύοντας εικονικούς κόμβους, virtual links ή ακόμα και ολόκληρα εικονικά δίκτυα και εγκαθιδρύοντας ενιαία διαχείριση. Παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα για δημιουργία νέων δικτυακών υπηρεσιών και εφαρμογών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις διαφορετικών πελατών.

Ο οργανισμός ETSI (European Telecommunications Standards Institute) έχει ασχοληθεί εκτενώς με την τεχνολογία Network Virtualization και έχει διαμορφώσει μια «ομάδα» η οποία ασχολείται με την έρευνα που αφορά την υλοποίηση των εικονικών λειτουργιών του δικτύου (Network Function Virtualization-NFV). Η ομάδα αυτή ονομάζεται ISG (NFV Industry Specification Group) και απαρτίζεται μεταξύ άλλων από εταιρείες όπως η AT&T, η BT, η China Mobile και πολλές άλλες, έχοντας ως γνώμονα την επιτάχυνση της έρευνας για το NFV. Σύμφωνα με τον οργανισμό ETSI, η τεχνολογία NFV περιγράφεται ως εξής [60]:

### *2.3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Κατευθυντήριες Γραμμές*

Η τεχνολογία NFV στοχεύει στην αλλαγή του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται παραδοσιακά τα δίκτυα, προτείνοντας τη χρήση IT τεχνολογιών για την υλοποίηση εικονικών συναρτήσεων που επιτελούν λειτουργίες δικτυακών συσκευών και τοποθέτηση τους σε μεγάλους απλούς servers. Η διαδικασία αυτή, φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 10 που ακολουθεί. Αυτοί οι servers με τη σειρά τους, μπορούν να τοποθετηθούν σε Datacenters ή σε κόμβους του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία NFV αφορά την υλοποίηση των δικτυακών λειτουργιών σε λογισμικό, το οποίο μπορεί να εγκαθίστανται και να τρέχει πάνω σε απλό hardware. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα οι δικτυακές λειτουργίες αυτές να μπορούν να μετακινούνται ή να

δημιουργούνται σε διάφορα σημεία του δικτύου όταν αυτό απαιτείται, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εγκατάσταση νέου εξειδικευμένου εξοπλισμού. Έτσι λοιπόν, καταλαβαίνουμε πώς η τεχνολογία NFV μειώνει το κόστος για τους δικτυακούς παρόχους, αφού ούτε χρειάζεται να επενδύσουν σε εξειδικευμένους servers/hardware για το στήσιμο του δικτύου αλλά ούτε κατά την αναβάθμισή του [12, 60].



**Σχήμα 10: Παραδείγματα Network Functions Virtualization [57].**

Η τεχνολογία NFV, υπόσχεται στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών περισσότερη ευελιξία στο να διευρύνουν τις δυνατότητες του δικτύου τους και τις υπηρεσίες που προσφέρουν στους πελάτες τους. Επίσης, τους προσφέρει τη δυνατότητα να εγκαθιστούν νέες υπηρεσίες δικτύου ή να αναβαθμίζουν παλαιότερες πιο γρήγορα και φθηνότερα. Πιο συγκεκριμένα, για την επίτευξη των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω οι κατευθύνσεις για το NFV που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τη σχεδίαση του δικτύου είναι οι εξής [59]:

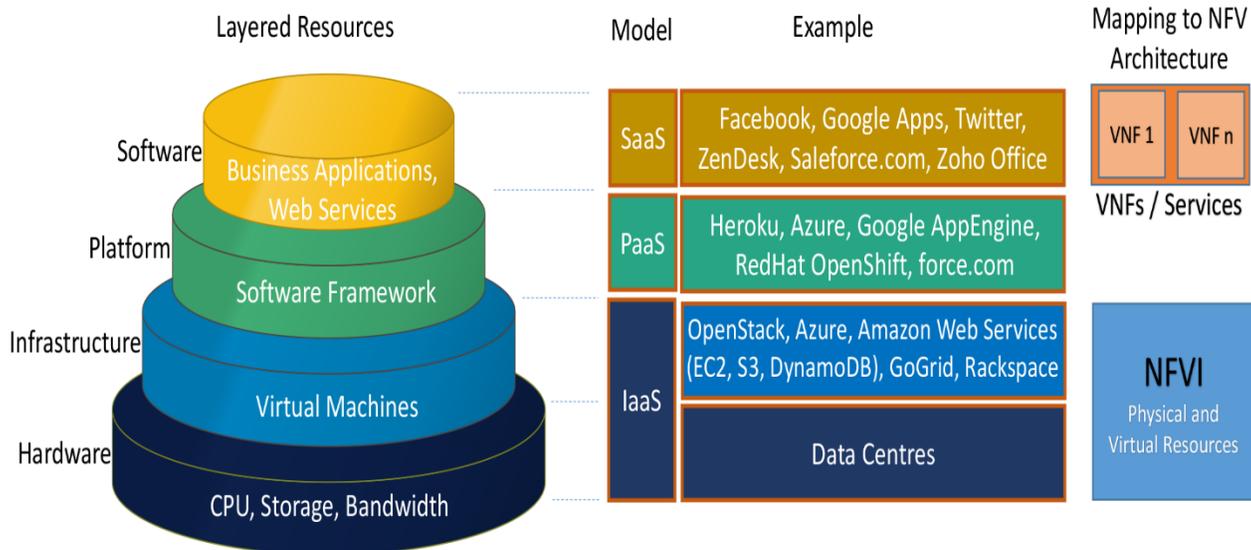
- Αποσύνδεση του Software με το Hardware: Εφόσον τα στοιχεία του δικτύου πλέον δεν θα αποτελούνται από μία σύνθεση ειδικού hardware και software, η υλοποίηση και η εξέλιξη του καθενός θα είναι ανεξάρτητη από του άλλου. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη διαφορετικών χρονοδιαγραμμάτων για την εγκατάσταση και συντήρηση του software και του hardware.
- Ευέλικτη εγκατάσταση Network Functions: Η απόσχιση του software από το hardware ευνοεί την ανακατανομή και το διαμοιρασμό των

πόρων της κοινής υποδομής, επιτρέποντας παράλληλα στο hardware και το software να εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες σε ποικίλες χρονικές στιγμές. Αυτό βοηθάει τους παρόχους να δημιουργήσουν νέες υπηρεσίες γρήγορα πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Έτσι, υπηρεσίες ή μέρος των υπηρεσιών αυτών μπορούν να δημιουργηθούν σε οποιαδήποτε συσκευή η οποία υποστηρίζει NFV και οι μεταξύ τους συνδέσεις να υλοποιηθούν με ευέλικτο τρόπο.

- **Dynamic Scaling:** Η δυνατότητα υλοποίησης της λειτουργίας μιας NF με μορφή λογισμικού προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον δυναμικό εφοδιασμό με πόρους μιας VNF, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δίκτυο κάθε στιγμή.

### *2.3.2 Αρχιτεκτονική και Business Model*

Η τεχνολογία Virtualization εξαλείφει την εξάρτηση μεταξύ μιας NF (Network Function) με το απαραίτητο εξειδικευμένο hardware για την υλοποίηση της -όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά φυσικά δίκτυα-, δημιουργώντας ένα περιβάλλον εκτέλεσης και διαχείρισης των interfaces για τις VNFs (Virtual Network Functions). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαμοιρασμό της φυσικής υποδομής (hardware) από διαφορετικές VNFs με την μορφή των Virtual Machines (VMs). Επιπλέον, η συγκέντρωση της συνολικής φυσικής υποδομής (hardware) ευνοεί τον μαζικό και εύκολο διαμοιρασμό της NFV υποδομής, σχηματίζοντας τους πόρους NFVI (Network Function Virtual Infrastructure), φαινόμενο που παρατηρείται και στο Cloud Computing όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 11 που ακολουθεί. Όπως και με τις υπηρεσίες του Cloud Computing, η τεχνολογία NFV δημιουργεί επιχειρηματικά μοντέλα και ευκαιρίες αντίστοιχα των IaaS, PaaS και SaaS του Cloud [42]. Για παράδειγμα, ο πάροχος μιας VNF δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιοκτήτης της VNF υποδομής που απαιτείται για την υλοποίηση και τη λειτουργία της VNF [58].



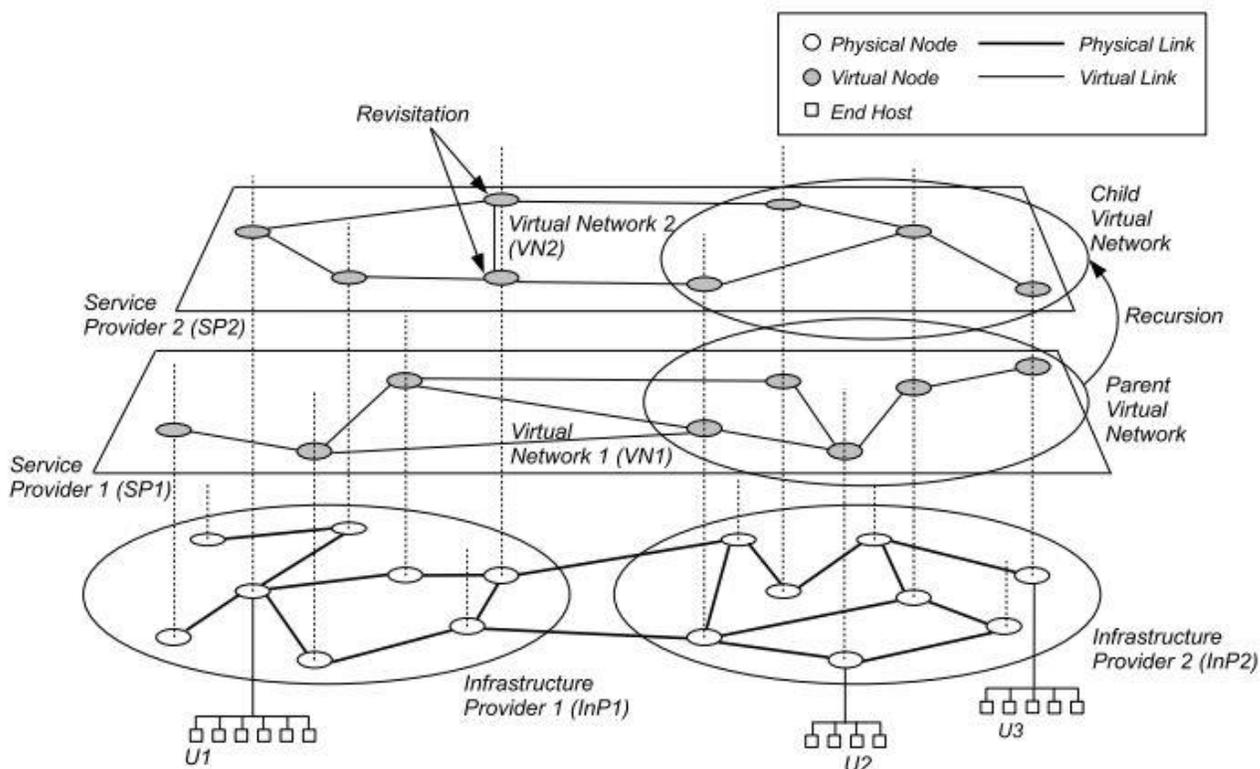
**Σχήμα 11: Μοντέλο Υπηρεσιών Cloud Computing και αντιστοίχισή τους στην Αρχιτεκτονική του NFV [59].**

Η τεχνολογία Network Virtualization, έρχεται να διαχωρίσει το ρόλο των παραδοσιακών ISPs (Internet Service Providers) και να δημιουργήσει δύο νέα επιχειρηματικά πεδία ανεξάρτητα μεταξύ τους: α) τους Infrastructure Providers (InPs), οι οποίοι διαχειρίζονται τη φυσική υποδομή του δικτύου (servers, storage, computing) και τους β) Service Provides (SPs), οι οποίοι δημιουργούν εικονικά δίκτυα (Virtual Networks) συναθροίζοντας πόρους από διαφορετικούς InPs και προσφέρουν end-to-end υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα [26, 59]:

- InPs: Οι InPs εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου, με τη μορφή data centers και φυσικών δικτύων. Πάνω σε αυτούς τους πόρους, υλοποιούνται οι εικονικοί πόροι οι οποίοι προσφέρονται σε διαφορετικούς SPs μέσω ενός προγραμματιζόμενου interface. Επίσης οι InPs, μπορούν να αποφασίσουν με ποιο τρόπο θα διατεθούν οι διαθέσιμοι διαμοιραζόμενοι πόροι στους SPs. Ένας InP μπορεί να χρησιμοποιεί δημόσια data centers όπως αυτά που χρησιμοποιεί η Amazon ή ιδιωτικούς servers όπως διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι. Αν ένας InP δεν είναι ικανός να προσφέρει τους απαραίτητους πόρους σε έναν SP για να υλοποιήσει την υπηρεσία του, μπορούν να γίνουν συμφωνίες έτσι ο SP να λαμβάνει πόρους από 2 διαφορετικούς InPs προκειμένου να συμπληρώσει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων, δημιουργώντας έτσι multi-domain VNFs.
- SPs: Οι πάροχοι υπηρεσιών νοικιάζουν πόρους από πολλαπλούς InPs προκειμένου να δημιουργήσουν και να εγκαταστήσουν εικονικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας τους διαμοιραζόμενους πόρους που τους δόθηκαν για να προσφέρουν στους πελάτες τους end-to-end υπηρεσίες. Κάθε εικονικό δίκτυο αποτελείται από εικονικούς κόμβους οι οποίοι συνδέονται με virtual links. Ένας εικονικός κόμβος είναι ένα στοιχείο λογισμικού που εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης. Ένα virtual link

είναι μια λογική σύνδεση μεταξύ 2 εικονικών κόμβων, η οποία διαθέτει δυνατότητα να αλλάζει με δυναμικό τρόπο τις ιδιότητες της. Κάθε εικονικός κόμβος φιλοξενείται σε ένα φυσικό κόμβο ενώ κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα εικονικά δίκτυα, διαμοιράζοντας τους πόρους τους σε άλλους SPs δίνοντας τους την εικόνα ότι πρόκειται για έναν εικονικό InP. Ένας SP μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε άλλους SPs. Ακόμη οι πάροχοι υπηρεσιών προσφέρουν υλοποιήσεις software για NFs.

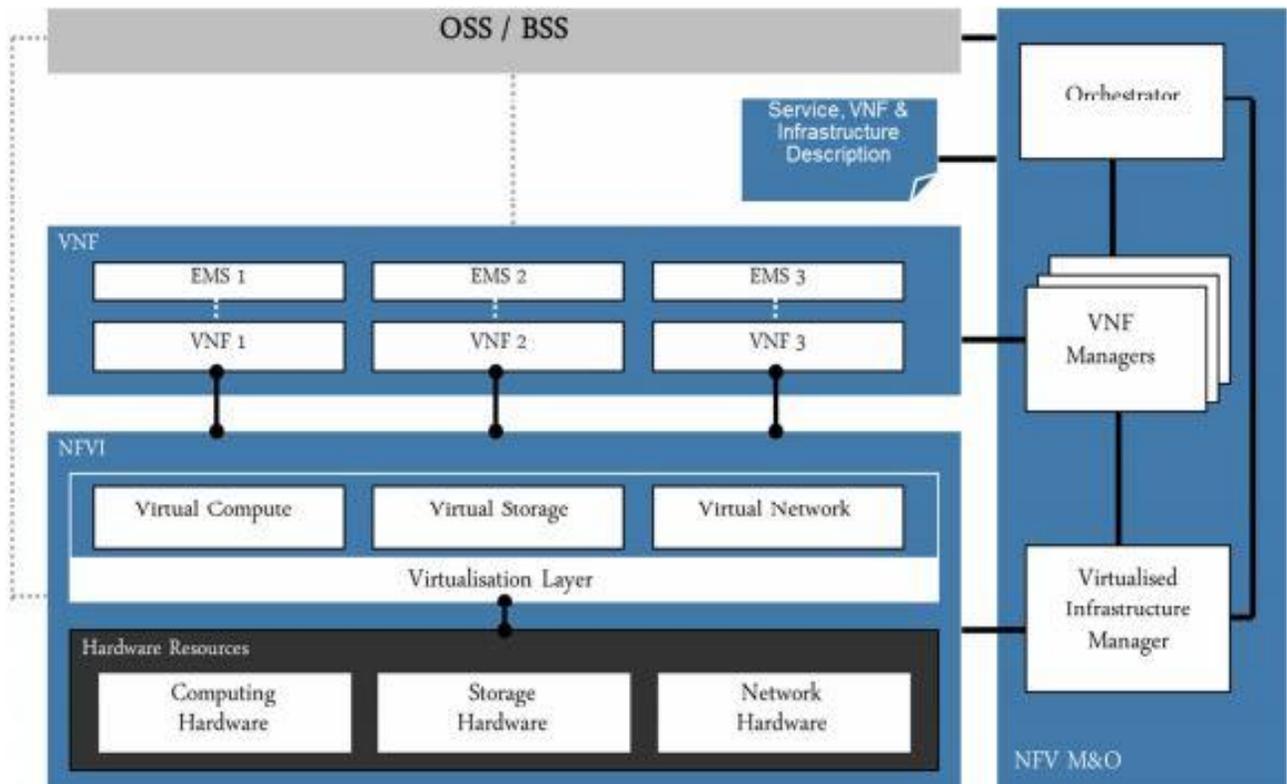
Στο Σχήμα 12, μπορούμε να δούμε ένα Network Virtualization περιβάλλον, που περιλαμβάνει τόσο φυσικούς όσο και εικονικούς παρόχους καθώς και τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους.



**Σχήμα 12: Ένα Network Virtualization Περιβάλλον [26].**

Επιπροσθέτως, η δυνατότητα να εγκαθιστούμε και να τρέχουμε εξ' αποστάσεως VNFs χρησιμοποιώντας τις NFV υποδομές που προσφέρονται από διαφορετικούς SPs, επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών σε παγκόσμιο επίπεδο αφού δεν υπάρχουν χωροταξικοί περιορισμοί. Σύμφωνα με τον οργανισμό ETSI, η αρχιτεκτονική του NFV αποτελείται από 3 επίπεδα: α) Network Function Virtualization Infrastructure (NFVI), β) Virtual Network Functions (VNFs) και γ) NFV Management And Orchestration (NFV MANO). Ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των επιπέδων της αρχιτεκτονικής του NFV [26, 58, 59]:

- **NFV Infrastructure (NFVI):** Το NFVI αποτελείται από πόρους είτε υπό τη μορφή software είτε υπό τη μορφή hardware, οι οποίοι συγκεντρώνονται προκειμένου να σχηματίσουν το περιβάλλον στο οποίο θα εγκατασταθούν οι VNFs. Οι φυσικοί πόροι περιλαμβάνουν Commercial-off-the-shelf (COTS) hardware (servers), αποθηκευτικούς χώρους και δικτυακά στοιχεία (π.χ. κόμβοι, links), τα οποία συγκεντρώνονται προκειμένου να προσφέρουν υπολογιστική ισχύ, συνδεσιμότητα και αποθηκευτικό χώρο στις VNFs. Οι εικονικοί πόροι (virtual resources) δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ένα Virtualization Layer, το οποίο βασίζεται σε έναν hypervisor ο οποίος υλοποιεί τους εικονικούς πόρους χρησιμοποιώντας την υποδομή φυσικών πόρων του από κάτω επιπέδου. Σε ένα data center, οι πόροι αναπαρίστανται με τη μορφή μιας ή περισσότερων Virtual Machines (VMs), ενώ τα εικονικά δίκτυα αποτελούνται από εικονικούς κόμβους και virtual links.
- **VNFs και υπηρεσίες:** Η VNF είναι υλοποίηση υπό μορφή λογισμικού μιας λειτουργίας του δικτύου. Αυτή η υλοποίηση τρέχει βασιζόμενη στην NFVI υποδομή, δηλαδή είναι υλοποίηση μιας NF όπου εγκαθίσταται σε εικονικούς πόρους π.χ. μια Virtual Machine. Συνήθως οι VNFs συνοδεύονται από ένα Element Management System (EMS), το οποίο διαχειρίζεται τη συγκεκριμένη VNF. Η VNF έρχεται να εκτελέσει τις λειτουργίες ενός παραδοσιακού κόμβου δικτύου υπό τη μορφή software, απαλλάσσοντας τους από το hardware. Μια VNF μπορεί να υλοποιείται χρησιμοποιώντας παραπάνω από μια VMs, όπου σε αυτή την περίπτωση κάθε VM φιλοξενεί ένα διαφορετικό συστατικό στοιχείο της VNF. Μια υπηρεσία που προσφέρεται από έναν SP, αποτελείται από την σύνθεση μίας ή περισσότερων VNFs οι οποίες τρέχουν σε VMs.
- **NFV Management and Orchestration (NFV MANO):** Εδώ γίνεται η πρόβλεψη και η διαχείριση των απαραίτητων πόρων για τον εφοδιασμό των VNFs καθώς και λειτουργίες όπως οι τροποποιήσεις αυτών των VNFs ή τροποποιήσεις στις υποδομές που αυτές χρησιμοποιούν. Περιλαμβάνει επίσης την οργάνωση και τη διαχείριση των φυσικών/εικονικών πόρων και συνεισφέρει στο virtualization της φυσικής υποδομής. Επιπλέον, περιλαμβάνονται βάσεις δεδομένων οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση πληροφοριών και μοντέλων, τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες των VNFs και των εικονικών πόρων, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Γενικότερα, το NFV MANO εστιάζει στις εργασίες διαχείρισης που αφορούν το virtualization ενός δικτύου. Ακόμη, καθορίζει interfaces οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των εσωτερικών μηχανισμών του MANO αλλά και για την επικοινωνία και τη συνεργασία με τα συστήματα διαχείρισης των παραδοσιακών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να επικοινωνεί και να συνεργάζεται με τα Operating Support Systems (OSS) και τα Business Support Systems (BSS), επιτρέποντας έτσι για διαχείριση τόσο των VNFs αλλά και των λειτουργιών που τρέχουν στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα. Στο Σχήμα 13, απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός VNF περιβάλλοντος εργασίας.



**Σχήμα 13: Η αρχιτεκτονική ενός NFV περιβάλλοντος εργασίας [58].**

### 2.3.3 Προσδοκώμενα Οφέλη

Το NFV σύμφωνα με τον οργανισμό ETSI, θα αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στους παρόχους που θα υιοθετήσουν την τεχνολογία αυτή και μερικά από αυτά θα αναφερθούν παρακάτω [16]:

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

περιορισμούς που προκύπτουν από την ανάγκη ιδιοκτησίας εξειδικευμένου hardware για την υποστήριξη υπηρεσιών.

Όπως θα δούμε και σε επόμενα κεφάλαια, το NFV θα παίξει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς τόσο όσο αφορά το Δίκτυο Κορμού (EPC) όσο και το RAN. Η ανάγκη για real time υπηρεσίες, για online και on-demand υπηρεσίες και γενικότερα η ικανοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του 5G πιέζει προς την κατεύθυνση της αλλαγής του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζουμε τα δίκτυα. Η ανεξαρτητοποίηση του software από το hardware των δικτυακών συσκευών αποτέλεσε το προοίμιο για την δημιουργία μιας νέας τεχνολογίας η οποία διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου του δικτύου από το επίπεδο μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία αυτή ονομάστηκε Software Defined Networking και σε συνδυασμό με το NFV και το Cloud Computing θα παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στα δίκτυα 5G, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια.

## 2.4 Software Defined Networking

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω οι στόχοι που έχουν τεθεί για τα 5G δίκτυα, απαιτούν την εισαγωγή νέων τεχνολογιών που αφορούν τον σχεδιασμό αλλά και την διαχείριση των ασύρματων δικτύων. Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των έξυπνων συσκευών, η ανάγκη για αποδοτική εκμετάλλευση των υπαρχόντων πόρων, το IoT κ.α., καθιστούν επιτακτική ανάγκη την πραγμάτωση σημαντικών αλλαγών στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τις τηλεπικοινωνίες μέχρι σήμερα.

Η χρήση των Small Cells και της τεχνολογίας Ultra Dense Deployments είναι το πρώτο βήμα προς την ικανοποίηση των απαιτήσεων του 5G σε πόρους και σε RANs. Όπως αναφέραμε πιο πάνω, τα Small Cells λειτουργούν σαν σταθμοί βάσης χαμηλής κατανάλωσης, όπου τοποθετούνται μαζί με τα παραδοσιακά Macrocells σε περιοχές όπου παρεβρίσκονται πολλοί χρήστες, προκειμένου να αυξήσουν τον αριθμό των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετούνται στις περιοχές αυτές. Ωστόσο, η τεχνολογία των Small Cells παρά την επέκταση του διαθέσιμου φάσματος που επιτυγχάνει, εισάγει και προβληματισμούς σχετικά με την διαχείριση των πόρων ασύρματης πρόσβασης καθώς και με τις παρεμβολές μεταξύ των cells τα οποία δεν είναι στατικά ούτε ομογενή. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να προκληθούν παρεμβολές μεταξύ των Small Cells και των Macrocells ή ακόμα παρεμβολές και μεταξύ Small Cells.

Τα μελλοντικά δίκτυα και οι διατιθέμενες από αυτά υπηρεσίες, θα πρέπει όχι απλώς να ορίζονται με τη χρήση software αλλά να μπορούν να προγραμματίζονται και να είναι ικανά να υποστηρίζουν πολλούς διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών στους οποίους θα ανατίθενται δυναμικά πόροι, ενώ παράλληλα θα απλοποιείται η διαχείριση της ετερογενούς υποδομής του δικτύου. Η ανάγκη να αντιμετωπίσουμε τα παραπάνω προβλήματα αλλά και να έχουμε αποδοτική εφαρμογή των Small Cells, μας οδήγησε στο σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής όπου οι σταθμοί βάσης του δικτύου θα είναι άμεσα προγραμματιζόμενοι και θα υπάγονται υπό το λογικό έλεγχο ενός κεντρικοποιημένου ελεγκτή. Με γνώμονα την παραπάνω «διάταξη» δημιουργήθηκε η

τεχνολογία SDN η οποία έρχεται για να επαναπροσδιορίσει τον τρόπο που σχεδιάζαμε τα δίκτυα έως σήμερα.

Ο οργανισμός Open Networking Foundation (ONF) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που χρηματοδοτείται από μεγάλες εταιρείες όπως η Deutsche Telekom, η Microsoft, η Google κ.α., οι οποίες μέσω του ONF στοχεύουν στη βελτίωση των δικτυακών υπηρεσιών με τη χρήση του SDN και την τυποποίηση του πρωτοκόλλου OpenFlow [65]. Σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, σε ένα SDN δίκτυο η διαχείριση του δικτύου (που βασίζεται στο software) και τα επίπεδα προώθησης δεδομένων (που βασίζονται στο hardware) διαχωρίζονται, με σκοπό η υποδομή του δικτύου να είναι ανεξάρτητη από τις λειτουργίες του δικτύου [63].

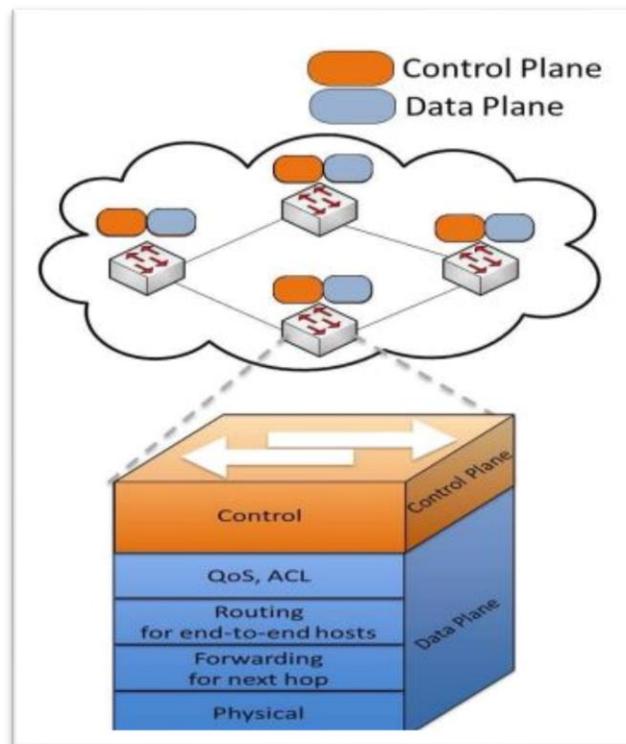
Πιο συγκεκριμένα, το SDN διαχωρίζει το επίπεδο διαχείρισης του δικτύου από το επίπεδο προώθησης των πακέτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η διαχείριση του δικτύου να μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας προγραμματιζόμενης διεπαφής (π.χ. OpenFlow) και η hardware υποδομή του δικτύου να αποτελείται απλώς από συσκευές προώθησης πακέτων, οι οποίες μπορούν να προγραμματιστούν. Το επίπεδο διαχείρισης του SDN μπορεί να υλοποιηθεί με τη μορφή software το οποίο τρέχει σε απλούς servers, ενώ το επίπεδο προώθησης ίσως να απαιτεί εξειδικευμένο hardware. Η τεχνολογία SDN ωστόσο δίνει τη δυνατότητα το επίπεδο προώθησης πακέτων κατά περιπτώσεις να υλοποιηθεί σε μη εξειδικευμένο hardware, όπως π.χ. virtual switches [59]. Το επίπεδο διαχείρισης του δικτύου, επιτρέπει κεντρική διαχείριση και αλληλεπίδραση με τα switches του επιπέδου προώθησης πακέτων μέσω ενός API (Application Programmable Interface), το οποίο καλείται "Southbound API". Επιπλέον, μέσω του "Northbound API", όπου βρίσκεται «πάνω» από τον κεντρικό ελεγκτή του δικτύου είναι δυνατή η υλοποίηση λειτουργιών δικτύου με τη μορφή SDN εφαρμογών. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε περαιτέρω την αρχιτεκτονική του SDN καθώς και τα πολλαπλά οφέλη που θα αποφέρει η ενσωμάτωση του στο σχεδιασμό των 5G δικτύων [21, 61].

Σε ένα SDN δίκτυο για παράδειγμα, οι αποφάσεις που αφορούν διαχείριση των διαθέσιμων πόρων ή την αλληλεπίδραση με τα switches του επιπέδου προώθησης πακέτων λαμβάνονται από τον SDN-controller, ο οποίος αποτελεί τον εγκέφαλο του δικτύου και επικοινωνεί με τα switches μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow. Οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου σχετίζονται κυρίως με τις ροές δεδομένων, με τη διαχείριση των ουρών και με την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση ports, ενώ οι εφαρμογές οι οποίες τρέχουν «πάνω» από τον controller όπως αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να υλοποιηθούν από διαφορετικούς παρόχους. Παρά τις αρχικές του προδιαγραφές, το SDN εξελίχθηκε προκειμένου να προσφέρει στο δίκτυο μεγαλύτερη απόδοση, απομακρυσμένη διαχείριση και να προσφέρει δυνατότητες προγραμματισμού σε φυσικούς ή ιδεατούς σταθμούς βάσης. Στόχος του ONF είναι το SDN να μπορέσει να ανταποκριθεί σε απαιτήσεις όπως η επεκτασιμότητα, η απόδοση και η δυνατότητα να προσαρμόζεται σε ένα περιβάλλον στο οποίο διαφορετικοί SDN- controllers ή διαφορετικά SDN-δίκτυα θα μπορούν να συνυπάρχουν. Σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, το SDN έρχεται για να ανατρέψει την στατική αρχιτεκτονική των σημερινών δικτύων η οποία αποτελεί τροχοπέδη στην ανάγκη για δυναμική δέσμευση πόρων και το διαμοιρασμό τους, τα οποία είναι απαραίτητα χαρακτηριστικά των 5G δικτύων.

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών NFV και SDN, φαίνεται ότι οδηγεί στη διαμόρφωση ενός νέου επιχειρηματικού περιβάλλοντος δημιουργώντας ευκαιρίες για δικτυακούς παρόχους, Service Providers, Web Developers και για παρόχους εξοπλισμού. Πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε, ότι οι τεχνολογίες SDN και NFV, η οποία αποτελεί έναν τρόπο για την δημιουργία εικονικών λειτουργιών του δικτύου οι οποίες εκτελούνται σε απλούς servers, δεν πρέπει να μπερδεύονται. Ο συνδυασμός τους μπορεί να αποφέρει πολλά οφέλη τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια ωστόσο οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι μεταξύ τους διαφορετικές και ανεξάρτητες [61, 63].

#### 2.4.1 Στόχοι και Γενικά Χαρακτηριστικά

Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς είναι αναπόφευκτη, λόγω της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας αλλά και της διαρκούς ανάγκης για μείωση του συνολικού κόστους του δικτύου, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος μέσω της χρήσης απλοποιημένου hardware, της χρήσης software αλλά και με την ανάπτυξη νέων τεχνικών διαχείρισης του δικτύου. Η τεχνολογία SDN όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω βασίζεται στο διαχωρισμό του επιπέδου διαχείρισης του δικτύου από το επίπεδο προώθησης των πακέτων δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 που ακολουθεί, το επίπεδο διαχείρισης ασχολείται με διαδικασίες όπως η εγκαθίδρυση ή η επιλογή της κατάλληλης διαδρομής για να γίνει δρομολόγηση των δεδομένων, ή η εγκαθίδρυση και συντήρηση νέων συνόδων. Το επίπεδο προώθησης δεδομένων αποτελείται από τις συσκευές προώθησης πακέτων π.χ. switches, είτε αυτά είναι φυσικές συσκευές είτε αυτά είναι virtual (VSwitches) [64].



**Σχήμα 14: Control και Data Plane χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας SDN [64].**

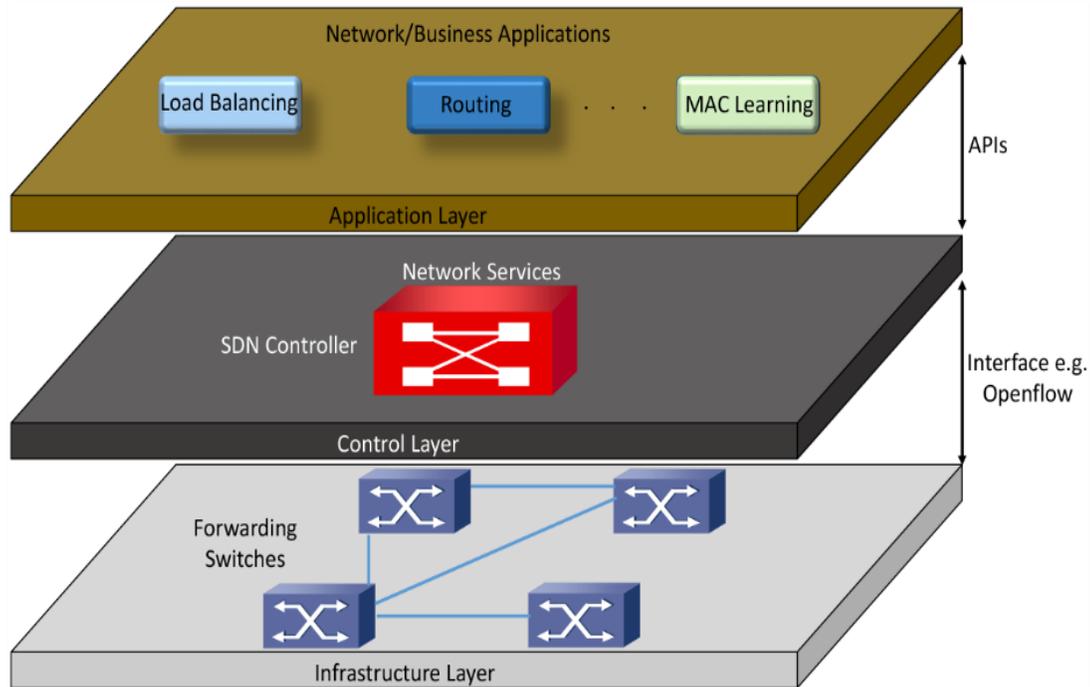
Ένα νέο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας SDN είναι το γεγονός ότι η νοημοσύνη του δικτύου βρίσκεται λογικά κεντριοποιημένη στον SDN-controller, ο οποίος λαμβάνει το ρόλο του εγκεφάλου του δικτύου διατηρώντας παράλληλα μια ολιστική εικόνα της γεωγραφίας του δικτύου. Ο κεντρικός έλεγχος του δικτύου αποτελεί κλειδί για τον εύκολο προγραμματισμό των διαδικασιών που πρέπει να επιτελέσει το δίκτυο, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αλλαγή πολιτικών δρομολόγησης "on the fly" και ανοίγει το δρόμο για την εισαγωγή του traffic engineering κατά την μετάδοση πακέτων προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του δικτύου. Όσο αφορά την επικοινωνία μεταξύ του SDN-controller και των Switches (Data Plane), αυτή πραγματοποιείται μέσω της χρήσης του πρωτοκόλλου OpenFlow, όπου αποτελεί μια διεπαφή η οποία ελέγχει εξ'αποστάσεως τους πίνακες δρομολόγησης των switches, των routers και των άλλων συσκευών δρομολόγησης. Βλέπουμε λοιπόν ότι η ευθύνη για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη δρομολόγηση των πακέτων, μεταφέρεται από τις συσκευές δρομολόγησης και κατ'επέκταση από το επίπεδο προώθησης δεδομένων, στο επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης, γεγονός που θα αναλυθεί περισσότερο παρακάτω που θα παρουσιάσουμε τη γενική αρχιτεκτονική ενός SDN δικτύου [65, 66].

Σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, τα βασικά χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες που πρέπει να ικανοποιεί μια SDN αρχιτεκτονική είναι τα εξής [59, 65]:

- **Programmability:** Η τεχνολογία SDN κάνει τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου άμεσα προγραμματιστική, αφού οι λειτουργίες που αφορούν τη διαχείριση του δικτύου έχουν διαχωριστεί από τις λειτουργίες που αφορούν την προώθηση των πακέτων δεδομένων. Αυτή η δυνατότητα προγραμματισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της διαμόρφωσης του δικτύου, αφού οι διαχειριστές του δικτύου θα μπορούν να τρέχουν εφαρμογές SDN οι οποίες θα έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων υπηρεσιών του δικτύου.
- **Agility:** Ο διαχωρισμός του ελέγχου από την προώθηση των πακέτων δίνει στους διαχειριστές τη δυνατότητα να ρυθμίζει δυναμικά τη ροή κυκλοφορίας δεδομένων διαμέσου του δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες και την κατάσταση που βρίσκεται το δίκτυο κάθε στιγμή (traffic engineering). Επιπλέον, το γεγονός ότι πλέον ο έλεγχος του επιπέδου προώθησης δεδομένων πραγματοποιείται υπό τη μορφή software που τρέχει σε απλούς servers, δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στους διαχειριστές αφού αναβαθμίζονται πολύ πιο εύκολα και έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής από εξειδικευμένες συσκευές «κλειστού» hardware. Αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα τη μείωση, τόσο του κεφαλαιακού όσο και του λειτουργικού κόστους διαχείρισης του δικτύου, αφού η απαγκίστρωση από εξειδικευμένες συσκευές ανοίγει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες και κάνει την αγορά πιο ανταγωνιστική.
- **Centrally Managed:** Η νοημοσύνη του δικτύου βρίσκεται κεντριοποιημένη σε SDN-controllers μέσω των οποίων υπάρχει ενιαίος έλεγχος των διαθέσιμων πόρων (π.χ. επεξεργαστική ισχύς, μνήμη κλπ.) και δίνεται η δυνατότητα για δυναμική δέσμευση πόρων "on the fly" αλλά και για εύκολη διαχείριση χιλιάδων συσκευών.

- Open standards-based and vendor-neutral: Όταν υλοποιείται με χρήση ανοιχτού λογισμικού, το SDN απλοποιεί τη σχεδίαση και τη λειτουργία του δικτύου, επειδή οι αποφάσεις λαμβάνονται κεντρικά από τους SDN-controllers αντί για πολλούς και διαφορετικούς παρόχους, διαφορετικές συσκευές και διαφορετικά πρωτόκολλα.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το SDN και το NFV έχουν πολλά κοινά αφού και οι δύο τεχνολογίες κινούνται προς την κατεύθυνση υιοθέτησης ανοιχτού λογισμικού και συμβατικού hardware δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, με τον ίδιο τρόπο που το NFV στοχεύει στο να τρέχουν NFs σε συμβατικό hardware, στο SDN το επίπεδο διαχείρισης μπορεί να υλοποιηθεί υπό τη μορφή software που τρέχει σε συμβατικό hardware. Το SDN θα επιταχύνει την εγκαθίδρυση του NFV προσφέροντας έναν ευέλικτο και αυτοματοποιημένο τρόπο συσχέτισης των λειτουργιών του δικτύου με τον αποδοτικό διαμορισμό των διαθέσιμων πόρων. Στο Σχήμα 15, παρουσιάζεται μια απεικόνιση των λογικών στρώματων του SDN έτσι ώστε να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί.



**Σχήμα 15: Λογικά Στρώματα σε μια SDN Αρχιτεκτονική [59].**

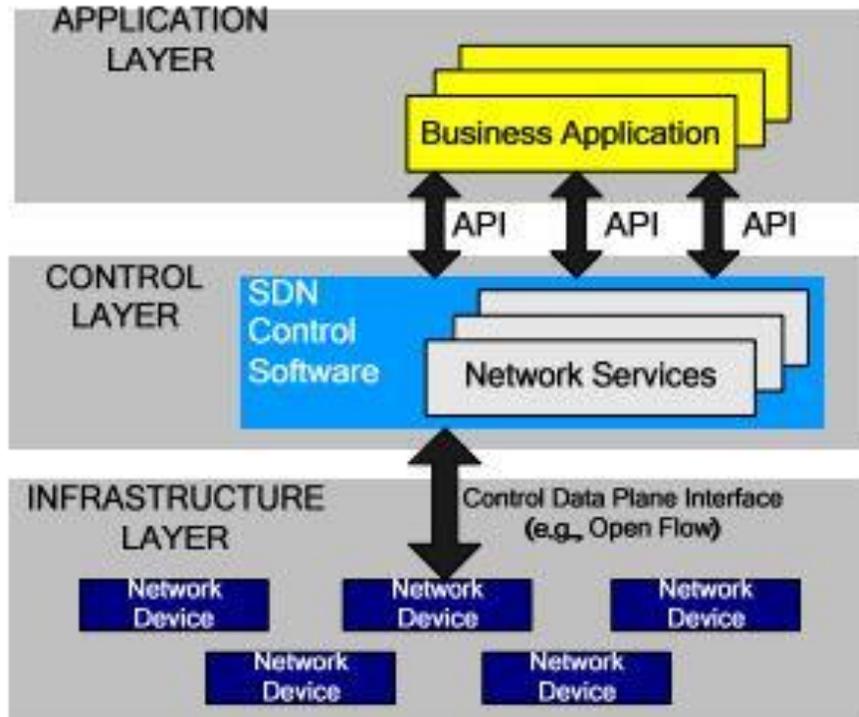
## 2.4.2 Αρχιτεκτονική SDN Δικτύου

Ο διαχωρισμός του ελέγχου από τις συσκευές προώθησης πακέτων, όπου μέχρι πρότινος ήταν στενά συνδεδεμένος με τις δικτυακές συσκευές, επιτρέπει την αξιοποίηση των δικτυακών συσκευών ανεξαρτήτως της φυσικής τους υπόστασης, την απομακρυσμένη διαχείρισή τους και τον χειρισμό τους ως εικονικές οντότητες. Αυτό επιτρέπει στους network operators να διαχωρίζουν σε slices το υπάρχον δίκτυο και να δημιουργούν λογικές υπό-οντότητες του δικτύου (virtual networks). Ο διαχωρισμός του Control Plane και του Data Plane αίρει πολλούς περιορισμούς που δημιουργούνταν από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική των δικτύων όπως [64]:

- Η κλειστή αρχιτεκτονική, καθώς κάθε συσκευή διαθέτει δικό της λογισμικό, δικούς της μηχανισμούς διαμόρφωσης και δικές του παραμέτρους.
- Περιορισμένη καινοτομία, γιατί είναι δύσκολο να εισαχθεί νέο λογισμικό ή να προσφερθούν νέες υπηρεσίες χωρίς την επένδυση του παρόχου. Οι ίδιοι οι πάροχοι ελέγχουν το ρυθμό της καινοτομίας, ενώ παράλληλα ενυπάρχει και το πρόβλημα να επιτευχθεί διαλειτουργικότητα μεταξύ των υποδομών όλων των διαφορετικών παρόχων.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα του δικτύου και μικρός βαθμός ευελιξίας, αφού για εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών απαιτούνται αλλαγές σε χιλιάδες συσκευές γεγονός που αυξάνει πολύ το κόστος.

Η ανάγκη λοιπόν για την επικράτηση του SDN γίνεται όλο και πιο επιτακτική γεγονός που οδήγησε στην δημιουργία ενός προτύπου αρχιτεκτονικής και όπως φαίνεται στο Σχήμα 16 και σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, η αρχιτεκτονική του SDN μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα [62]:

- Infrastructure Layer: Το επίπεδο αυτό αποτελείται από πολλές δικτυακές συσκευές όπως routers, switches κλπ. Αυτές οι συσκευές απαιτείται να μπορούν να υποστηρίξουν την τεχνολογία SDN προκειμένου να μπορεί να λαμβάνει σήματα και να επικοινωνεί με το παραπάνω επίπεδο. Δεν υπάρχει μεταξύ των δικτυακών συσκευών καμία ανταλλαγή σήματος, αφού όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται από τον SDN-controller.
- Control Layer: Το επίπεδο αυτό αποτελεί τον εγκέφαλο του συστήματος, αφού εδώ υλοποιείται ο SDN-controller. Πολλοί αλγόριθμοι υλοποιούνται σε έναν ελεγκτή του δικτύου, ο οποίος λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν τη δρομολόγηση, το traffic engineering κλπ.
- Application Layer: Το πεδίο αυτό περιέχει τις διεπαφές που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του χρήστη με τη μορφή εφαρμογών.



**Σχήμα 16: Η αρχιτεκτονική του SDN όπως έχει οριστεί από τον οργανισμό ONF [62].**

Το Σχήμα 16 αποτελεί την επίσημη απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του SDN από τον οργανισμό ONF, ωστόσο στις περισσότερες αναφορές είδαμε τα επίπεδα του SDN να χρησιμοποιούν διαφορετικές ονομασίες. Για αυτό πιο κάτω θα κάνουμε μια πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση των επιπέδων του SDN [59, 62, 64]:

- **SDN-Controller:** Ασχολείται με τις λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου, όπως για παράδειγμα διάφορα APIs, το λειτουργικό σύστημα του δικτύου και τη συντήρηση της πλήρους εικόνας για την κατάσταση που βρίσκεται το δίκτυο (π.χ. OpenDaylight κλπ.).
- **Southbound part:** Προσφέρει μια διεπαφή και ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του controller και της διαθέσιμης υποδομής προώθησης πακέτων, δεδομένου ότι η υποδομή υποστηρίζει την τεχνολογία SDN. Το πιο γνωστό πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του controller και του Southbound part είναι το OpenFlow. Το πρωτόκολλο OpenFlow είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση συγκεκριμένων switches προκειμένου να δημιουργηθεί η προεπιλεγμένη από τον controller διαδρομή δρομολόγησης και γενικότερα είναι το μέσο χάρη στο οποίο ο SDN-controller αποκτά πρόσβαση στα φυσικά ή virtual switches, routers κλπ. Το OpenFlow ήταν το πρώτο πρωτόκολλο επικοινωνίας που δημιουργήθηκε για την επικοινωνία μεταξύ controller και των επιπέδων προώθησης πακέτων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για να ανιχνευτούν οι ροές δεδομένων προκειμένου ο controller να μπορεί να βγάλει συμπεράσματα για την κίνηση που επικρατεί στο δίκτυο τη δεδομένη

στιγμή και να μπορέσει δυναμικά να επέμβει προκειμένου να λειτουργήσει πιο αποδοτικά το δίκτυο.

- Northbound part: Προσφέρει μια διεπαφή μεταξύ controller και εφαρμογών SDN, οι οποίες τρέχουν πάνω από αυτόν. Οι εφαρμογές αυτές είναι το μέσο που χρησιμοποιείται για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών.

### 2.4.3 Προσδοκώμενα Οφέλη

Εφόσον αναλύσαμε τα βασικά χαρακτηριστικά και την αρχιτεκτονική, πρέπει να δούμε και τα οφέλη που προσδοκούμε από την υιοθέτηση της τεχνολογίας SDN στη σχεδίαση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Τα οφέλη της τεχνολογίας SDN θα είναι ακόμη πιο ορατά σε συνδυασμό με τις άλλες τεχνολογίες που αναφέραμε πιο πάνω, δηλαδή το Cloud-RAN και το NFV όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια.

Πιο συγκεκριμένα όμως, η υιοθέτηση της τεχνολογίας SDN προσφέρει τα παρακάτω οφέλη [64, 67, 78]:

- Programmability: Τα SD-switches (Software Defined Switches) μπορούν να επαναπρογραμματίζονται "on-the-fly" με το να τους ανατίθενται δυναμικά δικτυακοί πόροι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα, να μειώνονται τα σφάλματα και να αποφεύγονται τα μπερδέματα όσο αφορά τη διαμόρφωση των συσκευών. Επιπλέον, απλοποιείται η εγκατάσταση, η συντήρηση αλλά και η αναβάθμιση του δικτύου. Τέλος, είναι δυνατή η δημιουργία νέων εφαρμογών χωρίς την ανάγκη για την πραγματοποίηση επενδύσεων από την πλευρά του παρόχου, ενώ ενισχύεται και η καινοτομία.
- Openness: Το SDN όπως αναφέραμε και πιο πάνω, είναι μια τεχνολογία επιχειρηματικά ουδέτερη η οποία δημιουργεί πολλές νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες λόγω του γεγονότος ότι απαγκιστρώνει το software από το hardware και έτσι μπορούν εξειδικευμένες λειτουργίες να τρέχουν σε συμβατικούς servers οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι σε Data Centers. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τόσο τη μείωση του κεφαλαιακού κόστους (CAPEX) όσο και τη μείωση του κόστους για συντήρηση του δικτύου. Τόσο οι Northbound όσο και οι Southbound διεπαφές του SDN-controller είναι standard αλλά δεν αποτελούν κλειστό λογισμικό.
- Cooperativeness: Οι αποφάσεις που αφορούν τις λειτουργίες του δικτύου όπως π.χ. δρομολόγηση όλων των SD-switches, πραγματοποιούνται στον SDN-controller. Αυτή η κεντρική διαχείριση έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση στο συντονισμό των SD-switches προκειμένου αυξηθεί η απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, ενισχύεται η καθολική εικόνα που έχει ο controller για την κατάσταση του δικτύου κάθε στιγμή, δίνοντάς του τη δυνατότητα να εκτιμά την κίνηση στο δίκτυο και να αποσυμφωνεί κάποια virtual links ή να προσφέρει ακόμη περισσότερους πόρους προκειμένου να διασφαλίζεται το QoS.

- **Virtualizability:** Πολλαπλά εικονικά δίκτυα (VNs) μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα μοναδικό SDN. Κάθε VN έχει τον έλεγχο των δικών του λειτουργιών και λειτουργεί με τα δικά του πρωτόκολλα, χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση με τα άλλα Virtual Networks. Σε κάθε Virtual Network ανατίθενται δυναμικά οι πόροι που απαιτούνται κάθε στιγμή.

Κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες, η πρόοδος της τεχνολογίας IT, το υψηλό κόστος του εξειδικευμένου hardware αλλά και η δυνατότητα χρήσης ανοικτού λογισμικού καθοδηγούν στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών στα μελλοντικά δίκτυα. Παραδείγματα όπως το SDN και το NFV αποτελούν το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση και θεωρείται ότι θα παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Οι τεχνολογίες αυτές όπως θα δούμε παρακάτω θα χρησιμοποιηθούν τόσο στη σχεδίαση των RANs όσο και στη σχεδίαση του δικτύου κορμού των 5G δικτύων, με κύριο γνώμονα την εύρεση της χρυσής τομής μεταξύ της μείωσης του κόστους και της διατήρησης του απαιτούμενου QoS.

## 2.5 Cloud Computing

Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, εκτιμάται ότι θα φέρουν την επανάσταση στον τομέα ICT καθώς θα προσφέρουν ένα σύνολο πολύ αξιόπιστων και καινοτόμων υπηρεσιών για όλους καθώς θα εισάγουν έννοιες όπως το "All as a Service" [15], "Full Immersive experience", "Network Intelligence" και θα ξεφύγουν από το σημερινό Client-Server μοντέλο [28]. Προκείμενου λοιπόν να γίνουν πραγματικότητα τα παραπάνω αλλά και να ικανοποιηθούν οι στόχοι του 5GPPP, απαιτείται επανασχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του δικτύου, των διαθέσιμων υπηρεσιών και των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι νέες υποδομές, των λειτουργιών του δικτύου κ.α. Επιπλέον, στην προσπάθεια τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς να γίνουν πιο ευέλικτα, να μειωθεί το λειτουργικό κόστος καθώς και να υπάρχει ένας κεντρικός έλεγχος του δικτύου πρόσβασης, η υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το Cloud Computing θα αποτελέσουν ορόσημο για τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς [14].

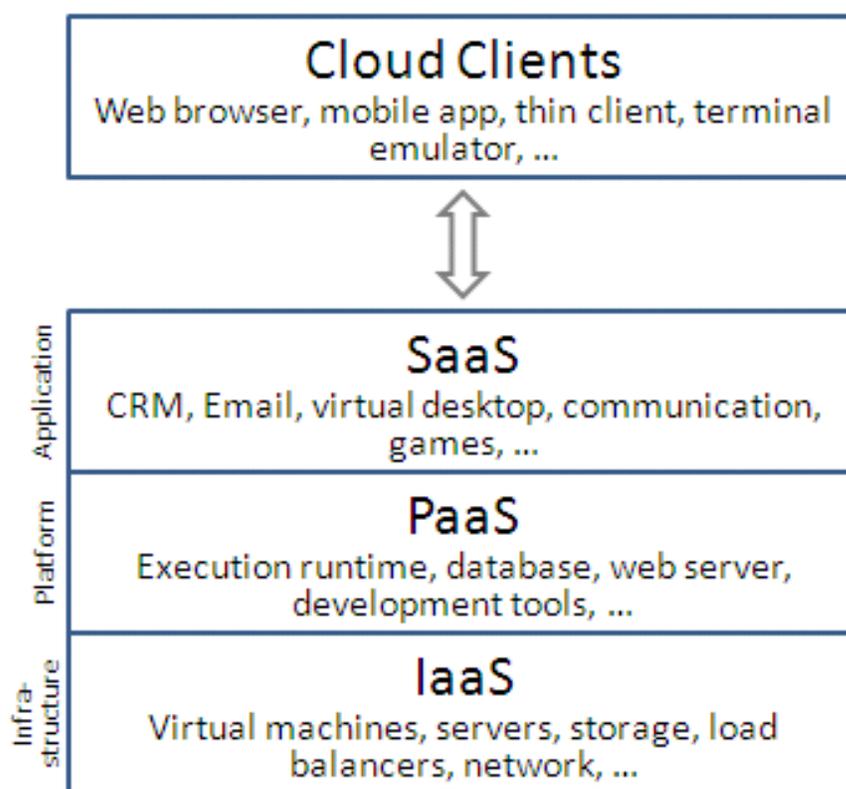
Το Cloud Computing, συχνά αναφέρεται ως ένα μέσο που προσφέρει μηχανισμούς στους παρόχους με τους οποίους μπορούν να δίνουν πρόσβαση στους χρήστες σε έναν απεριόριστο αριθμό εικονικών πόρων. Δύο χαρακτηριστικά του Cloud που αφορούν το επιχειρηματικό μοντέλο, είναι ο μηχανισμός κοστολόγησης, όπου οι χρεώσεις βασίζονται στον αριθμό των πόρων που χρησιμοποιούνται από το χρήστη (pay-per-use) καθώς και η δυνατότητα παροχής εγγυήσεων από τον πάροχο της υποδομής και η συμφωνία για το QoS των υπηρεσιών μεταξύ χρήστη και παρόχου (SLA-Service Level Agreements).

Το Cloud Computing, αποτελείται από τα εξής τρία επίπεδα [31]:

1. Infrastructure as a Service (IaaS), όπου ο απαραίτητος εξοπλισμός υποδομών παρέχεται στη μορφή Virtual Machines. Ο πάροχος είναι υπεύθυνος για το Cloud Virtualization, για τους servers, τη μνήμη και

άλλες δικτυακές συσκευές. Στον τομέα αυτό, δραστηριοποιούνται μεγάλες εταιρείες με διάφορα IaaS μοντέλα όπως τα AmazonEC2, Rackspace, GoGrid κλπ.

2. Platform as a Service (PaaS), όπου δίνεται η δυνατότητα στους πελάτες να αναπτύξουν τις δικές τους εφαρμογές βασιζόμενοι στις παρεχόμενες υπηρεσίες. Σε αυτό το επίπεδο δραστηριοποιούνται μεγάλες εταιρείες όπως η Google και η Microsoft με τα Google Apps Engine και Windows Azure αντίστοιχα.
3. Software as a Service (SaaS), όπου έτοιμες λειτουργικές εφαρμογές είναι διαθέσιμες εξ' αποστάσεως. Εδώ οι βασικοί πάροχοι υπηρεσιών είναι το GoogleApps, Salesforce, Facebook κλπ.



**Σχήμα 17: Τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του Cloud Computing [42].**

Τα τρία επίπεδα που αναφέραμε απεικονίζονται στο Σχήμα 17. Όπως παρατηρούμε στην εικόνα, στο χαμηλότερο επίπεδο βρίσκονται οι πόροι που αφορούν το hardware (π.χ. επεξεργαστική ισχύ, αποθηκευτικός χώρος, δικτυακές συσκευές) καθώς και μηχανισμοί που ονομάζονται Virtualization Hypervisors, οι οποίοι παρέχουν πρόσβαση σε εικονικούς πόρους οι οποίοι αντιστοιχούν σε φυσικούς πόρους μιας φυσικής μηχανής (CPU, μνήμη και άλλες συσκευές). Ο ρόλος του Hypervisor, είναι να δημιουργεί δυναμικά εικονικούς servers χρησιμοποιώντας τους πόρους ενός φυσικού server. Τα άλλα 2 επίπεδα ασχολούνται με τις διεπαφές μεταξύ των χρηστών των υπηρεσιών και του Cloud.

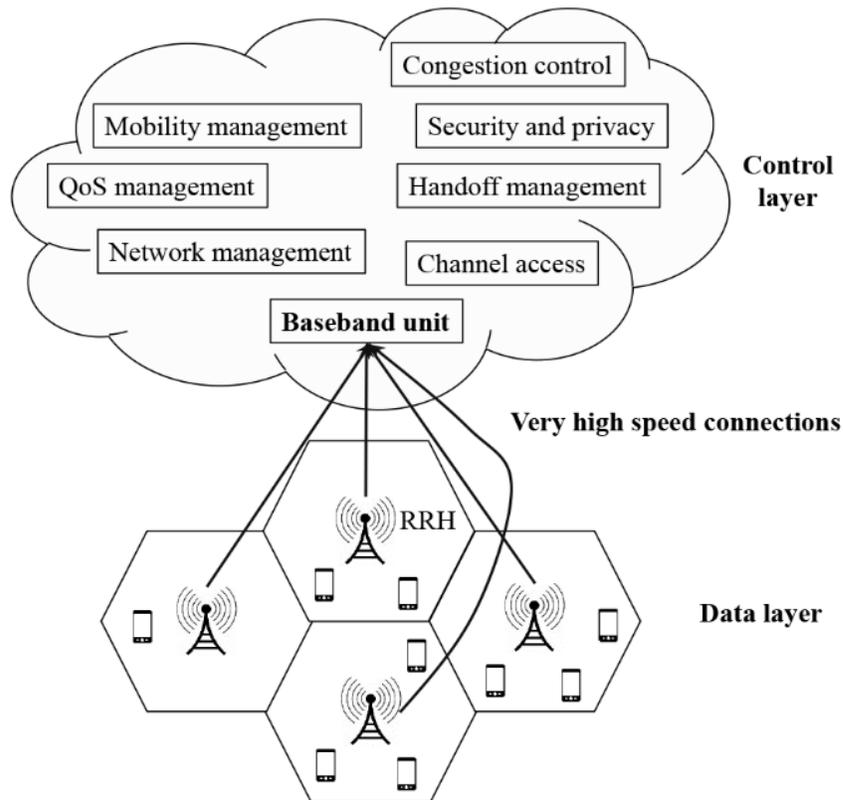
### 2.5.1 Cloud-RAN: Radio Access μέσω Cloud

Τα 5G δίκτυα, αναμένεται να είναι αρκετά πυκνά προκειμένου να επιτύχουν την απαραίτητη χωρητικότητα στο δίκτυο η οποία επιτυγχάνεται με τη εγκατάσταση Small Cells. Ωστόσο αυτό πρέπει να γίνει προσέχοντας το κεφαλαιακό κόστος της επένδυσης και λαμβάνοντας υπόψιν την παρεμβολή μεταξύ των σημάτων των επικαλυπτόμενων cells, καθώς και την εποικοδομητική συνεργασία των cells. Επιπλέον, λόγω των ανεξάρτητων σταθμών βάσης που υπάρχουν και λόγω του συντονισμού που απαιτείται μεταξύ τους δημιουργείται το πρόβλημα των καθυστερήσεων [12]. Για να μπορέσουμε να ελαττώσουμε το κόστος αυτό, θα μπορούσαμε να μοιράζουμε με αποδοτικό τρόπο την διαθέσιμη υποδομή/πόρους του δικτύου σε διαφορετικούς πελάτες, πράγμα το οποίο δεν είναι δυνατό με τους σημερινούς μηχανισμούς διαμοιρασμού δικτυακών πόρων. Οι υποδομές Cloud, προσφέρουν στους χρήστες εύκολη on-demand πρόσβαση σε ένα κοινό σύνολο παραμετροποιημένων πόρων, χωρίς να χρειάζεται οι χρήστες να ασχοληθούν με τη διαχείριση των πόρων αυτών. Τα κεντριοποιημένα ομογενή cellular δίκτυα, βασίζονται βασικές λειτουργίες όπως ο χειρισμός των συνδέσεων, η σηματοδότηση, η δέσμευση πόρων κ.α., στην υπόθεση πως πραγματοποιούνται ομοιόμορφα για κάθε σταθμό βάσης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι εφικτό. Η χρήση ετερογενών συσκευών με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες, προσμετρώντας παράλληλα τη ανάγκη για μικρές καθυστερήσεις και για QoS, απαιτούν να φέρουμε τους υπολογιστικούς πόρους πιο κοντά στον τελικό χρήστη [29]. Η τεχνολογία του Cloud Computing δίνει λύση στο παραπάνω πρόβλημα, καθώς με το virtualization του RAN, προσφέρονται ιδεατά απομονωμένα κομμάτια των υποδομών πρόσβασης του δικτύου σε ξεχωριστούς πελάτες, δίνοντας τους τη δυνατότητα να χειρίζονται αυτά τα ιδεατά κομμάτια σαν να ήταν πραγματικοί σταθμοί βάσης.

### 2.5.2 Αρχιτεκτονική του Cloud-RAN

Τα Ασύρματα Δίκτυα Πρόσβασης (RAN), αποτελούν το πιο δαπανηρό μέρος του δικτύου (70%-80% του συνολικού κόστους [12]) τόσο σε ενέργεια όσο και σε πόρους. Τα κεντριοποιημένα RANs που βασίζονται σε τεχνολογίες Cloud, οδηγούν στη μείωση του κόστους όσο αφορά πολύ πυκνά δίκτυα -όπως αναμένεται να είναι τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς-, αφού εναποθέτουν τις υπολογιστικές διαδικασίες (π.χ. δρομολόγηση, δέσμευση πόρων κλπ.) στο Cloud. Ο συνδυασμός του Cloud Computing και της κεντριοποιημένης αρχιτεκτονικής του RAN, είναι ιδανικός για τον προγραμματισμό του διαμοιρασμού των κοινών δικτυακών πόρων ραδιοπρόσβασης, για τον χειρισμό των παρεμβολών μεταξύ των κοντινών cells και για την γρήγορη και εύκολη αναβάθμιση του δικτύου. Η βασική ιδέα πίσω από το C-RAN (Cloud Based-Radio Access Network), είναι η εκτέλεση των περισσότερων λειτουργιών ενός σταθμού βάσης στο Cloud, χωρίζοντας έτσι τη λειτουργία του σε ένα Control Layer και ένα Data Layer. Οι λειτουργίες που αφορούν το Control Layer εκτελούνται στο Cloud, ενώ οι λειτουργίες που αφορούν το Data Layer εκτελούνται

στους σταθμούς βάσης. Πιο συγκεκριμένα, η βασική ιδέα είναι να χωρίσουμε τις μονάδες επεξεργασίας των σημάτων (BBUs) από τους σταθμούς βάσης των σημερινών cells και να τους μεταφέρουμε στο Cloud προκειμένου να επιτύχουμε κεντρική επεξεργασία και διαχείριση των σημάτων [27, 40]. Στο Σχήμα 18, παραθέτουμε ένα παράδειγμα αρχιτεκτονικής η οποία ενσωματώνει την τεχνολογία Cloud-RAN.



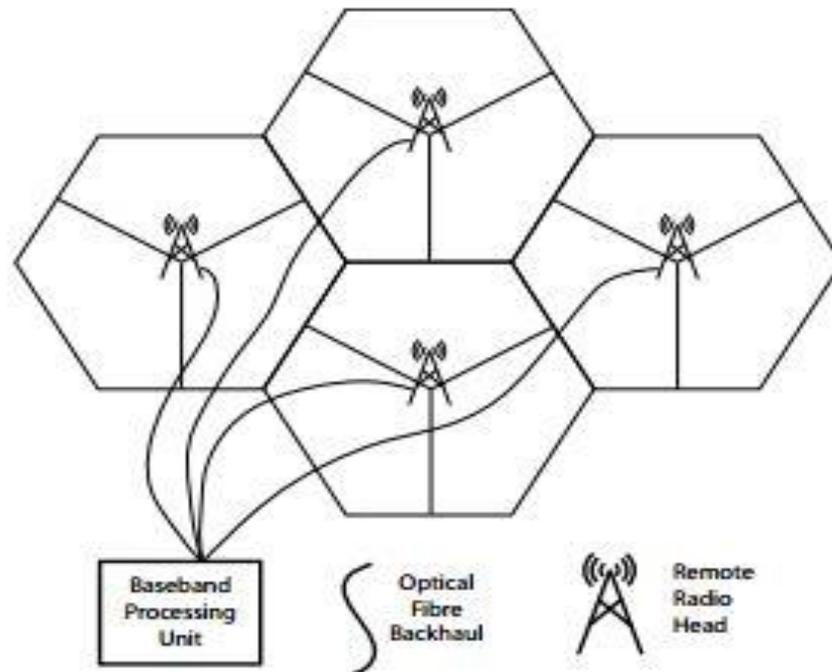
**Σχήμα 18: Μια Cloud-Based Αρχιτεκτονική για το δίκτυο 5G [12].**

Πιο συγκεκριμένα, το C-RAN αντικαθιστά τους σταθμούς βάσης σε κάθε κόμβο πρόσβασης με ένα κοινόχρηστο χώρο απομακρυσμένων διαμοιραζόμενων πόρων που αφορούν τη ραδιοπρόσβαση [33]. Τα βασικά μέρη της αρχιτεκτονικής του C-RAN φαίνονται παρακάτω:

- **Base Station Pool:** Παραλληλίζεται με τον εγκέφαλο του δικτύου, όπου αποτελεί τον κεντροποιημένο χώρο των κοινόχρηστων υπολογιστικών πόρων και εκτελεί λειτουργίες όπως ο έλεγχος σηματοδότησης και ο συντονισμός των επιμέρους λειτουργιών των cells.
- **Optical Fronthaul:** Οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των ψηφιοποιημένων αναπαραστάσεων των σημάτων βασικής ζώνης από τα BBUs στο RAN.
- **Remote Radio Heads (RRHs):** Απλές κεραιές μέσω των οποίων συνδέεται ο χρήστης στο RAN. Είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σχεδόν παντού. Εν συγκρίσει με τους παραδοσιακούς

σταθμούς βάσης όπου χρειάζονταν περισσότερες υποδομές και κόστος, αφού εκεί γίνονταν και η εγκατάσταση των BBUs, στο C-RAN απαιτείται μόνο ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση της κεραίας. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι τα RRHs μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση οποιουδήποτε cell ανεξαρτήτως του μεγέθους του (Picocell, Femtocell, Macrocell).

Στο Σχήμα 19, απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική του C-RAN που περιγράψαμε παραπάνω.



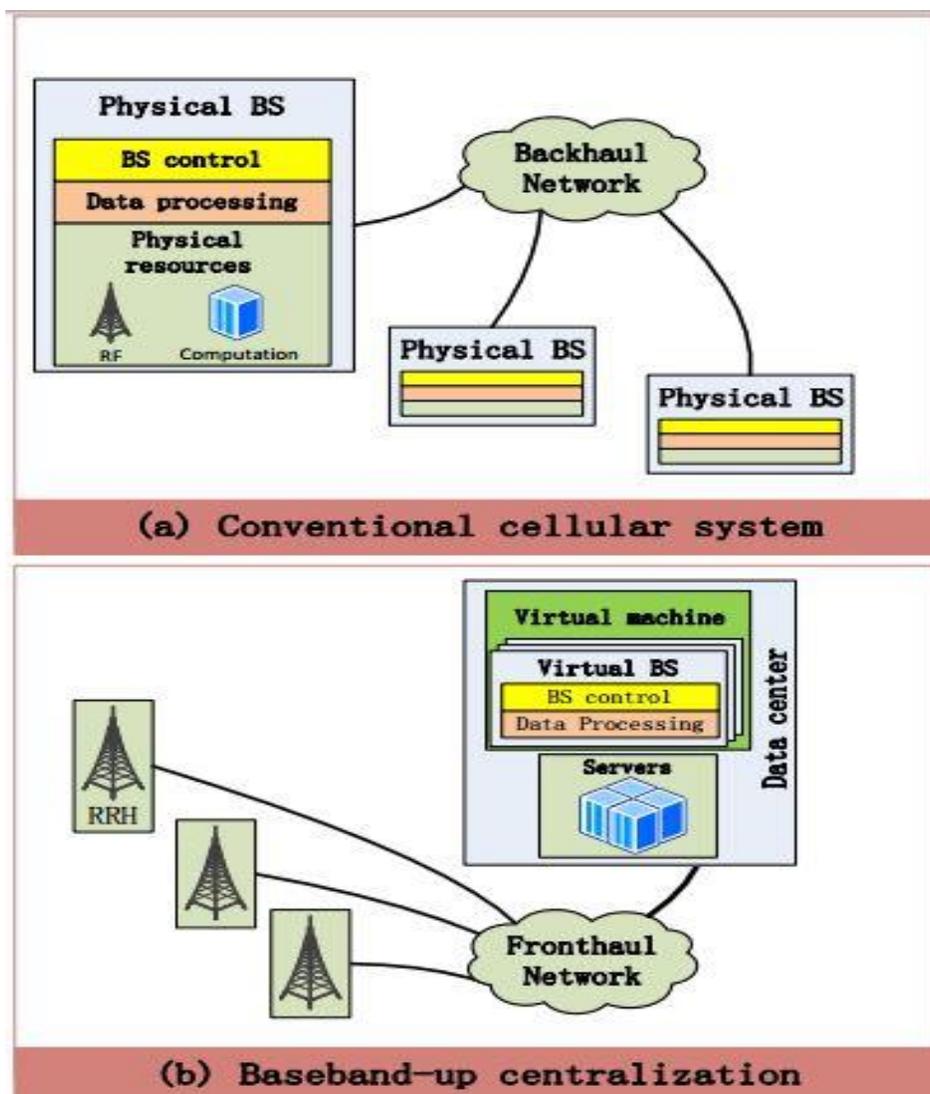
**Σχήμα 19: Cloud-RAN αρχιτεκτονική με κεντρική επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης και RRHs [35].**

Οι servers πραγματοποιούν την επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας Virtual Machines οι οποίες τρέχουν real-time Linux. Η χρήση του Cloud-RAN οδηγεί σε αποδοτική εκμετάλλευση της ενέργειας η οποία οδηγεί σε 70% μείωση του ενεργειακού κόστους του OPEX του σταθμού βάσης, σύμφωνα με την China Mobile [85].

### 2.5.3 Προσδοκώμενα Οφέλη

Με τη χρήση του Cloud-RAN, οι υπολογιστικοί πόροι συγκεντρώνονται από τις διάσπαρτες περιοχές που είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί βάσης και

κεντριοποιούνται σε ένα μεγάλο κοινόχρηστο χώρο υπολογιστικών πόρων. Συγκριτικά με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης, οι σταθμοί βάσης στο C-RAN είναι πιο απλοποιημένοι, επειδή η επεξεργασία σημάτων και η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται στο Network Cloud. Όσο αφορά, τις περιοχές όπου ήταν εγκατεστημένοι οι σταθμοί βάσης, από πλευράς hardware υπάρχει ένα RRH (Remote Radio Head), το οποίο αποτελεί μια απλή radio interface για την επικοινωνία με το Cloud όπου βρίσκονται πλέον δεσμευμένοι οι υπολογιστικοί πόροι. Τα RRHs ψηφιοποιούν το σήμα βασικής ζώνης που φτάνει στο σταθμό βάσης και το αποστέλλουν στον κεντρικό κόμβο στο Cloud για την ενεργοποίηση των απαραίτητων λειτουργιών. Στο Σχήμα 20, απεικονίζεται η παραδοσιακή αρχιτεκτονική ασύρματης πρόσβασης των cellular δικτύων εν συγκρίσει με την κεντριοποιημένη επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης που περιγράψαμε.



**Σχήμα 20:** Σύγκριση μεταξύ της παραδοσιακής σχεδίασης των cellular δικτύων και με κεντριοποιημένη επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης [50].

Τα οφέλη της κεντριοποιημένης αρχιτεκτονικής (Cloud-RAN) που περιγράφουμε είναι πολλαπλά [12, 33, 50]:

- Επιτρέπει την καλύτερη εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας και τη βελτίωση της διαχείρισης και κατ' επέκταση και της απόδοσης του δικτύου λόγω της κεντρικής και συντονισμένης σηματοδότησης.
- Έχουμε εξοικονόμηση χρημάτων. Το λειτουργικό κόστος (OPEX) μειώνεται λόγω της κεντριοποιημένης και συνάμα απομακρυσμένης διαχείρισης. Επιπλέον, μειώνει δραστικά και το κεφαλαιακό κόστος (CAPEX) αφού η επένδυση για την εγκατάσταση Macro Base Stations (MBSs) είναι πολύ μεγαλύτερη από το να τοποθετήσουμε RRHs (όπως συμβαίνει στο C-RAN), τα οποία μας παρέχουν την ίδιες δυνατότητες. Ακόμη, παρατηρείται και εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της δυνατότητας που παρέχεται να εκτελούνται υψηλού επιπέδου διεργασίες στο Cloud.
- Ο φυσικός περιορισμός που απέτρεπε την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των σταθμών βάσης πλέον εξαλείφεται, μέσω της κεντριοποίησης, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα ανάπτυξης λειτουργιών συνεργασίας μεταξύ των σταθμών. Αυτό αποφέρει και αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.
- Δυνατότητα εύκολης παροχής υπολογιστικών πόρων on-demand από το Cloud για την πραγμάτωση διάφορων εργασιών υψηλού επιπέδου. Παρέχουν τη δυνατότητα πρόσβασης σε μεγάλα data centers για μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις (SME), δίνοντας τους πρόσβαση σε μεγάλη γκάμα υπολογιστικών πόρων προκειμένου να υλοποιήσουν τις υπηρεσίες τους.
- Ο βαθμός χρησιμοποίησης (utilization ratio) των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, μπορεί να αυξηθεί χάρη στη δυνατότητα στατικής πολυπλεξίας των υπολογιστικών διεργασιών.
- Οι κεντριοποιημένοι υπολογιστικοί πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως virtual πόροι και να υποστηρίξουν software-defined BSs (σταθμούς βάσης), απλοποιώντας κατά πολύ την ανάπτυξη και τη συντήρηση των cellular δικτύων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το virtualization του ασύρματου δικτύου πρόσβασης (RAN) που βασίζεται στην κεντριοποίησή του και στη χρήση του Cloud, αποτελούν μοχλό ανάπτυξης της τεχνολογίας Network Function Virtualization η οποία αναλύθηκε πιο πάνω.

Το NFV επιτρέπει στους παρόχους Cloud να τρέχουν πολλές και διαφορετικές VMs (Virtual Machines) σε έναν φυσικό server. Από την οπτική του παρόχου, η χρήση του Virtualization επιτρέπει την βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων ενός φυσικού server (π.χ. μνήμη, CPU, υπηρεσίες). Το Cloud, επιτρέπει τη δυναμική δέσμευση και

αποδέσμευση πόρων για διάφορες εφαρμογές. Επίσης, επιτρέπει την ολιστική παρατήρηση της χρησιμοποίησης των παρεχόμενων πόρων και την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους λογισμικού να προσφέρουν προϊόντα σε χαμηλότερες τιμές και υλοποιημένα με βάση τις ανάγκες του χρήστη [34]. Παρά το γεγονός ότι το C-RAN, προσφέρει υπηρεσίες χαμηλότερου κόστους και ευκολία στην εγκατάσταση νέων τεχνολογιών, η συνολική αποδοτικότητα του δικτύου θα συνεχίζει να περιορίζεται αν δεν αναβαθμίσουμε τη σηματοδότηση του RAN με το δίκτυο κορμού, προκειμένου να καρπωθούμε πλήρως τα οφέλη που προσφέρουν οι C-RAN σταθμοί βάσης σε σχέση με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης. Σε αυτή την αναβάθμιση την οποία περιγράφουμε θα αποτελέσει μοχλό κίνησης το NFV που αναφέραμε παραπάνω [33].

## 2.6 Τεχνοοικονομικές Μελέτες και Επιχειρηματικά Μοντέλα.

### 2.6.1 Βασικές Οικονομικές Έννοιες

Στην προσπάθεια σχεδιασμού και υλοποίησης του 5G δικτύου και εφόσον η κύρια πρόκληση είναι η ικανοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών που έχουν τεθεί από το οργανισμό 5GPPP αλλά με γνώμονα την μείωση του κεφαλαιακού και του λειτουργικού κόστους, πραγματοποιήθηκαν πολλές τεχνοοικονομικές μελέτες για τις προτεινόμενες τεχνολογίες. Στις επόμενες σελίδες θα κάνουμε μια σύντομη ανασκόπηση σε οικονομικές έννοιες των δικτύων και θα παρουσιάσουμε μερικές από τις μελέτες αυτές.

Ένα επιχειρηματικό μοντέλο αποτελείται από ροές υπηρεσιών και πληροφορίας, οι οποίες περιλαμβάνουν,

- Τις περιγραφές των παικτών της αγοράς.
- Τους ρόλους και τις μεταξύ τους σχέσεις.
- Τη σχετική τους θέση σε ένα δίκτυο αξίας.
- Την κοστολογική τους δομή και τις πηγές εσόδων τους.

Στα επιχειρηματικά μοντέλα των δικτύων, παρατηρούμε διαφορετικά σενάρια υλοποίησης όπως π.χ. τα δίκτυα να υπόκεινται σε πλήρη κρατικό έλεγχο μέσω κοινοπραξιών μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, να ανήκουν σε ένα δημόσιο τηλεπικοινωνιακό οργανισμό, να πραγματοποιούνται κοινοπραξίες μεταξύ ιδιωτικών οργανισμών και δημοσίου χωρίς την ύπαρξη κρατικού ελέγχου κ.α. [80].

Τα δίκτυα επικοινωνιών σε οικονομικό επίπεδο χαρακτηρίζονται από δύο βασικά οικονομικά μεγέθη το κεφαλαιακό κόστος (Capital Expenditure-CAPEX) και το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure-OPEX).

Το κεφαλαιακό κόστος (CAPEX) αντιπροσωπεύει το κόστος κατασκευής του ευρυζωνικού δικτύου. Το κεφαλαιακό κόστος αποτελείται από το κόστος για αγορά α) παθητικού εξοπλισμού (π.χ. οπτικές ίνες, καταναμητές κ.λπ.) β) ενεργού εξοπλισμού (μεταγωγείς, δρομολογητές κ.λπ.) και το κόστος για την πληρωμή γ)

εργασιών που είναι απαραίτητες για την εγκατάσταση του δικτύου (π.χ. εκσκαφές, αποκαταστάσεις κλπ.). Παρατηρούμε λοιπόν ότι το κεφαλαιακό κόστος έχει να κάνει πιο πολύ με τη hardware υποδομή του δικτύου [80]. Στα παρακάτω κεφάλαια, θα ασχοληθούμε διεξοδικά με το πώς ο προσεκτικός σχεδιασμός του δικτύου και η εισαγωγή τεχνολογιών όπως αυτές που αναφέρονται παραπάνω θα συμβάλλουν στη μείωση του κεφαλαιακού κόστους.

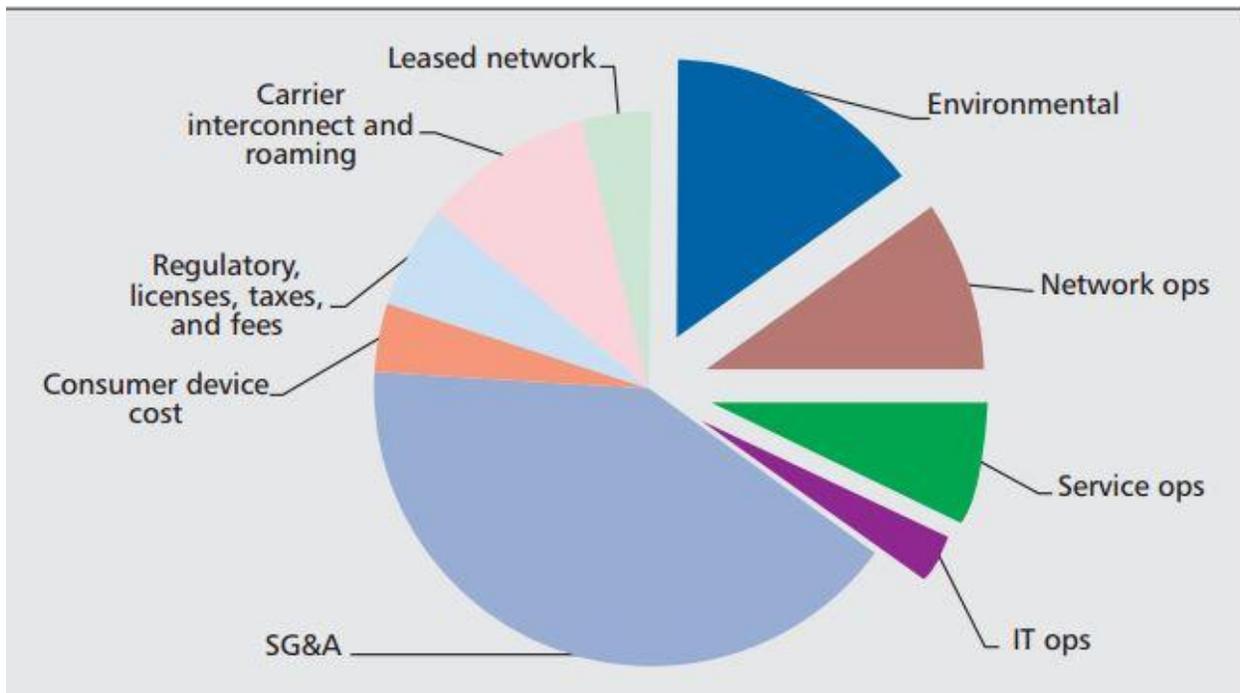
Το λειτουργικό κόστος (OPEX) αντιπροσωπεύει το κόστος που δημιουργείται από τις απαραίτητες διαδικασίες για τη λειτουργία και τη διαχείριση του δικτύου. Το OPEX αποτελεί μια αρκετά ευρεία έννοια, ενώ παράλληλα δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση για το ποια έξοδα ανήκουν στο OPEX. Για την καλύτερη κατανόηση μας θα χωρίσουμε το OPEX σε 9 κατηγορίες οι οποίες φαίνονται παρακάτω [68]:

- Μάρκετινγκ, Πωλήσεις και Απόκτηση Πελατών: Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κόστη που αφορούν το marketing, την προσέλευση πελατών και τη γενική υποστήριξη και διαχείριση που χρειάζεται για να λειτουργήσει μια επιχείρηση. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να περιλαμβάνει κόστη που αφορούν διαφημιστικές καμπάνιες, marketing, διαπραγματεύσεις SLA, επιδοτήσεις κ.α. [80].
- Ετήσιο Κόστος Αδειών Ραδιοφάσματος, Ρυθμίσεις, Φόροι κλπ.: Αυτή η κατηγορία αφορά κόστη τα οποία αφορούν τις συναλλαγές που πρέπει να έχει ο τηλεπικοινωνιακός οργανισμός με το κράτος. Τέτοια έξοδα μπορεί να είναι το ετήσιο κόστος για τις άδειες συχνότητας, έξοδα που μπορεί να αφορούν τη μίσθωση του φάσματος, το κόστος πληροφοριών ή ακόμα και πρόστιμα τα οποία μπορεί να βασίζονται σε αποφάσεις των ρυθμιστικών αρχών.
- Κόστος Αγοράς Εξοπλισμού για τους Πελάτες: Αυτά τα έξοδα αφορούν την αγορά εξοπλισμού (π.χ. routers), ο οποίος μετέπειτα θα πωληθεί στους πελάτες προκειμένου να αποκτήσουν συνδεσιμότητα.
- Roaming: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν έξοδα που αφορούν το roaming ή την πληρωμή άλλων παρόχων για ενοικίαση υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος σε αυτή την κατηγορία αφορά το κόστος διαπραγμάτευσης, συμφωνιών και οικονομικών τακτοποιήσεων και ονομάζεται settlement cost. Ακόμη ένα μέρος του κόστους είναι τα έξοδα για τη διεξαγωγή δοκιμών διαλειτουργικότητας.
- Κόστος για ενοικίαση φυσικών δικτυακών πόρων: Αφορά το κόστος για την ενοικίαση γραμμών ή εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, αφορά τους παρόχους υπηρεσιών που δεν κατέχουν τις δικτυακές πλατφόρμες αλλά τις ενοικιάζουν π.χ. μισθωμένες γραμμές, hosting, πρόσβαση DSL κ.α. [80].
- Περιβαλλοντολογικά κόστη: Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται κόστη που αφορούν την μίσθωση χώρου για την εγκατάσταση της υποδομής του δικτύου, την κατανάλωση ενέργειας κ.α.
- Κόστος για τη λειτουργία και συντήρηση των δικτυακών συσκευών: Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται έξοδα που έχουν να κάνουν με τη συντήρηση των δικτυακών συσκευών καθώς και με τη μισθοδοσία των υπαλλήλων που ασχολούνται με αυτή. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει όλες τις

επαναλαμβανόμενες δαπάνες που είναι περιοδικά απαραίτητες για τη λειτουργία των δικτύων και των υπηρεσιών, την προληπτική συντήρηση ή την επιδιόρθωση του εξοπλισμού, την αναβάθμιση παλαιού εξοπλισμού κ.α.

- Κόστος για τη λειτουργία και διαχείριση των δικτυακών υπηρεσιών: Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται έξοδα που σχετίζονται με τη σχεδίαση και τη διαχείριση υπηρεσιών, την δημιουργία συνδέσεων και τερματισμού και την υποστήριξη των πελατών που χρησιμοποιούν το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα εδώ δημιουργούνται έξοδα, που σχετίζονται με παροχές προς τους πελάτες όπως π.χ. εξυπηρέτηση πελατών, λειτουργία διαχείρισης σχέσεων πελατών κ.α. [80].
- Κόστος για τη λειτουργία των IT λειτουργιών: Εδώ εντάσσονται έξοδα που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση των δικτύων, την ανάπτυξη πλατφορμών προκειμένου να υποστηρίξουν τις υπηρεσίες που προσφέρονται στους πελάτες καθώς και υπηρεσίες που σχετίζονται με την επίβλεψη και τον έλεγχο των αστοχιών του δικτύου. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και τα συστήματα υποστήριξης λειτουργίας-OSS (Operation Support Systems) και τα συστήματα χρέωσης υπηρεσιών-BSS (Billing Support Systems) [80].

Στο Σχήμα 21 που ακολουθεί, παραθέτουμε μια γραφική απεικόνιση των παραπάνω κατηγοριών και μια ποιοτική μέτρηση του μέρους του συνολικού λειτουργικού κόστους του δικτύου που καταλαμβάνουν.



**Σχήμα 21: Οι κατηγορίες λειτουργικού κόστους (OPEX) για έναν πάροχο υπηρεσιών [68].**

Όπως παρατηρούμε το OPEX καταλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος στο συνολικό budget σε σχέση με το CAPEX. Το OPEX φέρεται να είναι 2-5 φορές μεγαλύτερο [68], από ότι το CAPEX, γεγονός που οδήγησε τους SPs να επικεντρωθούν στο πως θα μειώσουν το OPEX και όπως θα δούμε παρακάτω, η εισαγωγή τεχνολογιών όπως αυτές που περιεγράφηκαν πιο πάνω κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση.

### *2.6.2 Τεχνοοικονομικές Μελέτες που αφορούν τα Small Cells*

Στα προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση των τεχνολογιών που είναι υποψήφιες για την σχεδίαση των 5G δικτύων. Σε θεωρητικό επίπεδο οι τεχνολογίες που αναλύσαμε διαθέτουν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά για να μπορέσουν να ικανοποιήσουν τους στόχους του 5G, ωστόσο επειδή σκοπός είναι και η μείωση του κόστους, πρέπει να γίνουν και οι απαραίτητες τεχνοοικονομικές μελέτες για να διαπιστώσουμε την οικονομική βιωσιμότητα των προτεινόμενων τεχνολογιών.

Όσο αφορά την τεχνολογία Ultra Dense Deployments, έχουν γίνει πολλές μελέτες για τα οικονομικά οφέλη που προσφέρει η χρήση Small Cells για την επέκταση του δικτύου. Η χρήση των Femtocells έγινε πραγματικότητα ήδη από το LTE-Advanced, όπου ήταν η μέθοδος που επιλέχθηκε για την αύξηση του διαθέσιμου φάσματος και την αύξηση της κάλυψης εντός των κτηρίων. Μερικές από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

Το αρχικό δίλλημα δημιουργήθηκε όταν θέλαμε να επεκτείνουμε τα παλαιότερα WANs προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερη κάλυψη, αλλά το κόστος της επένδυσης για την εγκατάσταση νέων Macrocells ήταν απαγορευτικό. Έτσι αρχίσαμε να εξετάζουμε τη δυνατότητα χρήσης Femtocells προκειμένου να μειώσουμε το κόστος εγκατάστασης. Τα δύο μεγάλα πλεονεκτήματα της χρήσης Femtocells για την επέκταση του δικτύου σε σχέση με τη χρήση Macrocells, είναι το μικρότερο κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση τους και το γεγονός ότι μειώνουν πάρα πολύ την εξασθένηση του σήματος λόγω των τοίχων κλπ.

Για να δοθεί λύση στο παραπάνω δίλλημα, όπως είπαμε πραγματοποιήθηκαν πολλές μελέτες οι οποίες για να πάρουν όσο το δυνατόν εγκυρότερο αποτέλεσμα βασίστηκαν σε ρεαλιστικά σενάρια. Στην εργασία [37] για παράδειγμα, συγκρίνουμε τις δύο τεχνολογίες για ένα σενάριο σύμφωνα με το οποίο θέλουμε να χτίσουμε σε μια περιοχή 1 km<sup>2</sup>, 10 πεντάοροφα κτίρια, όπου σε κάθε ένα θα στεγάζονται 1000 εργαζόμενοι. Οι συγγραφείς της εργασίας πραγματοποίησαν μια σύγκριση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας ενός δικτύου με τη χρήση Femtocells σε σχέση με τη χρήση του σταθμού βάσης του Macrocell. Για να μπορέσουν να κάνουν τη σύγκριση, πρώτα συνέλλεξαν στοιχεία σχετικά με τις απαιτήσεις σε πόρους (π.χ. χωρητικότητα, αριθμός σταθμών βάσης), που απαιτούνταν για τη σωστή λειτουργία του δικτύου. Πέρα από το ποια τεχνολογία έχει χαμηλότερο κόστος, μας ενδιαφέρει και το κομμάτι της απόδοσης προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών. Οι συγγραφείς υπολόγισαν την εξασθένηση του σήματος για τη χρήση Macrocells και Femtocells χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Okamura-hata [39] και

όπως ήταν φυσικό διαπιστώθηκε ότι στα Femtocells παρατηρείται πολύ μικρότερη εξασθένηση (περίπου 60-70 dB), γεγονός που συνεπάγεται ότι απαιτείται πολύ λιγότερη ενέργεια για το Femtocell.

Η σύγκριση του κόστους εγκατάστασης γίνεται για την ικανοποίηση των ίδιων απαιτήσεων των χρηστών. Τα κύρια μέρη του οικονομικού μοντέλου που παρουσιάζεται είναι:

- Η επένδυση που αφορά την ασύρματη πρόσβαση.
- Τοποθεσία σταθμών βάσης για καλύτερη μετάδοση.
- Κόστος εγκατάστασης.
- Ενοικιάσεις χώρων.
- Κόστος για ενοικίαση γραμμών.
- Κόστος συντήρησης και λειτουργίας.

Με βάση τα παραπάνω κατέληξαν στα αποτελέσματα που ακολουθούν, για το προαναφερθέν σενάριο όσο αφορά το ποιος τύπος cell πρέπει να χρησιμοποιηθεί:

Στο Σχήμα 22 παρατίθεται το κεφαλαιακό κόστος όταν επιλεγεί η χρήση Femtocells, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η User Oriented προσέγγιση, κατά την οποία ένας αριθμός χρηστών συνδέονται μέσω ενός access point, αλλά και κατά την περίπτωση που χρησιμοποιείται η Coverage Oriented προσέγγιση, όπου ένας αριθμός από access points ανατίθεται σε έναν όροφο του κτηρίου.

	<i>Number of femtocells</i>	<i>CAPEX</i>	<i>Total capacity</i>
Coverage approach			
4 femtocells per floor	200	0,20 Μ€	2000 Mbps
8 femtocells per floor	400	0,40 Μ€	4000 Mbps
User oriented approach			
8 users per femtocell	1250	1,25 Μ€	12 500 Mbps
4 users per femtocell	2500	2,50 Μ€	25 000 Mbps

**Σχήμα 22: Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Femtocells [37].**

Στον Σχήμα 23 βλέπουμε το κεφαλαιακό κόστος όταν επιλεγεί η χρήση Macrocells, όταν ακολουθείται η προσέγγιση να εγκαταστήσουμε νέα Macrocells ή να χρησιμοποιήσουμε τα υπάρχοντα.

	<i>Number of sites</i>	<i>CAPEX</i>	<i>Total capacity</i>
Deploying new sites			
Low level demand	2	0,24 M€	200 Mbps
High level demand	10	1,20 M€	1000 Mbps
Reusing existing sites			
Low level demand	2	0,04 M€	200 Mbps
High level demand	10	0,20 M€	1000 Mbps

**Σχήμα 23: Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Macrocells [37].**

Από άποψη κόστους, παρατηρούμε ότι η επιλογή ανάμεσα σε Macrocells και Femtocells δεν έχει να κάνει με το κόστος του εξοπλισμού πρόσβασης. Κυρίως έχει να κάνει με το αν πρέπει να εγκατασταθούν καινούργια Macrocells ή όχι. Η εγκατάσταση νέων Macrocells όχι μόνο αυξάνει κατακόρυφα το κεφαλαιακό κόστος, αλλά οδηγεί και σε μεγαλύτερα λειτουργικά κόστη από το να χρησιμοποιήσουμε τα ήδη υπάρχοντα Macrocells. Η ανάλυση συμπερασματικά καταλήγει στο γεγονός ότι το ερώτημα είναι αυτό που περιγράψαμε παραπάνω. Σε περίπτωση που σε ένα ήδη πυκνό δίκτυο πρέπει να τοποθετήσουμε και άλλους σταθμούς βάσης, η λύση των Femtocells έχει αρκετά μικρότερο κόστος. Σε περίπτωση ωστόσο που υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ενός Macrocell, πρέπει να προτιμάται γιατί απαιτούνται πάρα πολλά Femtocells για να έχουμε εγγυημένη κάλυψη σε μεγάλη απόσταση.

Στο [81] εξετάζεται ένα παρόμοιο σενάριο αλλά αυτή τη φορά παίρνουμε και αποτέλεσμα σχετικά με τη διαφορά στο λειτουργικό κόστος (OPEX) μεταξύ Femtocells και Macrocells και πιο συγκεκριμένα σε ότι αφορά την ενεργειακή κατανάλωση. Ένας σταθμός βάσης περιέχει πολλούς πομπούς (TRXs), κάθε ένας από τους οποίους εκπέμπει σε μόνο μια κεραία. Ένας TRX αποτελείται από έναν PA (ενισχυτής ισχύος), ένα RF (διαμορφωτής συχνότητας), ένα BB (περιέχει πομπό και δέκτη), ένα σύστημα ψύξης, μια τροφοδοσία DC-DC και μια μονάδα AC-DC από όπου τροφοδοτείται. Με βάση τα παραπάνω κατέληξαν στον παρακάτω τύπο ο οποίος υπολογίζει την ισχύ ενός TRX πομπού:

$$P_{TRX} = \frac{P_{PA} + P_{RF} + P_{BB}}{(1 - P_{DC-DC})(1 - P_{AC-AC})(1 - P_{COOL})} * [w]$$

Αφού υπολόγισαν την απαιτούμενη ισχύ για όλους τους πομπούς και όλες τις κεραίες, χρησιμοποίησαν τον παρακάτω τύπο προκειμένου να υπολογίσουν τη συνολική ενέργεια που καταναλώνει όλο το δίκτυο:

$$E = (N_{mac} * P_{mac} + N_{femt} * P_{femt}) * 8760[kWh/yr]$$

Όπου N είναι ο αριθμός των cells για κάθε περίπτωση και P η ισχύς του cell σε Watts για κάθε περίπτωση.

Έτσι κατέληξαν στον παρακάτω πίνακα, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 24 και καταγράφει την κατανάλωση ενέργειας για κάθε είδος σταθμού βάσης.

	Macro	Femto
<i>Load dependent [W]</i>		
$P_{PA}$	128.2	1.1
$P_{RF}$	12.9	0.6
$P_{BB}$	29.6	2.5
<i>Linear scaling with load [%]</i>		
$P_{DC-DC}$	7.50	9
$P_{cool}$	10.00	0
$P_{MS}$	9.00	11
$P_{TRX}$ [W/TRX]	225.3	5.2
Number of sectors	3	1
Number of antennas	2	2
Number of carriers	2	1
<i>Total power consumption [W]</i>	2703.9	10.4

**Σχήμα 24: Κατανάλωση ενέργειας για κάθε είδος σταθμού βάσης [81].**

Συμπερασματικά καταλήγουν ότι για σενάρια επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου, τα Femtocells όχι μόνο είναι τα πιο οικονομικά αλλά αποτελούν και την πιο βιώσιμη λύση. Παρατηρώντας μάλιστα και τον από πάνω πίνακα, συμπεραίνουν ότι η λύση των Femtocells είναι μια win-win επιλογή αφού και έχει μικρότερο κόστος, αλλά επιπλέον είναι και η πιο περιβαλλοντολογικά φιλική λύση.

Στην εργασία [82] πραγματοποιείται μια μελέτη που πραγματεύεται τον τρόπο που πρέπει να γίνει η επέκταση του φάσματος στα 5G δίκτυα και συγκρίνει το κόστος εγκατάστασης Small Cells σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells. Όπως αναφέραμε και εμείς πιο πάνω, η χρήση των Ultra Dense Deployments στα δίκτυα 5G είναι επιβεβλημένη και οι συγγραφείς αυτής της μελέτης υποστηρίζουν ότι η χρήση Small Cells είναι η πιο βιώσιμη λύση για την επέκταση του δικτύου χωρίς την ανάγκη χρήσης επιπλέον φάσματος, την αντιμετώπιση της εξασθένησης του σήματος σε εσωτερικούς χώρους και την εκμετάλλευση των μελλοντικών τεχνολογιών. Η εργασία αυτή δε στηρίζεται σε κάποιο σενάριο, αλλά προσφέρει ένα γενικό μοντέλο βάση το οποίου υπολογίζουμε και συγκρίνουμε το συνολικό κόστος (CAPEX και OPEX) εγκατάστασης κάθε τύπου cell.

Το CAPEX για την εγκατάσταση Macrocells δίνεται από τον τύπο:

$$C_{capex-macro} = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} * N(C_{eNB} + C_{EPC})$$

Όπου το  $C_{macro}$  είναι το ετήσιο κεφαλαιακό κόστος και N είναι ο συνολικός αριθμός των σταθμών βάσης.

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους OPEX, χρησιμοποιείται ο τύπος

$$C_{opex-macro} = f_{site} \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} * N(C_{eNB} + C_{EPC}) + N * C_{site} + f_{BW} * BW$$

Όπου  $f_{site}$ ,  $f_{BW}$  είναι συντελεστές που αυξάνονται γραμμικά ανάλογα με τα κόστη της περιοχής εγκατάστασης και του εύρους ζώνης αντίστοιχα.  $C_{site}$  είναι κόστη που σχετίζονται με την περιοχή εγκατάστασης και  $BW$  είναι το εύρος ζώνης.

Άρα το συνολικό κόστος εγκατάστασης ενός Macrocell, είναι:  $C_{macro} = C_{capex} + C_{opex}$

Όσο αφορά την εγκατάσταση των Small Cells, για τον υπολογισμό του CAPEX χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$C_{capex-small} = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} * N * C_{i/f}$$

Στην περίπτωση των Small Cells, το μόνο κεφαλαιακό κόστος είναι το κόστος για τον εξοπλισμό μέσω του οποίου θα γίνεται η δρομολόγηση από και προς το δίκτυο κορμού του παρόχου.

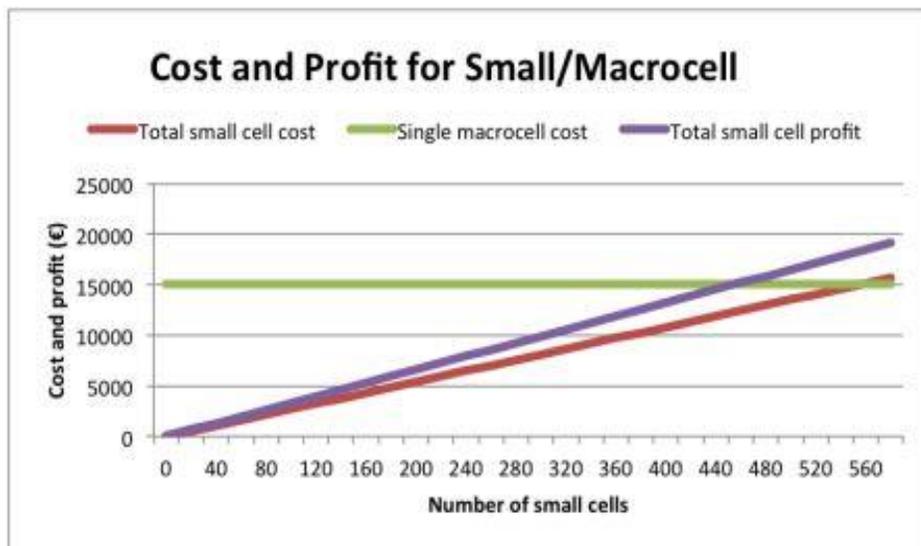
Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους OPEX για την εγκατάσταση των Small Cells πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν αρκετές διαφορές σε σχέση με τα Macrocells, αφού α) δεν υπάρχει κόστος για ενοικίαση χώρου, αφού ο εξοπλισμός τοποθετείται στο σπίτι του πελάτη, β) η κατανάλωση ενέργειας βαραίνει μόνο τον πελάτη γ) τα έξοδα συντήρησης είναι αμελητέα αφού συνήθως σχετίζονται με τη DSL σύνδεση του πελάτη. Με βάση τα παραπάνω ο τύπος που υπολογίζει το λειτουργικό κόστος για τα Small Cells είναι:

$$C_{opex-small} = f_{site} * \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} * N * C_{i/f}$$

Και όπως και πιο πάνω το συνολικό κόστος εγκατάστασης ενός Macrocell, δίνεται από τη σχέση:

$$C_{small} = C_{capex} + C_{opex}$$

Με βάση το παραπάνω οικονομικό μοντέλο πήραμε την γραφική παράσταση του Σχήματος 25, η οποία απεικονίζει το κόστος εγκατάστασης των Small Cells και το κέρδος που έχουμε σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells.

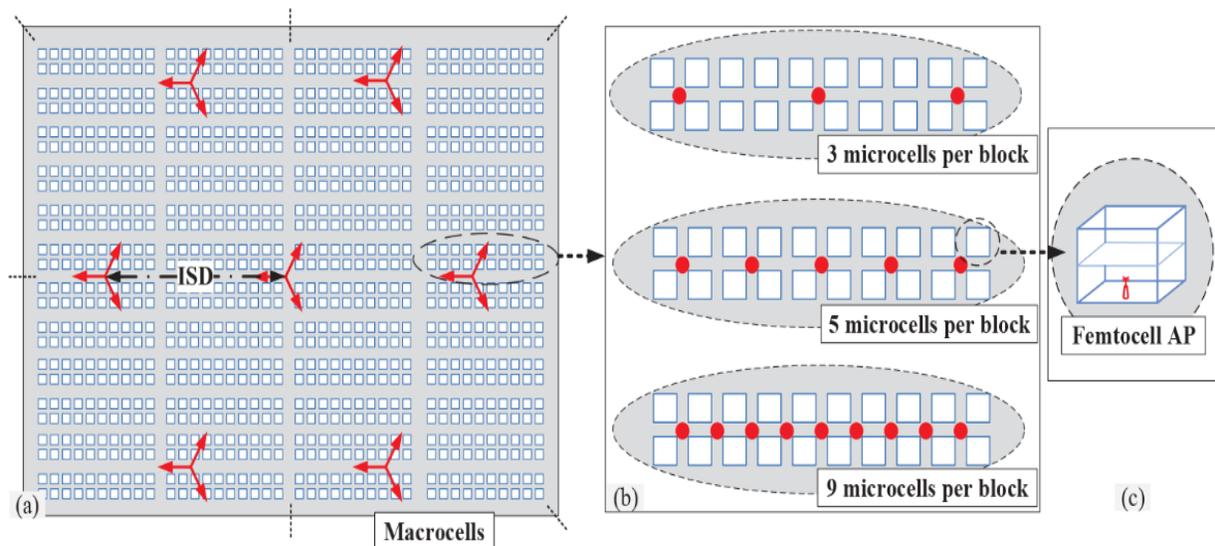


**Σχήμα 25: Σύγκριση κόστους εγκατάστασης των Small Cells και το κέρδος που έχουμε σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells [82].**

Στη έρευνα [84] οι συγγραφείς, με γνώμονα το γεγονός ότι η τεχνολογία Network Densification θα αποτελέσει οπωσδήποτε μέρος του σχεδιασμού των 5G δικτύων, εξετάζουν την περίπτωση επέκτασης του δικτύου με τη χρήση διαφορετικού μεγέθους cells. Πραγματοποιούν μια τεχνοοικονομική μελέτη η οποία βασίζεται σε διαφορετικές στρατηγικές εγκατάστασης cells για την επέκταση της χωρητικότητας του δικτύου, εξετάζοντας τις εξής τέσσερις περιπτώσεις:

- Densification με χρήση Macrocells
- Densification με χρήση Microcells
- Ultra Dense Small Cells
- Densification με χρήση Macrocells και Femtocells (HetNets)

Η σύγκριση μεταξύ των παραπάνω στρατηγικών πραγματοποιείται σε επίπεδο κάλυψης, χωρητικότητας, ενέργειας και φυσικά απόδοσης κόστους. Για την πραγματοποίηση της σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω σενάριο όπως φαίνεται στο Σχήμα 26.



**Σχήμα 26: Απεικόνιση του σεναρίου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση [83].**

Η περιοχή που θέλουμε να καλύψουμε αποτελείται από 48 τετράγωνα κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από 20 κτήρια διαστάσεων 10\*10 m, ύψους 5 m και το καθένα διαθέτει 2 ορόφους.

Προκειμένου να είναι δυνατή η πλήρης κάλυψη της περιοχής, οι συγγραφείς θα επιχειρήσουν τις εξής στρατηγικές κάλυψης οι οποίες φαίνονται και στο Σχήμα 26:

- Εγκατάσταση Macrocells όπως φαίνεται στην εικόνα (a).
- Εγκατάσταση Microcells όπως φαίνεται στην εικόνα (b). Στην περίπτωση αυτή οι συγγραφείς επιλέγουν τρεις υποπεριπτώσεις όπου σε κάθε περίπτωση τοποθετούν σε κάθε block 3, 5 και 9 Microcells αντίστοιχα.
- Εγκατάσταση Femtocells στον πρώτο όροφο κάθε κτηρίου όπως φαίνεται στην εικόνα (c) .
- Εγκατάσταση Macrocells και Femtocells.

Με βάση λοιπόν το παραπάνω σενάριο κατέληξαν στα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τα οποία παρατίθενται στο Σχήμα 27:

Deployment strategy	Area power consumption [kW/km <sup>2</sup> ]	Energy efficiency [bps/Hz/kW]	Energy efficiency @ W = 20 MHz	Total cost per Area [k€/km <sup>2</sup> ]	Cost efficiency [bps/Hz/k€]	Cost efficiency @ W = 20 MHz
<i>Macrocellular only:</i>						
Macrocell - ISD 1732 m	1.2	5.8	116 kbps/W	121	0.06	1.2 kbps/€
Macrocell - ISD 866 m	4.8	5	100 kbps/W	482	0.05	1 kbps/€
Macrocell - ISD 433 m	19.2	5.1	102 kbps/W	1924	0.051	1.02 kbps/€
<i>Microcellular only:</i>						
3 microcells per block	70.3	18	360 kbps/W	15002	0.08	1.6 kbps/€
5 microcells per block	117.2	16	320 kbps/W	25002	0.075	1.5 kbps/€
9 microcells per block	211	13.1	262 kbps/W	45000	0.062	1.24 kbps/€
<i>Femtocell only</i>	31.3	1894	37880 kbps/W	10313	5.75	115 kbps/€
<i>Macro-Femto HetNet:</i>						
Macrocell - ISD 1732 m	32.5	1306	26120 kbps/W	10434	4.1	82 kbps/€
Macrocell - ISD 866 m	36.1	963	19260 kbps/W	10795	3.2	64 kbps/€
Macrocell - ISD 433 m	50.5	616	12320 kbps/W	12237	2.5	50 kbps/€

**Σχήμα 27: Μελέτη απόδοσης του κόστους και της ενέργειας για τις διαφορετικές στρατηγικές εγκατάστασης [83].**

Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν όπως είπαμε και πιο πάνω τέσσερις μετρικές προκειμένου να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων και οι οποίες είναι η κάλυψη, η χωρητικότητα, η ενέργεια και η απόδοση κόστους. Από την οπτική της κάλυψης συμπεραίνουμε εύκολα ότι η καλύτερη λύση είναι αυτή που περιέχει τη χρήση Femtocells, είτε αυτή είναι η περίπτωση που χρησιμοποιούμε μόνο Femtocells είτε είναι η περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε Macrocells-Femtocells. Από την οπτική της ενέργειας και της απόδοσης κόστους, παρατηρώντας τον πίνακα συμπεραίνουμε ότι το μικρότερο κόστος αλλά και τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας/bit την έχει η λύση όπου χρησιμοποιούμε Femtocells για την επέκταση του δικτύου.

Ως εκ τούτου, παρατηρώντας και τις τέσσερις παραπάνω μελέτες η εισαγωγή των Small Cells στο σχεδιασμό των 5G δικτύων αποτελεί την πιο οικονομικά βιώσιμη λύση για επέκταση της χωρητικότητας του δικτύου ανάμεσα στους άλλους τύπους cells. Τα Small Cells διαθέτουν σταθερά το μικρότερο κόστος ενώ είναι και πιο φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία, τόσο λόγω μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας όσο και σε ότι αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [81].

### 2.6.3 Τεχνοοικονομικές Μελέτες που αφορούν το Cloud Computing

Η τεχνολογία Cloud Computing επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιήσουν υπολογιστικούς πόρους που βρίσκονται διαθέσιμοι σε ένα public Cloud, κοστολογώντας τους με βάση ένα "pay-as-you-go" μοντέλο, όπου οι χρήστες χρεώνονται ανάλογα με τον αριθμό των υπολογιστικών πόρων που χρησιμοποίησαν. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιούν τους κοινόχρηστους διατιθέμενους πόρους, με κόστος πολύ μικρότερο από το να διέθεταν ένα ιδιωτικό Cloud ενώ παράλληλα οι πάροχοι κερδίζουν εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι εξυπηρετούν ένα μεγάλο αριθμό πελατών. Σε θεωρητικό επίπεδο η τεχνολογία Cloud Computing, συγκεντρώνει όλα τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη στην υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, ωστόσο το ερώτημα είναι αν το ποσό που θα έχουμε εξοικονομήσει λόγω της υιοθέτησης της τεχνολογίας Cloud Computing, θα ξεπερνά τα απαιτούμενα έξοδα για την ενσωμάτωσή του.

Η χρέωση των υπηρεσιών στο Cloud διαθέτει δύο πτυχές. Αρχικά, οι παροχές του Cloud είναι άμεσα συνδεδεμένες με το σχεδιασμό του συστήματος. Η παροχή και κατανάλωση των πόρων είναι αλληλένδετες με τον τρόπο που ένα σύστημα σχεδιάζεται, ρυθμίζεται και ελέγχεται. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει άμεση σύνδεση του Cloud με τον τομέα των οικονομικών, αφού οικονομικές έννοιες όπως fairness [54] και competitive pricing, δημιουργούν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα για κάποιους παρόχους. Συνήθως οι πάροχοι και οι χρήστες του Cloud έχουν διαφορετικά και πολλές φορές ακόμη και αντικρουόμενα κίνητρα. Με τον όρο fairness αναφερόμαστε στην ισορροπία που πρέπει να υπάρχει ανάμεσα στο κέρδος του παρόχου και στο κόστος με το οποίο επιβαρύνεται ο πελάτης για τη χρήση του Cloud [32].

Η εργασία [36], προσπαθεί να δώσει απάντηση στο ερώτημα "To Cloud or Not To Cloud". Το γεγονός ότι ο αριθμός των παρόχων υπηρεσιών, οι οποίοι αρχίζουν να χρησιμοποιούν το Cloud Computing αυξάνεται συνεχώς, δείχνει το νέο ρεύμα που έχει διαμορφωθεί στην αγορά υπέρ αυτής της τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, πολύ μεγάλες εταιρείες όπως η Google, η Amazon, η Yahoo έχουν αρχίσει να προσφέρουν αποθηκευτικό χώρο και υπολογιστικούς πόρους υπό τη μορφή υπηρεσιών Cloud. Με άλλα λόγια οι κύκλοι CPU, έχουν γίνει καταναλωτικό προϊόν στη διάθεση των χρηστών. Στην εργασία αυτή, παρατίθεται ένα οικονομικό μοντέλο βάση του οποίου θα «στήσουμε» το data center πάνω στο οποίο θα υλοποιηθεί το Cloud για μια μεγάλη επιχείρηση. Ένα Cloud μιας μεγάλης επιχείρησης αποτελείται από περισσότερους από 10000 servers, κατανομημένους σε διαφορετικές χώρες και διαφορετικές ηπείρους.

Επειδή ωστόσο όπως είπαμε μας ενδιαφέρει η οικονομική βιωσιμότητα του Cloud, στη συνέχεια μας δίνεται το σύνολο των παραγόντων δαπανών, που απαιτούνται για το στήσιμο του Data Center.

- Το Hardware του Server: Το κόστος για την αγορά hardware περιλαμβάνει την αγορά servers, εξοπλισμού τροφοδοσίας, εξοπλισμού δικτύου, μηχανισμού ψύξης κ.α. Στα μεγάλα Data Centers χρησιμοποιούνται custom συστήματα με 4 CPUs συνολικής αξίας 3000\$, ενώ οι μελλοντικές προβλέψεις

για το κόστος μιας CPU για ένα μεγάλο Data Center κάνουν λόγο για 500\$ ανά CPU.

- Ενέργεια: Η ενεργειακή δαπάνη στα Data Centers, δεν περιλαμβάνει μόνο την ενέργεια που καταναλώνουν οι υπολογιστικοί πόροι, αλλά την ενέργεια που καταναλώνει συνολικά ολόκληρη η υποδομή. Μια μετρική απόδοσης για να υπολογίσουμε την ενέργεια ενός Data Center είναι η

$$PUE = \frac{\text{Total Power Usage}}{\text{IT Equipment Power Usage}}$$

Η ενέργεια σε ένα Data Center, καταναλώνει το 60%-70% του συνολικού κόστους του Data Center.

- Service: Το κόστος για τη συντήρηση, την επισκευή και την αναβάθμιση του εξοπλισμού των Data Centers.
- Το Hardware του Δικτύου: Το κόστος που απαιτείται για την αγορά εξοπλισμού που αφορά τη συνδεσιμότητα του δικτύου όπως routers, switches κ.λπ.
- Η ενοικίαση του χώρου: Οι χρεώσεις για την ενοικίαση του χώρου, διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τη χρήση. Οι μεγάλες εταιρείες όπως η Google και η Microsoft, στήνουν τα Data Centers σε κτήρια τα οποία τους ανήκουν, σε περιοχές οι οποίες είναι αραιοκατοικημένες και σε περιοχές όπου η τιμή του τετραγωνικού μέτρου είναι χαμηλή.

Στην εργασία [32], μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένα οικονομικό μοντέλο που αφορά την χρέωση των υπηρεσιών του EC2 Cloud της εταιρείας Amazon. Σύμφωνα λοιπόν με τους συγγραφείς της εργασίας, το κόστος που επιβαρύνει τον πελάτη δίνεται από τον τύπο  $Cost_{user} = Price * t$ , όπου  $t$  είναι ο χρόνος σε ώρες που ο χρήστης χρησιμοποιεί τους πόρους του Cloud ενώ  $Price$  είναι η χρέωση για κάθε ώρα χρήσης μιας Virtual Machine. Τα κόστη για αποθηκευτικό χώρο και για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ πελάτη και Cloud γιατί είναι αμελητέα σύμφωνα με τους συγγραφείς (λιγότερο από 1% του συνολικού κόστους).

Προκειμένου να αξιολογηθεί το κόστος του Data Center στο οποίο τρέχουν οι Virtual Machines που προσφέρονται στους χρήστες, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το μοντέλο Hamilton [84], σύμφωνα με το οποίο το συνολικό κόστος κατανάλωσης ενέργειας δίνεται από τον τύπο  $Cost_{full-energy} = (p * P_{raw} * PUE)$ , όπου  $p$  είναι η τιμή της κιλοβατώρας,  $P_{raw}$  είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας του IT εξοπλισμού (π.χ. servers, routers) και  $PUE$  η μετρική απόδοσης που αναφέραμε πιο πάνω.

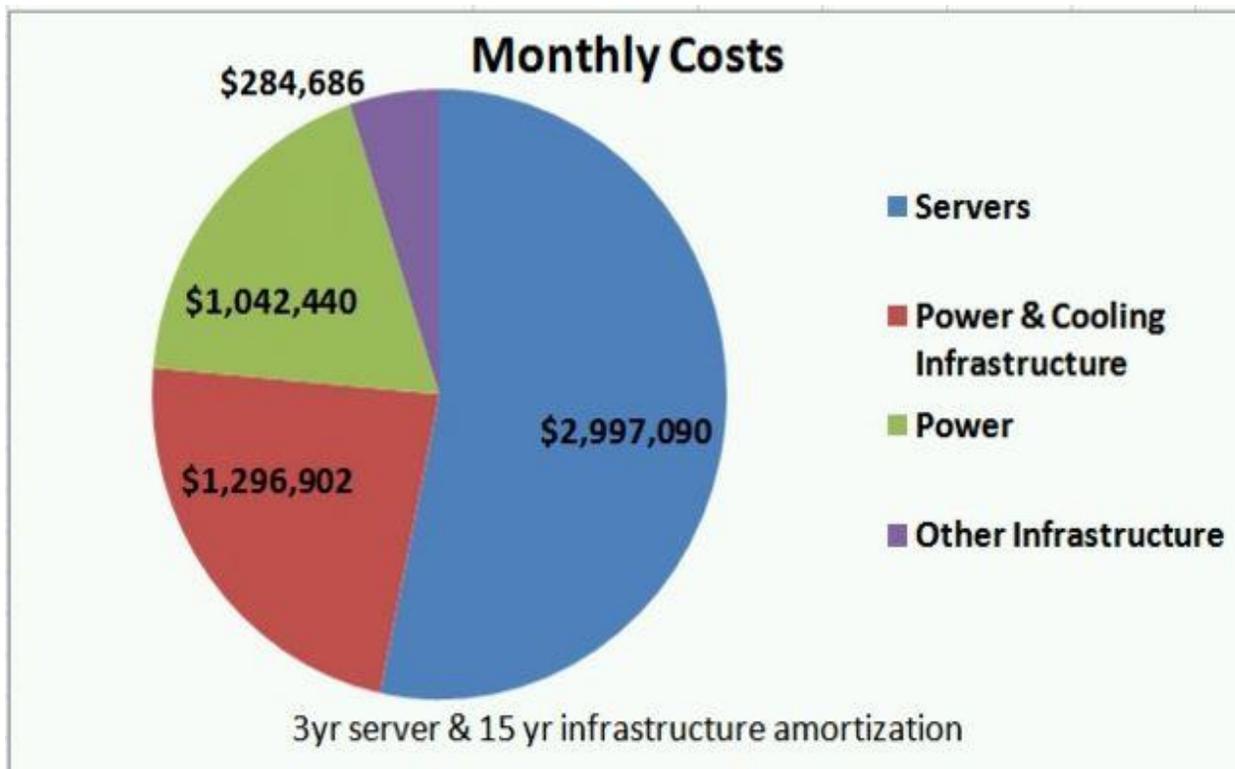
Το συνολικό κόστος του παρόχου υπολογίζεται από τον τύπο,

$$Cost_{provider} = (Cost_{full-energy} + Cost_{amortized}) * Scale$$

Όπου  $Scale$  είναι ο λόγος του συνολικού κόστους προς το άθροισμα  $Cost_{full-energy} + Cost_{amortized}$  και το  $Cost_{amortized}$  για κάθε server ισούται με  $Cost_{amortized-Unit} * t_{server}$  όπου  $t_{server}$  ο χρόνος που έχει παρέλθει στο server σε ώρες.

Τέλος το  $P_{raw}$  είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας στους servers και τα routers.

Με χρήση του παραπάνω οικονομικού μοντέλου, μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος για τη δημιουργία και τη συντήρηση ενός Data Center πάνω στο οποίο θα στηριχθεί το Cloud και προκειμένου να πάρουμε μια ποσοτική εκτίμηση του κόστους αυτού, μπορούμε να στηριχθούμε στο γράφημα του Σχήματος 28 το οποίο απεικονίζει το μηνιαίο OPEX ενός μεγάλου Data Center, οι τιμές του οποίου φαίνονται στο [84].

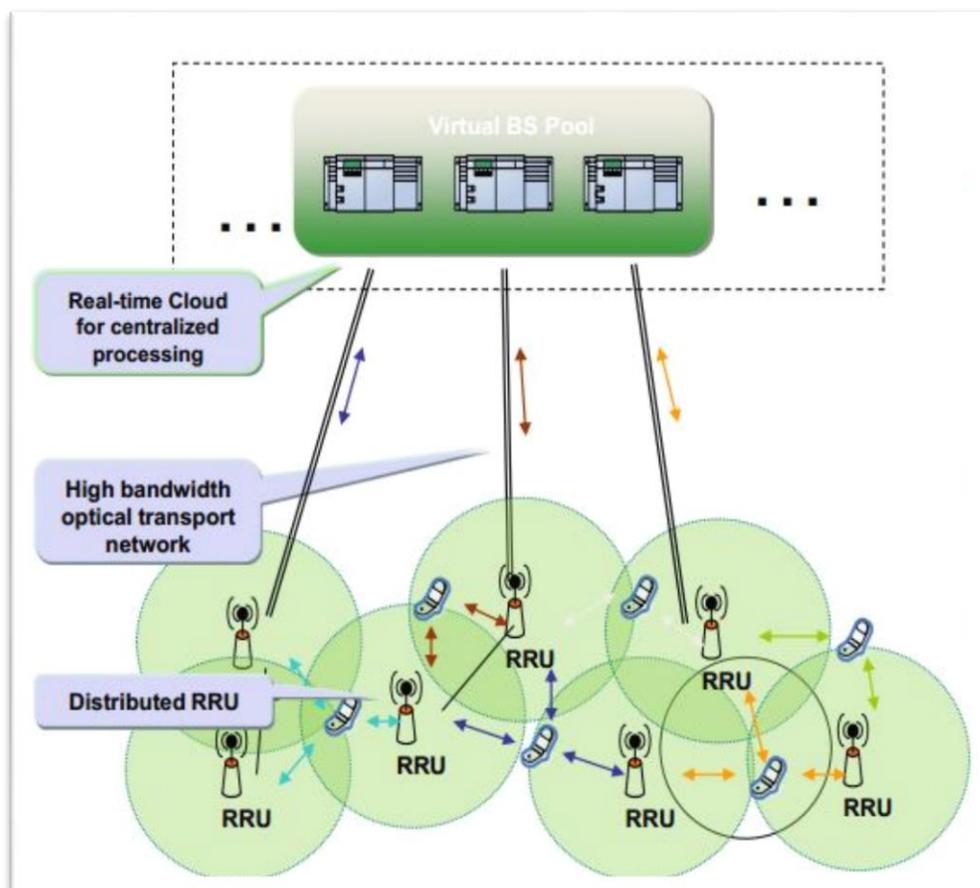


**Σχήμα 28: Pie Chart του μηνιαίου λειτουργικού κόστους ενός Data Center [84].**

Ωστόσο, όπως αναφέραμε και πιο πάνω και όπως θα καταδείξουμε και στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα παρουσιάσουμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, το Cloud Computing θα παίξει καθοριστικό ρόλο στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης δημιουργώντας το Cloud-RAN όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.

Η επόμενη μελέτη που θα παρουσιάσουμε, πραγματοποιείται την υιοθέτηση του C-RAN και πραγματοποιήθηκε από το China Mobile Research Institute [85]. Οι συγγραφείς της μελέτης αυτής, αφού αρχικά επισημαίνουν με στοιχεία την ανάγκη για εξεύρεση ενός οικονομικά βιώσιμου τρόπου για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου αλλά και για την αποτροπή εγκατάστασης περισσότερων σταθμών βάσης λόγω της αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης, προτείνουν την υλοποίηση του C-RAN.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 29 πρότεinan την τυπική αρχιτεκτονική του Cloud-RAN, στην οποία υπάρχει ένας κεντρικοποιημένος χώρος όπου υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι προς χρήση, οι οποίοι μπορούν να υποστηρίξουν περίπου 10~1000 cells. Επιπλέον εκμεταλλεύονται τον κεντρικοποιημένο έλεγχο της επεξεργασίας των σημάτων, προκειμένου να υπάρχει συντονισμός μεταξύ των cells αλλά και η δυνατότητα δυναμικής δέσμμευσης πόρων.



**Σχήμα 29: Κεντρικοποιημένη Cloud-RAN αρχιτεκτονική [85].**

Σύμφωνα λοιπόν με το China Mobile Research Institute, το Cloud-RAN ικανοποιεί όλα τα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά και στη συνέχεια παρατίθενται τα προσδοκώμενα οφέλη από την υιοθέτηση του. Αρχικά η κεντρικοποιημένη αρχιτεκτονική προσφέρει μείωση του CAPEX κατά 15% και μείωση του OPEX κατά 50%, σύμφωνα με στοιχεία που προκύπτουν από την επεξεργασία δεδομένων από κινητά εμπορικά δίκτυα της Κίνας. Επίσης παρατηρείται κατά 71% μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με την παραδοσιακή σχεδίαση του RAN, ενώ ακόμη ο χρόνος που απαιτείται για επέκταση του συστήματος μειώνεται στο 1/3, αφού πλέον εγκαθιστούμε μόνο απλές κεραιές (RRH).

Στη συνέχεια οι συγγραφείς της μελέτης υποστηρίζουν πως η ανάπτυξη του τομέα IT λειτουργεί ευεργετικά για τον τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών, για λόγους που θα αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, συμπεραίνουμε ότι η εισαγωγή του Cloud Computing είναι επιβεβλημένη στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, γεγονός που επιβεβαιώνετε όχι μόνο από τις μελέτες που παραθέσαμε παραπάνω αλλά και από το γεγονός ότι όλες οι μεγάλες εταιρείες στο χώρο της τεχνολογίας (π.χ. Microsoft, Google, Amazon, Yahoo) έχουν δείξει ήδη το δρόμο και έχουν δημιουργήσει τα δικά τους Clouds τα οποία τους αποφέρουν τεράστια κέρδη με σχετικά μικρό κόστος.

### 3. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως οι Ultra Dense Deployments, Cloud-RAN, SDN, NFV κλπ. είναι αναπόφευκτη εφόσον θέλουμε να ικανοποιήσουμε τους στόχους που έχουν τεθεί για τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς, τα οποία απαιτούν μεγαλύτερη χωρητικότητα, μικρότερες καθυστερήσεις και δυνατότητα πρόσβασης στο δίκτυο από διάφορα σημεία. Επιπλέον, ο μεγάλος αριθμός εφαρμογών αλλά και οι διαφορετικές απαιτήσεις σε πόρους, καθιστούν απαραίτητη τη δυνατότητα δυναμικής δέσμευσης πόρων και διάθεση τους ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας, βρίσκονται συνεχώς αντιμέτωποι με το πρόβλημα της εκρηκτικής αύξησης των δεδομένων που θα πρέπει να μεταφέρονται μέσω του δικτύου και καλούνται να βρουν τη χρυσή τομή ανάμεσα στο QoS και στην διατήρηση του κόστους σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό συνεπάγεται δυνατότητα ελέγχου του φόρτου εργασίας του δικτύου και την εύκολη υλοποίηση νέων λειτουργιών ή αναβάθμιση παλαιότερων χωρίς να είναι απαραίτητη κάποια μεγάλη επένδυση. Με άλλα λόγια, στις εταιρείες τηλεπικοινωνιών υπάρχει μια διαρκής πίεση να γίνουν πιο ανταγωνιστικές, αυξάνοντας τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν στους πελάτες τους μειώνοντας παράλληλα το λειτουργικό κόστος (OPEX). Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, διατηρώντας την σημερινή μορφή των δικτύων, αντιμετωπίζουν και θα αντιμετωπίσουν στο μέλλον σε μεγαλύτερο βαθμό, προβλήματα που αφορούν την στατικότητα του δικτύου, την απουσία ευελιξίας, το μεγάλο κόστος των «κλειστών» δικτυακών συσκευών, τη δυσκολία κοινού συντονισμού των στοιχείων του δικτύου λόγω μεγάλης ετερογένειας και διαφορετικών πρωτοκόλλων κλπ.

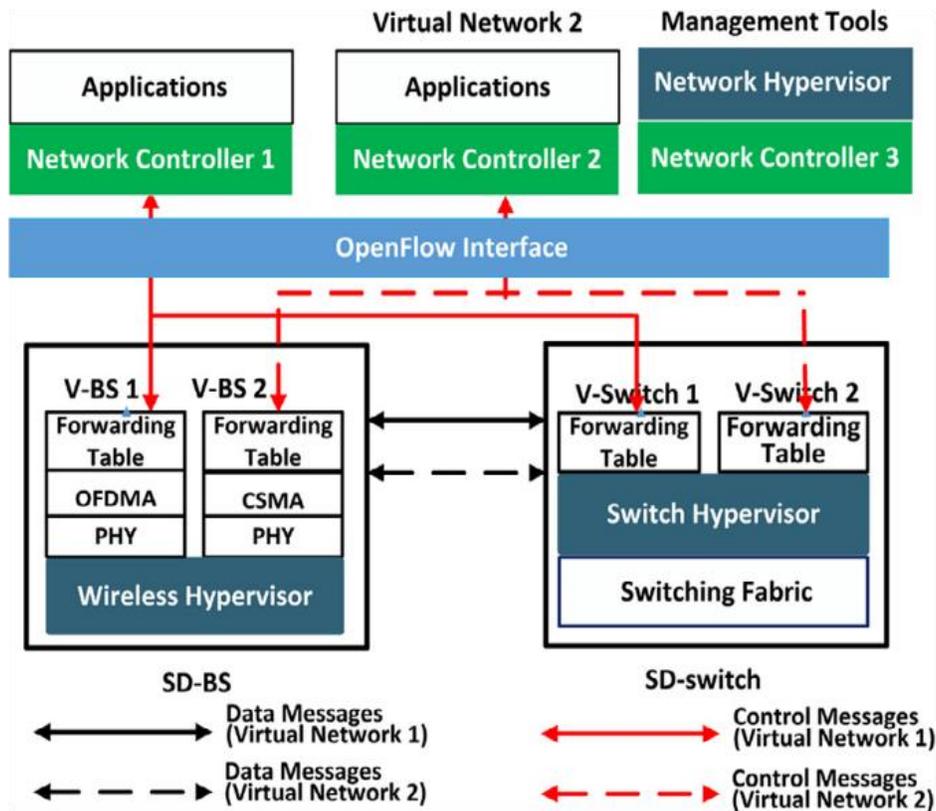
Τεχνολογίες όπως το Cloud Computing και το NFV, εξελίσσονται από απλές IT τεχνολογίες σε αναπόσπαστα κομμάτια του σχεδιασμού των δικτύων. Το Cloud Computing στα δίκτυα 5G, θα αποτελέσει το πλαίσιο μέσα στο οποίο οι χρήστες θα έχουν αδιάκοπη και εύκολη on-demand πρόσβαση σε ένα κοινόχρηστο χώρο δικτυακών πόρων, όπως π.χ. servers, αποθηκευτικό χώρο, εφαρμογές και υπηρεσίες. Όσο αφορά την τεχνολογία Network Virtualization, ασχολείται με τη συγκέντρωση «εικονικών αντιγράφων» των δικτυακών πόρων οι οποίοι βρίσκονται διασκορπισμένοι σε όλη την έκταση του δικτύου, σε ένα κοινόχρηστο εικονικό χώρο (π.χ. Cloud) με σκοπό να είναι δυνατή η πρόσβαση των χρηστών σε πόρους hardware, ανεξαρτήτως της φυσικής τους υπόστασης. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η τεχνολογία NFV, δημιουργεί τους εικονικούς πόρους εκμεταλλευόμενη τις φυσικές δικτυακές υποδομές, ενώ το Cloud Computing αποτελεί το μέσο το οποίο θα φιλοξενήσει όλους αυτούς τους εικονικούς πόρους και μέσω του οποίου οι χρήστες θα αποκτούν άμεση και εύκολη πρόσβαση σε δικτυακούς πόρους και υπηρεσίες. Διαφορετικές υπηρεσίες θα μπορούν να εγκαθίστανται πάνω σε εικονικούς πόρους, προσφέροντας τη δυνατότητα για μεγαλύτερη ευελιξία και διαθεσιμότητα. Στην προσπάθεια υλοποίησης των στόχων που έχουν τεθεί για το 5G, οι πάροχοι υπηρεσιών καλούνται να επιτύχουν υψηλές ταχύτητες και αδιάκοπη συνδεσιμότητα, χωρίς όμως να απαιτούνται τεράστιες επενδύσεις.

Οι πάροχοι υπηρεσιών προσπαθούν να πείσουν τους επενδυτές να απομακρυνθούν από το εξειδικευμένο hardware και να υλοποιήσουν τις λειτουργίες τους υπό μορφή software οι οποίες «τρέχουν» σε απλούς servers. Η ανάγκη των παρόχων για μείωση του λειτουργικού κόστους (OPEX) και του κεφαλαιακού κόστους (CAPEX), έρχεται σε αντίθεση με τον παραδοσιακό τρόπο σχεδίασης των δικτύων αφού επιβαρύνονται από τα παρακάτω [88]:

- Οι επενδύσεις για την επέκταση του δικτύου εξαρτώνται από τη φυσική υποδομή (hardware) πάνω στην οποία στηρίζεται το δίκτυο. Το υψηλό κόστος για την αναβάθμιση του δικτύου ή για την υλοποίηση μιας νέας δικτυακής υπηρεσίας αποτελεί μεγάλο μέρος του περιθωρίου κέρδους του παρόχου.
- Πέρα από το πολύ υψηλό κόστος του εξειδικευμένου hardware, η ενεργειακή κατανάλωση των συγκεκριμένων συσκευών αποτελεί ακόμα ένα πρόβλημα
- Η εξεύρεση του κατάλληλου προσωπικού που θα διαθέτει τις γνώσεις για τη σχεδίαση και διαχείριση όλο και πιο πολύπλοκων συσκευών.
- Επίσης η διαχείριση της υποδομής του δικτύου είναι ακόμα ένας πονοκέφαλος για τους παρόχους, αφού κάθε τέτοια εξειδικευμένη hardware συσκευή διαθέτει το δικό της πρωτόκολλο, της δικές της ρυθμίσεις κ.α.

Αυτοί οι λόγοι όχι μόνο μειώνουν τα έσοδα του παρόχου, αλλά αυξάνουν και το time-to-market για την υλοποίηση νέων υπηρεσιών και προϊόντων, ενώ παράλληλα περιορίζουν την καινοτομία και την πρόοδο στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών. Για αυτούς τους λόγους οι πάροχοι προσπαθούν να ελαττώσουν ή ακόμα και να εξαλείψουν την εξάρτησή τους από εξειδικευμένο και κλειστό hardware επενδύοντας στην τεχνολογία NFV. Η τεχνολογία NFV στοχεύει στην υλοποίηση των λειτουργιών του δικτύου υπό μορφή software και τη μεταφορά τους από εξειδικευμένες κλειστές hardware συσκευές σε απλούς servers. Μέσω της χρήσης του NFV, οι λειτουργίες του δικτύου μπορούν να υλοποιούνται σε διαφορετικές περιοχές όπως σε Data Centers, στους κόμβους του δικτύου κ.α.

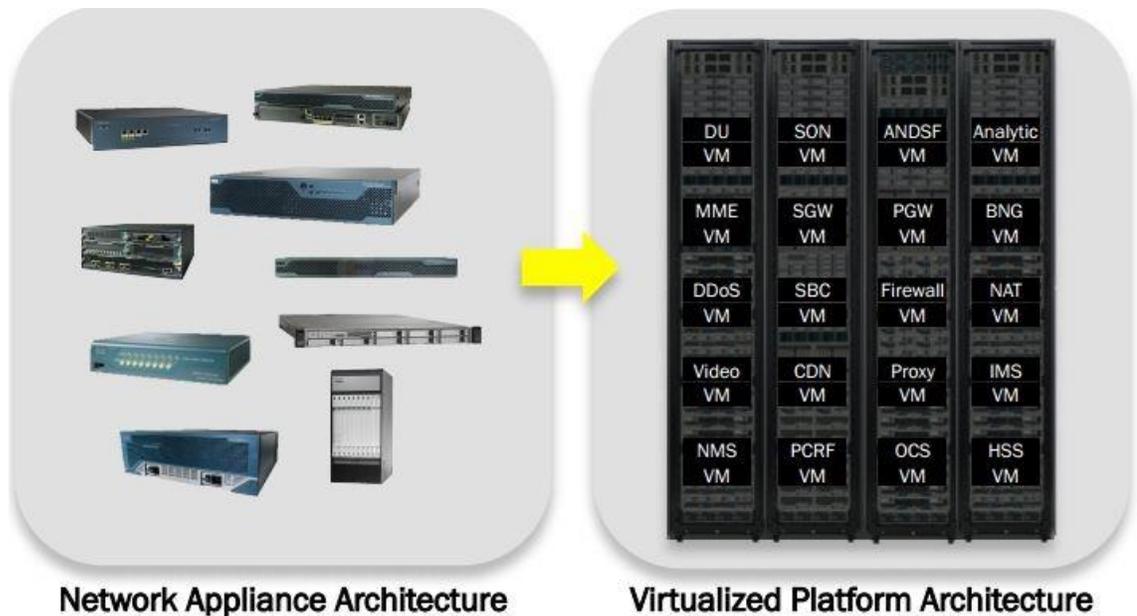
Με τη χρήση του Network Virtualization δίνεται η δυνατότητα υλοποίησης πολλαπλών Virtual Networks μεταξύ των οποίων δεν υπάρχουν παρεμβολές και τα οποία μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή. Αυτά τα Virtual Networks μπορούν να δημιουργούνται κατ' απαίτηση του χρήστη και να τους ανατίθενται δυναμικά δικτυακοί πόροι. Τα Virtual Networks παρότι μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή, είναι απομονωμένα μεταξύ τους, το καθένα μπορεί να χρησιμοποιεί όποια πρωτόκολλα θέλει και οι λειτουργίες του κάθε Virtual Network, δεν επηρεάζουν τις λειτουργίες των άλλων. Στην Σχήμα 30 που ακολουθεί, βλέπουμε τον τρόπο που ενσωματώνεται η τεχνολογία Network Virtualization στο SoftAir.



**Σχήμα 30: Network Virtualization του SoftAir [78].**

Στη γενική μορφή, τα βασικά μέρη που αποτελούν μια εικονική πλατφόρμα στην οποία υλοποιείται η τεχνολογία NFV, είναι:

- **Server (Φυσικός):** Ο φυσικός server περιέχει όλους τους απαραίτητους πόρους για την εκτέλεση των λειτουργιών. Πιο συγκεκριμένα, στον server βρίσκεται η CPU, ο αποθηκευτικός χώρος και η μνήμη RAM.
- **Hypervisor:** Είναι το software το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο, τη διαχείριση και το διαμοιρασμό των φυσικών πόρων. Προσφέρει το εικονικό περιβάλλον στο οποίο θα υλοποιηθούν και θα εκτελεστούν οι Virtual Machines.
- **Virtual Machine:** Μια software υλοποίηση η οποία προσομοιώνει την αρχιτεκτονική και τις λειτουργίες μιας φυσικής πλατφόρμας. Οι VMs ανατίθενται στους χρήστες και σε αυτές εκτελούνται οι επιθυμητές εφαρμογές. Στο Σχήμα 31, παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα φυσικών δικτυακών συσκευών οι οποίες υλοποιούνται σε VMs.



**Σχήμα 31: Hardware Δικτυακές συσκευές και η υλοποίηση τους σε Virtual Machines [79].**

### 3.1 Παρουσίαση του SoftAir

Εφόσον στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε τις νέες τεχνολογίες που πιστεύουμε ότι θα παίξουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και την υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, το επόμενο βήμα είναι να δείξουμε το πώς αυτές οι τεχνολογίες θα ενσωματωθούν στα δίκτυα 5G παρουσιάζοντας την αρχιτεκτονική του δικτύου.

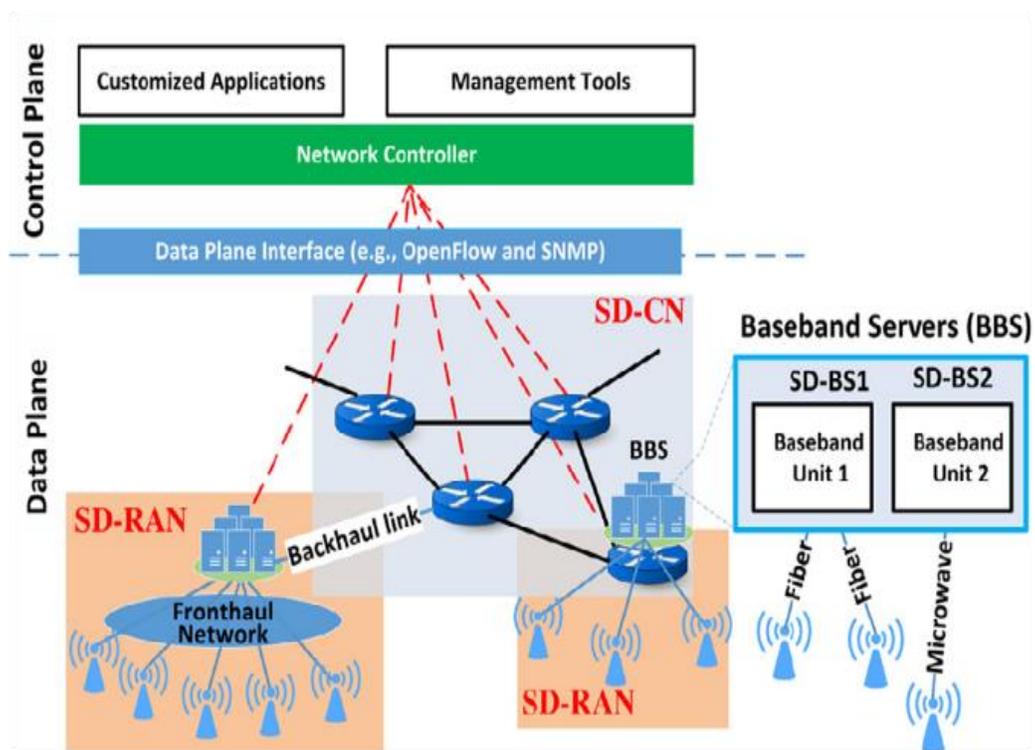
Τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούνται στη γενική τους μορφή από δύο τμήματα: α) το δίκτυο πρόσβασης RAN (Radio Access Network) και β) το δίκτυο κορμού EPC (Evolved Packet Core). Στα επόμενα κεφάλαια θα προτείνουμε τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να σχεδιαστούν τα τμήματα του δικτύου 5G λαμβάνοντας υπόψιν τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν τεθεί, το συνδυασμό των τεχνολογιών SDN, Cloud-RAN και NFV και κρατώντας το κόστος της επένδυσης σε χαμηλά επίπεδα [77]. Στις επόμενες σελίδες θα προτείνουμε μια αρχιτεκτονική που συγκεντρώνει όλες τις παραπάνω τεχνολογίες και η οποία είναι το SoftAir [78], το οποίο αποτελεί μια software defined αρχιτεκτονική για τα 5G δίκτυα.

Πιο συγκεκριμένα η αρχιτεκτονική SoftAir αποτελείται από ένα επίπεδο που αφορά την προώθηση των δεδομένων (Data Plane) και ένα επίπεδο που αφορά τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου (Control Plane).

- Το Data Plane, αναφέρεται στην υποδομή του δικτύου για προώθηση των δεδομένων. Είναι «ανοιχτό», προγραμματιζόμενο και υποστηρίζεται η χρήση NFV. Το Data plane, χωρίζεται στο SD-RAN, το οποίο αποτελείται από Software Defined σταθμούς βάσης (SD-BSSs) και στο SD-CN, το οποίο αποτελείται με τη σειρά του από Software Defined Switches (SD-Switches).

- Το Control Plane, απαρτίζεται από τα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου και από διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες των SPs. Τα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου, δημιουργήθηκαν για να απαντήσουν στα προβλήματα που αναφέραμε παραπάνω σε σχέση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό των δικτύων. Τα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου εισάγουν νέες τεχνολογίες όπως το NFV και το SDN και είναι α) η δυνατότητα ελέγχου και εξισορρόπησης του φόρτου εργασίας στο δίκτυο, β) η δημιουργία εικονικών πόρων του δικτύου (resource virtualization) και ο αποδοτικός διαμοιρασμός τους και γ) η δυνατότητα συσχέτισμού της κίνησης στο δίκτυο με τις εφαρμογές που τη δημιούργησαν και η λήψη απαραίτητων μέτρων.

Στο σχήμα 32 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του SoftAir και εν συνεχεία θα αναλύσουμε διεξοδικά τα μέρη από τα οποία απαρτίζονται το Control Plane και το Data Plane.



**Σχήμα 32: Συνολική αρχιτεκτονική του SoftAir [78].**

- SD-CN: Το SD-CN είναι το Core Network του δικτύου και αποτελείται από switches που υποστηρίζουν την τεχνολογία SDN. Χρησιμοποιώντας τα SD-switches, μπορούμε να υλοποιήσουμε στο επίπεδο προώθησης των δεδομένων υπηρεσίες και δυνατότητες όπως ο έλεγχος δρομολόγησης, το QoS, η ολιστική εικόνα που διατηρεί ο controller για το δίκτυο κλπ. Η ενσωμάτωση του SDN και του NFV στο δίκτυο κορμού έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία σε υλοποιήσεις όπως το SWAN της Microsoft [53], το B4 της Google [52] κ.α., με

αποτέλεσμα την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου και την αύξηση της χρησιμοποίησης των virtual links από 40% σε 70%. Με το δίκτυο κορμού ωστόσο, θα ασχοληθούμε διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα αναλύσουμε όλες τις οντότητες του EPC.

- SD-RAN: Το SD-RAN είναι το Radio Access Network του δικτύου, όπου στην αρχιτεκτονική που προτείνεται η επεξεργασία δεν είναι κεντροποιημένη αλλά «εν μέρει διαμοιραζόμενη». Πιο συγκεκριμένα, κάθε σταθμός βάσης ο οποίος υποστηρίζει την τεχνολογία SDN (SD-BS), απαρτίζεται από δύο μέρη: α) την κεραία RRH μέσω της οποίας συνδέεται ο χρήστης στο RAN και β) από την μονάδα BBS στην οποία πραγματοποιείται η επεξεργασία των σημάτων, η οποία υλοποιείται με τη μορφή λογισμικού. Οι δύο αυτές οντότητες συνήθως δεν βρίσκονται στο ίδιο σημείο και συνδέονται μέσω του fronthaul δικτύου, όπου η μετάδοση μπορεί να γίνεται είτε μέσω οπτικής ίνας, είτε μέσω της μικροκυματικής ζώνης ανάλογα με την διαθέσιμη υποδομή, με τη χρήση της διεπαφής CPRI. Η διεπαφή αυτή είναι ανοιχτού κώδικα και αναπτύχθηκε από κοινού από όλες τις εταιρείες κολοσσούς στο χώρο των δικτύων, όπως η Ericsson, η Huawei, η Nokia Siemens και η Alcatel. Η διεπαφή αυτή διευκολύνει πάρα πολύ την διαμοιρασμένη αρχιτεκτονική που περιγράφουμε αφού επιτρέπει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (10 Gbit/s), υψηλό συγχρονισμό και μικρό ρυθμό σφαλμάτων ( $10^{-12}$ ) μεταξύ RRH και BSS.

## 3.2 Data Plane

### 3.2.1 Radio Access Network

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ένα πολύ σημαντικό μέρος της υποδομής των cellular δικτύων είναι το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης (RAN) το οποίο προσφέρει αδιάκοπη συνδεσιμότητα στις ασύρματες συσκευές. Το «αιώνιο» πρόβλημα το οποίο καλούνται να λύσουν τα RANs είναι ο αποδοτικός διαμοιρασμός του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος, προκειμένου να επιτευχθεί συνδεσιμότητα. Όταν τοποθετούμε δικτυακούς κόμβους με μεγάλη πυκνότητα σε μια περιοχή και δεδομένου του περιορισμένου φάσματος, γίνεται δύσκολος ο διαμοιρασμός των πόρων ασύρματης πρόσβασης, η διαχείριση των handovers, η αντιμετώπιση των παρεμβολών και η εξισορρόπηση του φορτίου μεταξύ των cells [76, 78].

Λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος, οι γειτονικοί σταθμοί βάσεις σε Ultra Dense Deployments θα πρέπει να λειτουργούν στο ίδιο κανάλι συχνοτήτων. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση μιας συχνότητας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη διαχείριση των πυκνών δικτύων, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι οι αποφάσεις που σχετίζονται με την αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, λαμβάνονται από κάθε σταθμό βάσης ξεχωριστά. Για παράδειγμα, οι σταθμοί βάσης δεσμεύουν κάποιους από τους διαθέσιμους πόρους προκειμένου να μεταδώσουν σε κάποια συσκευή και

αυτό επηρεάζει και τους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Έτσι προκύπτει η ανάγκη για την ανάπτυξη μηχανισμών οι οποίοι θα λαμβάνουν μέριμνα για την αντιμετώπιση των παρεμβολών μεταξύ των γειτονικών σταθμών βάσης, αλλά και για τον συντονισμό των γειτονικών σταθμών βάσης προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου και να πραγματοποιείται η εξισορρόπηση του φορτίου εργασίας. Στις Ultra Dense Deployments λόγω του μικρού μεγέθους των cells, ο συντονισμένος έλεγχος στη λήψη αποφάσεων θα πρέπει να γίνεται για πολλούς σταθμούς βάσης ταυτόχρονα.

Ωστόσο, λόγω των πολλών σταθμών βάσης που πρέπει να συντονίσουμε δημιουργούνται προβλήματα καθυστέρησης, γεγονός που αντιτίθεται στην πρόβλεψη για ελάχιστο latency στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Έτσι λοιπόν γεννήθηκε η ιδέα ότι όλοι οι σταθμοί βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή θα ήταν βολικό να αναπαρασταθούν ως ένας μεγάλος εικονικός κόμβος ο οποίος θα επικοινωνεί με τους φυσικούς σταθμούς βάσης. Ένας κεντροποιημένος λογικός ελεγκτής θα λαμβάνει τις αποφάσεις για όλους τους σταθμούς βάσης, οι οποίοι πλέον θα είναι απλές κεραιές. Αντί κάθε σταθμός βάσης να έχει τους δικούς του πόρους, όλοι οι πόροι θα είναι κοινόχρηστοι και διαθέσιμοι σε κάθε σταθμό βάσης κάθε στιγμή. Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα είναι το γεγονός ότι τα σημερινά ασύρματα δίκτυα, βασίζονται σε κλειστό hardware γεγονός που κάνει την αρχιτεκτονική πολύ στατική και δεν διευκολύνει την αναβάθμιση και την καινοτομία. Τέτοιες αρχιτεκτονικές διαθέτουν ένα κύκλο ζωής 10 χρόνων εφόσον η αλλαγή τους απαιτεί μεγάλο αριθμό επενδύσεων και αυτή η στατικότητα της αρχιτεκτονικής δεν γίνεται να εναρμονιστεί με την ευελιξία που απαιτούν τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη δημιουργία ενός RAN το οποίο να υποστηρίζει τεχνολογίες όπως το SDN και το NFV προκειμένου να μπορέσει να ανταπεξέλθει στα παραπάνω προβλήματα, όπως π.χ. το SoftRan [76], το CellSDN [64], το Concert [50] κ.α. Εμείς εδώ θα αναλύσουμε την αρχιτεκτονική του SoftAir [78] για το Radio Access Network και η οποία περιεγράφηκε πιο πάνω.

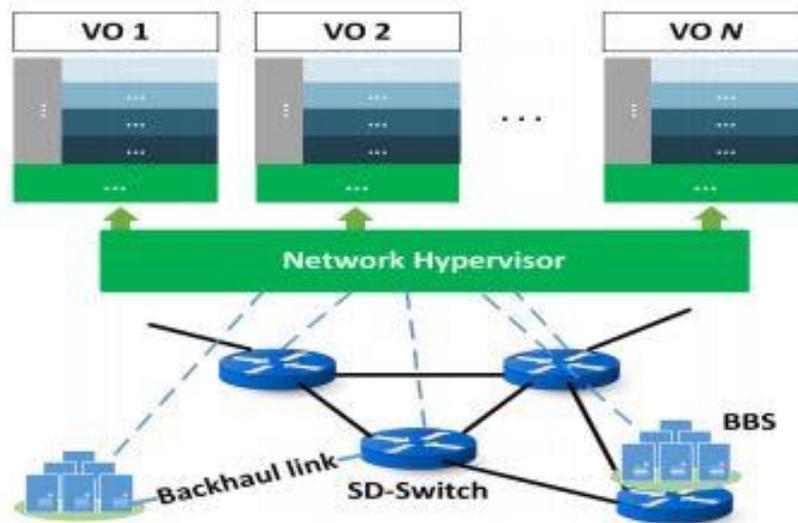
Όπως αναφέραμε και πιο πάνω το SoftAir υποστηρίζει την τεχνολογία του Network Virtualization προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα διαμοιρασμού της ίδιας φυσικής υποδομής. Στο δίκτυο 5G θεωρείται δεδομένη η αδιάκοπη σύνδεσή στο δίκτυο τόσο των κινητών συσκευών όσο και των εφαρμογών τους, για αυτό οι πάροχοι υπηρεσιών αναγκάζονται συνεχώς να αναβαθμίζουν και να ενισχύουν την υποδομή τους. Το Virtualization των κινητών δικτύων, στοχεύει τόσο στους σταθμούς βάσης όσο και στο δίκτυο κορμού του δικτύου. Οι πάροχοι υπηρεσιών δείχνουν μεγάλο ενδιαφέρον στη δημιουργία εικονικών σταθμών βάσης έτσι ώστε να μπορούν να υλοποιούν και να ενσωματώνουν όσες περισσότερες λειτουργίες μπορούν σε απλό μη εξειδικευμένο hardware, προκειμένου να μπορούν να εξυπηρετούν διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης με έναν εικονικό σταθμό βάσης. Δημιουργώντας εικονικούς σταθμούς βάσης, οι πάροχοι αποκτούν την ευκαιρία να προσφέρουν μια κεντροποιημένη υποδομή για τη διαχείριση πολλαπλών σταθμών βάσης, το οποίο οδηγεί σε μικρότερου κόστους σταθμούς βάσης. Επιπλέον, οι πάροχοι υπηρεσιών θα επωφεληθούν από το διαμοιρασμό των εικονικών σταθμών βάσης προκειμένου να επιτύχουν καλύτερη γεωγραφική κάλυψη πραγματοποιώντας μικρότερες επενδύσεις [88].

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του SoftAir, λόγω της τεχνολογίας Virtualization επιτρέπει την υλοποίηση κάποιων πολύ ωφέλιμων υπηρεσιών, όπως:

- a) Επιτρέπει στους παρόχους να υιοθετήσουν διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες (π.χ. Small Cells, HetNets, LTE).
- b) Επιτρέπει τον διαμοιρασμό του RAN μεταξύ των παρόχων, προσφέροντας έτσι στους παρόχους τη δυνατότητα εξοικονόμησης έως και 60 δισεκατομμυρίων σε 5 χρόνια, μέσω της μείωσης των επενδύσεων για αγορά εξοπλισμού σε περιοχές με χαμηλή κίνηση.
- c) Επιταχύνει την ανάπτυξη της τεχνολογίας αναθέτοντας απομονωμένους ασύρματους πόρους προκειμένου να εγκατασταθούν και να αξιολογηθούν καινοτόμες τεχνολογίες σε μεγάλα δίκτυα σε real-time συνθήκες.

Προκειμένου να μπορούμε να διαχειριστούμε αυτά τα απομονωμένα εικονικά δίκτυα που περιγράψαμε παραπάνω, το SoftAir υλοποιεί τους δικούς του HyperVisor.

Αρχικά υλοποιεί τον Network HyperVisor, ο οποίος στοχεύει στην αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου και καθορίζει τον τρόπο που θα διαμοιραστούν στους Virtual Network Operators (VNOs) οι πόροι αυτοί. Ο HyperVisor στοχεύει στη μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης των πόρων, ενώ παράλληλα τους διαθέτει με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των VNOs. Σε κάθε σταθμό βάσης SD-BS, αναθέτουμε δικτυακούς πόρους, όπως (π.χ. φάσμα, ασύρματη υποδομή κ.α.) για κάθε εικονικό δίκτυο προκειμένου να επιτευχθεί ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για τους VNOs. Στο Σχήμα 33, βλέπουμε το πως υλοποιείται και πως λειτουργεί ένας από τους τρεις HyperVisors του SoftAir.



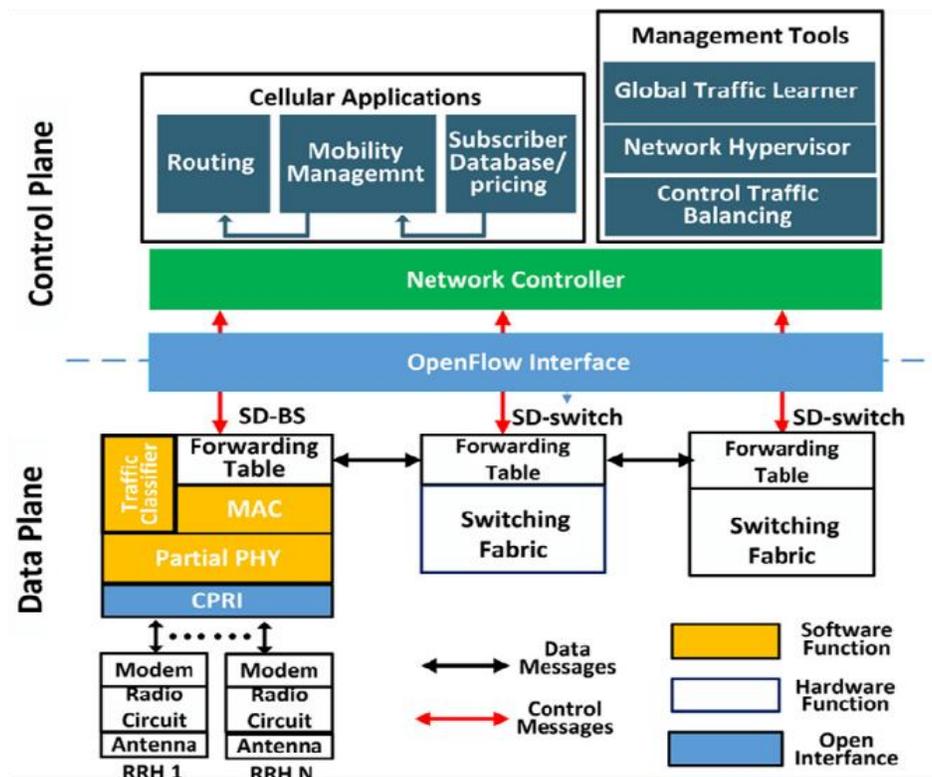
**Σχήμα 33: Απεικόνιση του Network HyperVisor [78].**

Επιπλέον υλοποιεί ακόμα δύο HyperVisors, τον Wireless HyperVisor και τον Switch HyperVisor. Ο Wireless HyperVisor αποτελεί έναν χρονοπρογραμματιστή των πόρων στους Baseband Servers (BBSs). Ο Network HyperVisor ενημερώνει τους BBSs για

τους πόρους που έχει αναθέσει σε κάθε Virtual Network Operator και ο Wireless Hypervisor υλοποιεί την πολιτική χρονοπρογραμματισμού για κάθε σταθμό βάσης.

Ο Switch Hypervisor, υποστηρίζει το πρωτόκολλο OpenFlow και εστιάζει στο διαμορισμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης για κάθε SD-switch. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εκ των προτέρων η δυνατότητα ανάθεσης εύρους ζώνης για την μετάδοση κάποιας ροής δεδομένων ή για τη λειτουργία ενός εικονικού δικτύου.

Προτείνουμε την αρχιτεκτονική του SoftAir, γιατί εισάγει δύο καινοτομίες στο σχεδιασμό του δικτύου, οι οποίες θα αποφέρουν σημαντικά οφέλη προς την κατεύθυνση υλοποίησης των τεχνικών χαρακτηριστικών του 5G. Το πρώτο καινοτόμο χαρακτηριστικό που προτείνει το SoftAir είναι ο διαμορισμός της επεξεργασίας των σημάτων που φτάνουν σε ένα σταθμό βάσης, τόσο στο RRH όσο και στο BSS. Μέχρι τώρα στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική, τα σήματα έφταναν στον RRH και η επεξεργασία γίνονταν αποκλειστικά στο BSS. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα μηνύματα που θα έπρεπε να μεταδοθούν μεταξύ RRH και BSS να δημιουργούν μεγάλη συμφόρηση στο Fronthaul network που περιγράψαμε παραπάνω και να απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης. Το SoftAir δίνει όπως είπαμε στους RRHs τη δυνατότητα μερικής επεξεργασίας του σήματος βασικής ζώνης που φτάνει σε αυτούς (π.χ. με τη χρήση modem), ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας πραγματοποιείται στο BSS, όπως φαίνεται στο Σχήμα 34. Έτσι πετυχαίνουμε την μείωση του ρυθμού μετάδοσης που απαιτείται για την επικοινωνία μεταξύ των RRHs και BSS.



**Σχήμα 34: Function Virtualization στο SoftAir [78].**

Ο διαμοιρασμός της επεξεργασίας του σήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα με τη χρήση της διεπαφής CPRI που περιγράψαμε πιο πάνω. Εφόσον λοιπόν δεν χρειάζεται η υλοποίηση νέων διεπαφών, εφαρμόζοντας την πρόταση του SoftAir μπορούμε να μειώσουμε τους ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούνται στο Fronthaul δίκτυο με μηδενικό κόστος, ενώ παράλληλα διατηρείται η ευέλικτη δομή που προσφέρει η αρχιτεκτονική του δικτύου.

Η δεύτερη καινοτομία που προτείνεται με το SoftAir, είναι η πλήρης υιοθέτηση του πρωτοκόλλου OpenFlow στους σταθμούς βάσης του δικτύου (SD-BSs). Στο δίκτυο SD-RAN σύμφωνα με το SoftAir, υλοποιείται μια διεπαφή του OpenFlow για κάθε σταθμό βάσης αξιοποιώντας τα Open vSwitches, τα οποία είναι switches υπό τη μορφή software που υποστηρίζουν το OpenFlow και μπορούν να υλοποιηθούν σε ένα BBS. Με τη χρήση των Open vSwitches κάθε σταθμός βάσης θα μπορεί να δέχεται, να επεξεργάζεται και να απαντά σε μηνύματα πρωτοκόλλου OpenFlow. Ενσωματώνοντας στους σταθμούς βάσης το πρωτόκολλο OpenFlow, δημιουργούμε μια ενιαία διεπαφή για την διαχείριση και το συντονισμό των σταθμών βάσης του RAN, οι οποίοι μπορεί να χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης αποφεύγοντας έτσι προβλήματα που θα προκύπταν λόγω ετερογένειας. Μια εφαρμογή της παραπάνω καινοτομίας είναι η αποφυγή των προβλημάτων που δημιουργούνται σε ένα χρήστη κατά το Roaming. Τέλος, λόγω της κοινής OpenFlow διεπαφής μεταξύ SD-Switches και των SD-BSs επιτυγχάνεται η διασύνδεση μεταξύ δικτύου κορμού και Radio Access Network, γεγονός που επιτρέπει την ενιαία διαχείριση του SoftAir.

### 3.2.2 Core Network (EPC)

Όσο η κίνηση στη μετάδοση δεδομένων συνεχίζει να αυξάνεται, οι πάροχοι υπηρεσιών έρχονται αντιμέτωποι με τη διαρκή ανάγκη για επενδύσεις προκειμένου να ενισχύσουν το δίκτυό τους. Οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει συνεχώς να αναβαθμίζουν την υποδομή τους, για παράδειγμα προσφέροντας περισσότερους σταθμούς βάσης προκειμένου να πετύχουν την επιθυμητή ρυθμοαπόδοση, τη μείωση των καθυστερήσεων και το QoS. Ωστόσο, αυτοί οι επιπλέον σταθμοί βάσης απαιτούν περισσότερο χώρο και η συνεχής εξειδίκευση του δικτυακού εξοπλισμού (hardware), οδηγεί σε αύξηση της πολυπλοκότητας για τους παρόχους όσο αφορά την αύξηση της χωρητικότητας, την ενίσχυση της απόδοσης και την αναβάθμιση του δικτύου. Η τεχνολογία NFV μπορεί να μειώσει τα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν από την ετερογένεια του hardware της υποδομής, υλοποιώντας τις δικτυακές λειτουργίες υπό τη μορφή software οι οποίες θα τρέχουν σε κοινό Commercial off-the-self (COTS) hardware. Επιπλέον, η λύση του NFV αναμένεται να μειώσει σημαντικά το CAPEX και το OPEX για τους παρόχους αφού ταυτόχρονα απλοποιείται η διαχείριση του δικτύου και αυξάνεται η χωρητικότητα του [87].

Η εισαγωγή της τεχνολογίας NFV στο EPC Network και η δημιουργία του virtual EPC (vEPC), δίνει στους παρόχους τη δυνατότητα να μειώσουν το κόστος εξοπλισμού, την ενεργειακή κατανάλωση και έχει μικρότερο time-to-market για την υλοποίηση

νέων υπηρεσιών και προϊόντων. Τα Virtual Networks πρέπει να μπορούν να υλοποιούν τις ίδιες λειτουργίες που θα υλοποιούσε ένα φυσικό δίκτυο. Οι εφαρμογές που προσφέρουν οι πάροχοι υπηρεσιών αποτελούνται συχνά από πολλές Virtual Machines όπου κάθε μία έχει το δικό της αποθηκευτικό χώρο και τις δικές της ρυθμίσεις. Αυτό σημαίνει ότι οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει να μπορούν να γνωρίζουν πως αυτές οι VMs συνεργάζονται προκειμένου να υλοποιήσουν τις εφαρμογές, ποιες εφαρμογές τρέχουν σε ποια/ες VMs και πόσοι δικτυακοί πόροι κατανέμονται σε κάθε εφαρμογή. Από την άλλη, το SDN για ακόμα μια φορά παίζει συμπληρωματικό ρόλο στο NFV, δίνοντας τη δυνατότητα να ελέγχουμε τους εικονικούς πόρους και να υπάρχει γενικός συντονισμός όλων των virtual networks κατά μήκος του δικτύου. Με άλλα λόγια, το SDN θα έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί και να διαχειρίζεται τις Virtual Machines που παρέχονται στους χρήστες. Το κλειδί για να είναι επιτυχημένο το vEPC είναι κάθε εικονική οντότητα του δικτύου να έχει καλή απόδοση και να επιτυγχάνεται η απομόνωση των Virtual Machines (VMs) [86].

Η ανάγκη των παρόχων υπηρεσιών για υψηλού επιπέδου υπηρεσίες αλλά σε χαμηλό κόστος και η ανάγκη για τη δημιουργία ενός δικτύου ευέλικτου και εύκολα επεκτάσιμου, οδηγούν στο Virtualization του Core Network. Η υλοποίηση του Virtual EPC (vEPC), θεωρούμε ότι θα αποφέρει τα εξής οφέλη [89]:

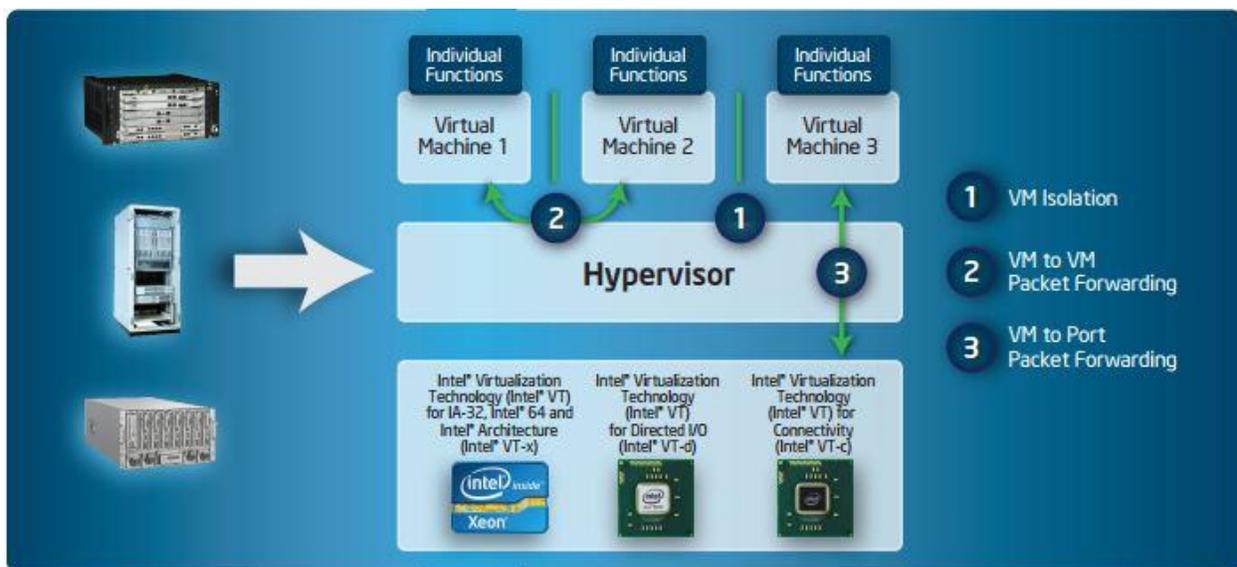
- Βελτιωμένη Λειτουργική Απόδοση: Ένα vEPC που τρέχει σε μια NFV υποδομή, θα αυξήσει τη λειτουργική απόδοση του δικτύου τόσο μέσω της μείωσης του κόστους αλλά και λόγω της απλοποίησης του δικτύου. Η βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου θα μεγιστοποιηθεί μέσω του αυτοματισμού του vEPC με τη χρήση του SDN και του Cloud.
- Βέλτιστη Διαχείριση του Δικτύου Μέσω του Ελέγχου της Απόδοσης: Ο έλεγχος και η πραγματοποίηση για τις λειτουργίες του vEPC πραγματοποιείται από τον EMS (Element Management System) που διαθέτει κάθε VM. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στέλνονται στον controller και αυτός αποφασίζει ποιες ενέργειες πρέπει να γίνουν στο δίκτυο προκειμένου να αυξηθεί η απόδοσή του. Η αυτοματοποιημένη διασύνδεση μεταξύ των VMs πραγματοποιείται μέσω την πολιτικής δρομολόγησης που επιβάλλεται από το SDN.
- Υποστήριξη Multi-Tenancy: Πολλαπλά vEPCs μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια NFV υποδομή χωρίς να υπάρχουν μεταξύ τους παρεμβολές.
- Γρηγορότερο time-to-market για την Υλοποίηση Νέων Υπηρεσιών: Η αυτοματοποίηση που προσφέρεται από τη χρήση του Cloud, οδηγεί σε γρηγορότερους χρόνους για την υλοποίηση νέων υπηρεσιών.

Σύμφωνα με την έρευνα της ABI Research, προβλέπεται ότι μέχρι το 2018 το μερίδιο της αγοράς για το Virtualized Core Network θα αγγίζει τα 6 δισεκατομμύρια δολάρια [90]. Έτσι λοιπόν και εμείς θα κινηθούμε προς αυτή την κατεύθυνση για την ενσωμάτωση του vEPC στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Οι οντότητες του EPC, το οποίο αποτελεί το δίκτυο κορμού του LTE, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι:

1. Serving Gateway (S-GW): Λειτουργεί ως router, δρομολογεί τα πακέτα δεδομένων μέσω του δικτύου πρόσβασης.

2. Packet Data Network (P-GW): Ενεργεί ως διεπαφή μεταξύ του δικτύου LTE και άλλων δικτύων πακέτων δεδομένων. Διαχειρίζεται την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) και παρέχει υπηρεσίες ελέγχου πακέτων (DPI).
3. Mobility Management Entity (MME): Είναι ένας κόμβος ελέγχου και επιτελεί τη σηματοδότηση ελέγχου μεταξύ δικτύου κορμού (EPC) και της συσκευής χρήστη (UE).
4. Home Subscriber Server (HSS): Είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές του δικτύου.
5. Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): Είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της πολιτικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων, καθώς υποστηρίζει και την ανίχνευση της ροής δεδομένων υπηρεσίας.

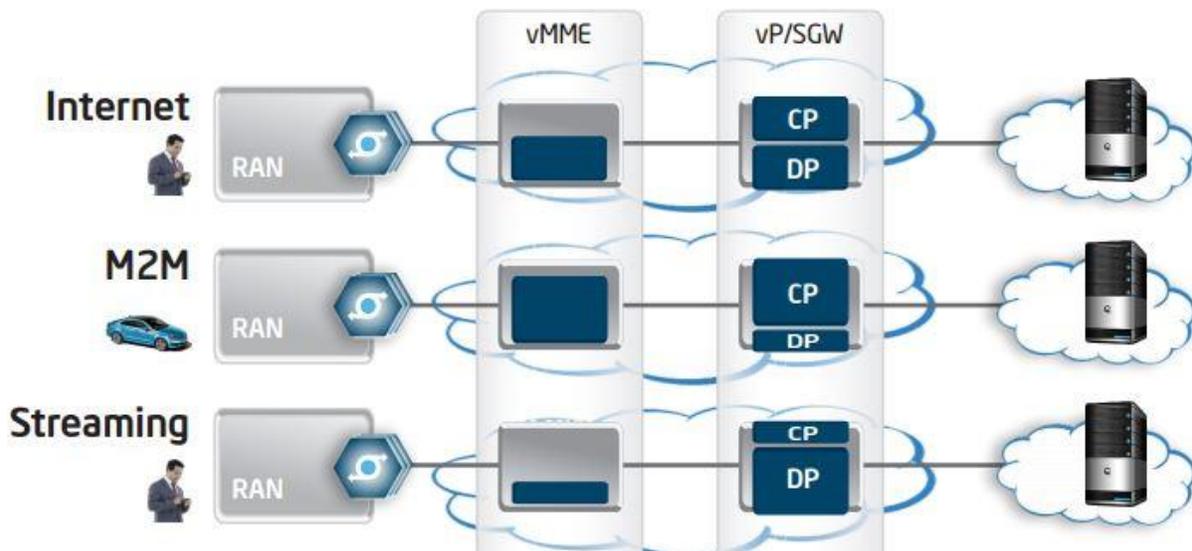
Για το δίκτυο κορμού, θα προτείνουμε το vEPC που έχει υλοποιήσει η NEC [87] με τη χρήση του Intel Data Plane Development Kit (Intel DPDK). Στο προτεινόμενο vEPC, κάθε οντότητα του EPC δηλ. Mobility Management Entity (MME), Packet Gateway (P-GW) και Serving Gateway (S-GW), υλοποιείται και τρέχει σε μια Virtual Machine. Κάθε εικονική λειτουργία ανατίθεται σε μια Virtual Machine. Κάθε Virtual Machine είναι εντελώς απομονωμένη από τις άλλες VMs και τρέχει ανεξάρτητα από την απόδοση των άλλων VMs. Ωστόσο, όλες οι VMs ενός κόμβου είναι διασυνδεδεμένες μεταξύ τους έτσι ώστε να μπορούν να επικοινωνούν για τη σωστή προώθηση των πακέτων. Στο Σχήμα 35 που ακολουθεί, βλέπουμε τον τρόπο που υλοποιούνται οι δικτυακές λειτουργίες του Core Network υπό τη μορφή των Virtual Machines στο vEPC της NEC.



**Σχήμα 35: Απεικόνιση Virtual Network Functions [87].**

Το vEPC software της NEC επαναχρησιμοποιεί τις ήδη υπάρχουσες, φυσικές συσκευές της ATCA. Επιπλέον, ενσωματώνεται ο Hypervisor NEC CGHV και η τεχνολογία Intel DPDK, όπως θα δούμε αναλυτικά πιο κάτω.

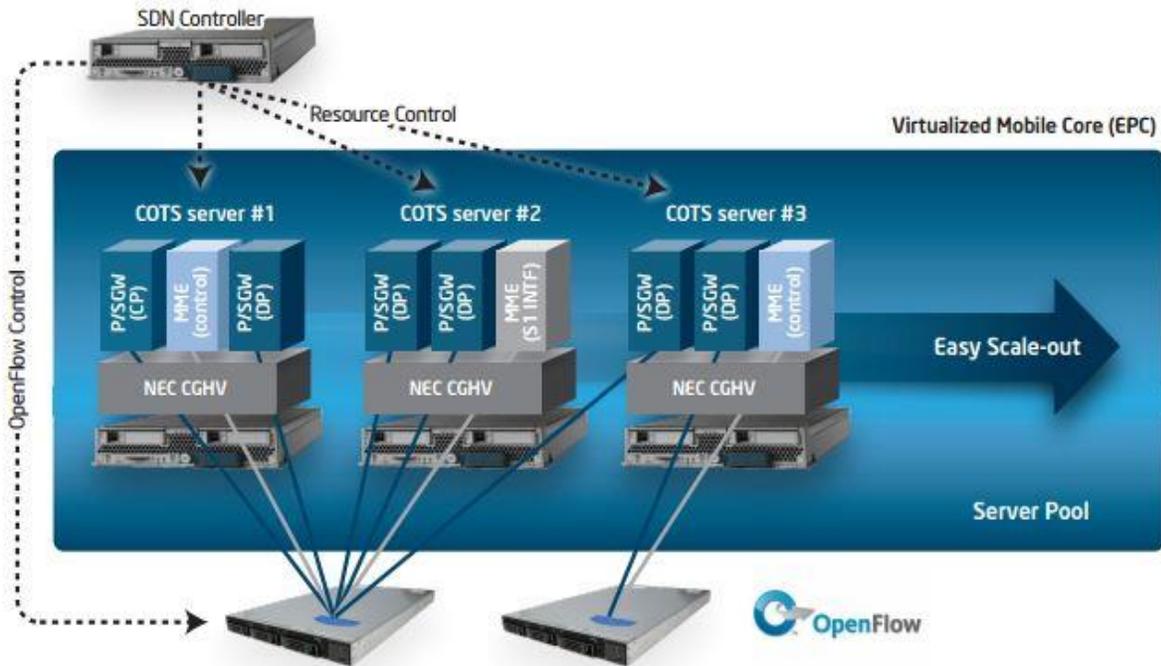
Κάθε εικονικός λογικός κόμβος αποτελείται από πολλαπλές Virtual Machines και κάθε VM ανατίθεται ανεξάρτητα είτε στο Control Plane είτε στο Data Plane του λογικού κόμβου. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους να σχεδιάζουν τη χωρητικότητα κάθε κόμβου, όσο αφορά το Control Plane και το Data Plane, προσφέροντας ανεξαρτησία αλλά και ευελιξία. Στο Σχήμα 36, φαίνεται ακριβώς αυτή η ευελιξία που προσφέρεται στον πάροχο να διαχειριστεί ο ίδιος τη χωρητικότητα κάθε λογικού κόμβου, όσο αφορά το Control Plane και το Data Plane, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη.



**Σχήμα 36: Δυναμικός διαμορισμός των διαθέσιμων πόρων ανάμεσα σε CP και DP, ανάλογα με την προσφερόμενη υπηρεσία [87].**

Επιπλέον ο SDN-controller, διαχειρίζεται και εγκαθιδρύει Virtual Machines σύμφωνα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας και τους ανατίθεται ένας server με βάση τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της υπηρεσίας που θέλουμε να υλοποιήσουμε, τη διαθεσιμότητα πόρων κ.α. Οι Virtual Machines είναι δυναμικά διασυνδεδεμένες μεταξύ τους προκειμένου να διαμορφώνουν έναν λογικό κόμβο μέσω του SDN-controller, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία OpenFlow. Η NEC μέσω της τεχνολογίας Virtualization στοχεύει στην εύκολη επέκταση της χωρητικότητας του συστήματος και στην γρήγορη και αποδοτική αναβάθμιση του.

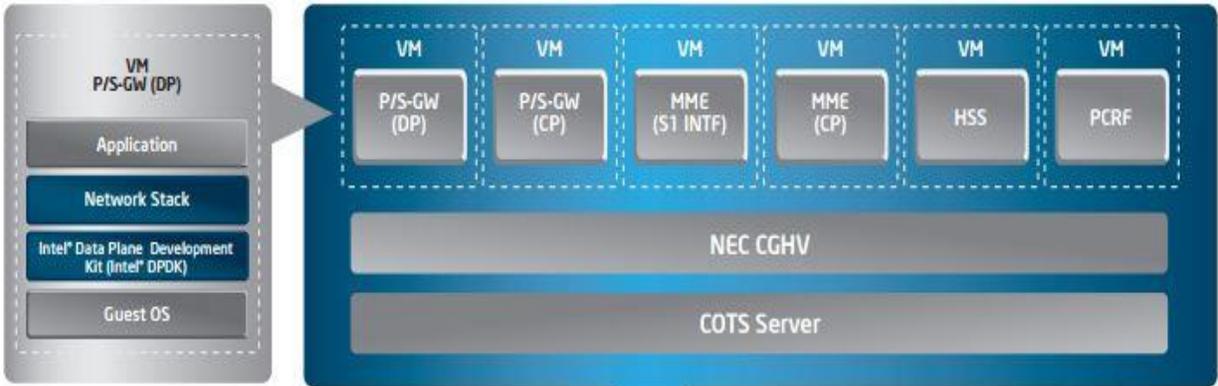
Στο Σχήμα 37, βλέπουμε τη γενική εικόνα της αρχιτεκτονικής του vEPC της NEC όπου φαίνονται και τα χαρακτηριστικά που περιγράψαμε πιο πάνω.



**Σχήμα 37: Γενικά Χαρακτηριστικά του vEPC της NEC [87].**

Οι Hypervisors πρέπει να μπορούν να ανταποκρίνονται σε real-time συνθήκες και να προσφέρουν ποιοτικές υπηρεσίες για οσοδήποτε μεγάλο αριθμό συνδρομητών και οσοδήποτε μεγάλο φορτίο. Ο Hypervisor που υλοποίησε η NEC, επιλύει ζητήματα που αφορούν το Virtualization των λειτουργιών του δικτύου, τη real-time απόδοση, τη διαθεσιμότητα κ.α. Ενσωματώνει νέες τεχνολογίες όπως η «έξυπνη» διαχείριση και ο διαμοιρασμός των πόρων CPU, disk I/O και network I/O και τη βελτιστοποίηση της πρόσβασης στη μνήμη, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το virtualization overhead και οι παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν από τη συνύπαρξη διαφορετικών VMs στο ίδιο hardware. Στο Σχήμα 38 απεικονίζεται η διαδικασία που περιγράψαμε, βάση της οποίας πραγματοποιείται η διαχείριση των Virtual Machines του vEPC της NEC.

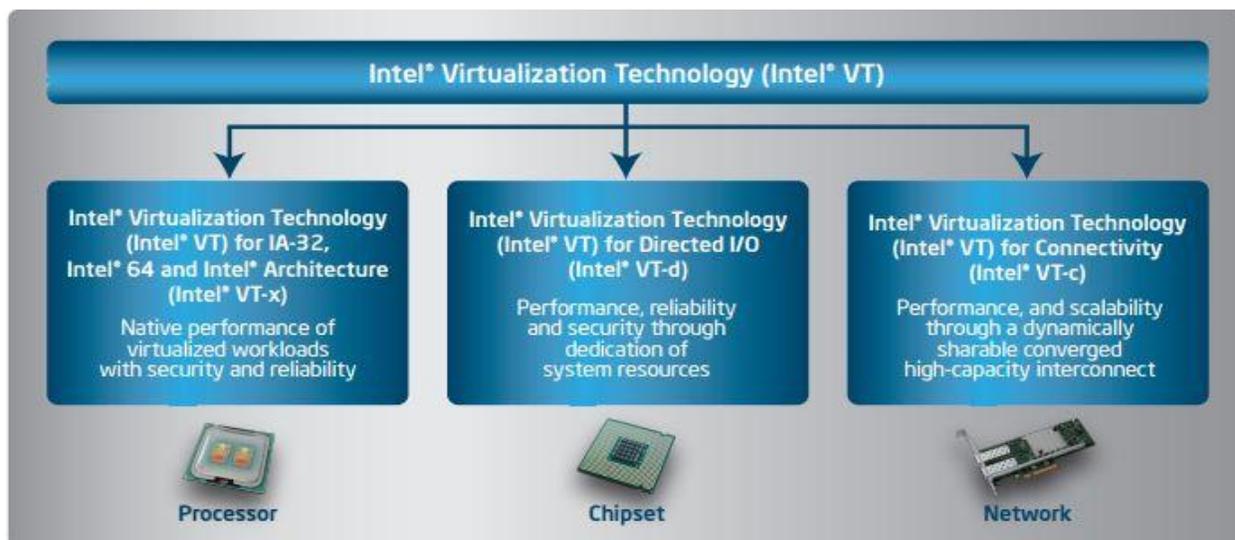
Επιπλέον, ο προτεινόμενος Hypervisor βασίζεται σε Kernel-Based Virtual Machine (KVM) και υποστηρίζει APIs, επιτρέποντας σε εξωτερικές εφαρμογές να μεγιστοποιήσουν τα οφέλη του παρόχου από την τεχνολογία Virtualization σε μια NFV πλατφόρμα.



**Σχήμα 38: Διαχείριση των Virtual Machines του vEPC της NEC [87].**

Η μεγαλύτερη πρόκληση της τεχνολογίας Virtualization ήταν να επιτύχει την υψηλή απόδοση στην προώθηση των πακέτων και την υψηλή ποιότητα των φερουσών σε ένα εικονικό περιβάλλον. Για αυτό το λόγο η NEC, υιοθέτησε το Intel DPDK [91] για το vEPC προκειμένου να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του Data Plane κατά την προώθηση των πακέτων σε ένα εικονικό περιβάλλον. Η NEC ενσωμάτωσε τον Carrier Grade HyperVisor και το Intel DPDK προκειμένου να υπερβεί τα προβλήματα της προώθησης πακέτων στο Data Plane, τα οποία προκαλούνται από το virtualization overhead, τις παρεμβολές μεταξύ των λειτουργιών και από την πρόσβαση στη μνήμη από πολλαπλές Virtual Machines, αποτρέποντας την καθυστέρηση και τα σφάλματα στην προώθηση των πακέτων. Το vEPC της εταιρείας NEC είναι υλοποιημένο κατά αποκλειστικότητα σε hardware της Intel και με βάση την Intel Virtualization technology (Intel VT) η οποία συνεχώς προοδεύει.

Η τεχνολογία Intel VT προσφέρει μια πλατφόρμα hardware προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή απόδοση με τη μέγιστη αξιοπιστία, ασφάλεια και επεκτασιμότητα. Αυτά τα πλεονεκτήματα πηγάζουν από την αρχιτεκτονική x86 του επεξεργαστή της Intel, τα chipsets για το I/O και τις δικτυακές συσκευές της Intel για συνδεσιμότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 39 που ακολουθεί. Η Intel συνεχώς βελτιώνει την απόδοση των Virtual Machines με την υλοποίηση νέων αρχιτεκτονικών και την βελτίωση της τεχνολογίας.



**Σχήμα 39: Η τεχνολογία Virtualization της Intel (Intel VT) [87].**

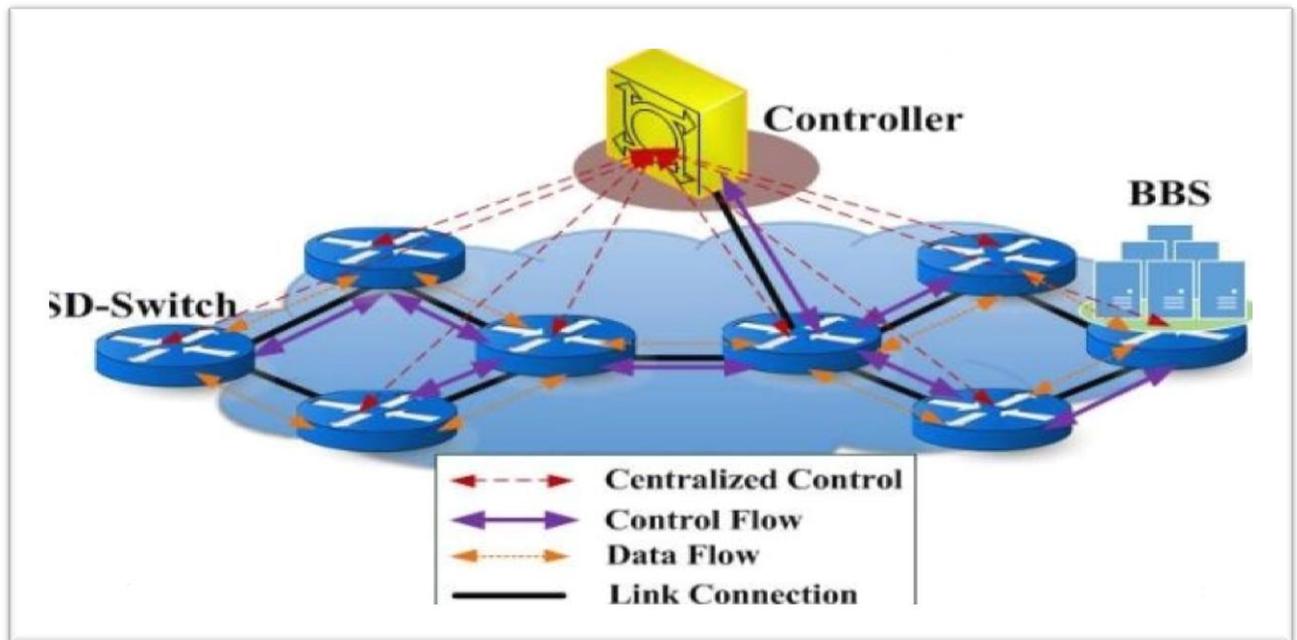
### 3.3 Control Plane

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, το Control Plane του SoftAir απαρτίζεται από τα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου και από διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες των SPs. Τα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου, δημιουργήθηκαν για να απαντήσουν στα προβλήματα που αναφέραμε παραπάνω σε σχέση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό των δικτύων εισάγοντας νέες τεχνολογίες όπως το NFV, το SDN και το Cloud Computing [78].

Η διαχείριση του δικτύου με τη βοήθεια της τεχνολογίας Cloud, στοχεύει στην αυτοματοποίηση της διαμόρφωσης και του συντονισμού των λειτουργιών του δικτύου. Προκειμένου να ενσωματωθεί η παραπάνω τεχνολογία αλλά και για να αυξηθεί η συνολική απόδοση του δικτύου, το SoftAir ανέπτυξε τα εξής τρία εργαλεία διαχείρισης:

- **Control traffic balancing:** Στην προσπάθεια μας να ενσωματώσουμε με αποδοτικό τρόπο το traffic engineering στο SoftAir, απαιτείται τα μηνύματα ελέγχου να προωθούνται γρήγορα και αξιόπιστα από τα SD-Switches ή τους SD-Base Stations στον SDN-controller. Η μεταφορά της σηματοδosis σε διαφορετική συχνοτική μπάντα δεν υφίσταται, καθώς το κόστος για μια τέτοια λύση είναι απαγορευτικό, αφού απαιτείται η δημιουργία νέου δικτύου σηματοδosis. Η τεχνολογία του traffic engineering που προσδίδει η ενσωμάτωση του SDN στο Radio Access Network, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην προσπάθεια μείωσης της κίνησης που δημιουργείται από τα μεταδιδόμενα σήματα ελέγχου. Στην προσπάθεια αυτή το SoftAir, προσφέρει ένα εργαλείο το οποίο επιλέγει τους βέλτιστους controllers και τα

βέλτιστα μονοπάτια προκειμένου να προωθήσει μέσω αυτών τη ροή της σηματοδοσίας ελέγχου, εξετάζοντας πρωτίστως τη συνολική κίνηση του δικτύου. Στο Σχήμα 40, παραθέτουμε μια απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας του traffic classifier.



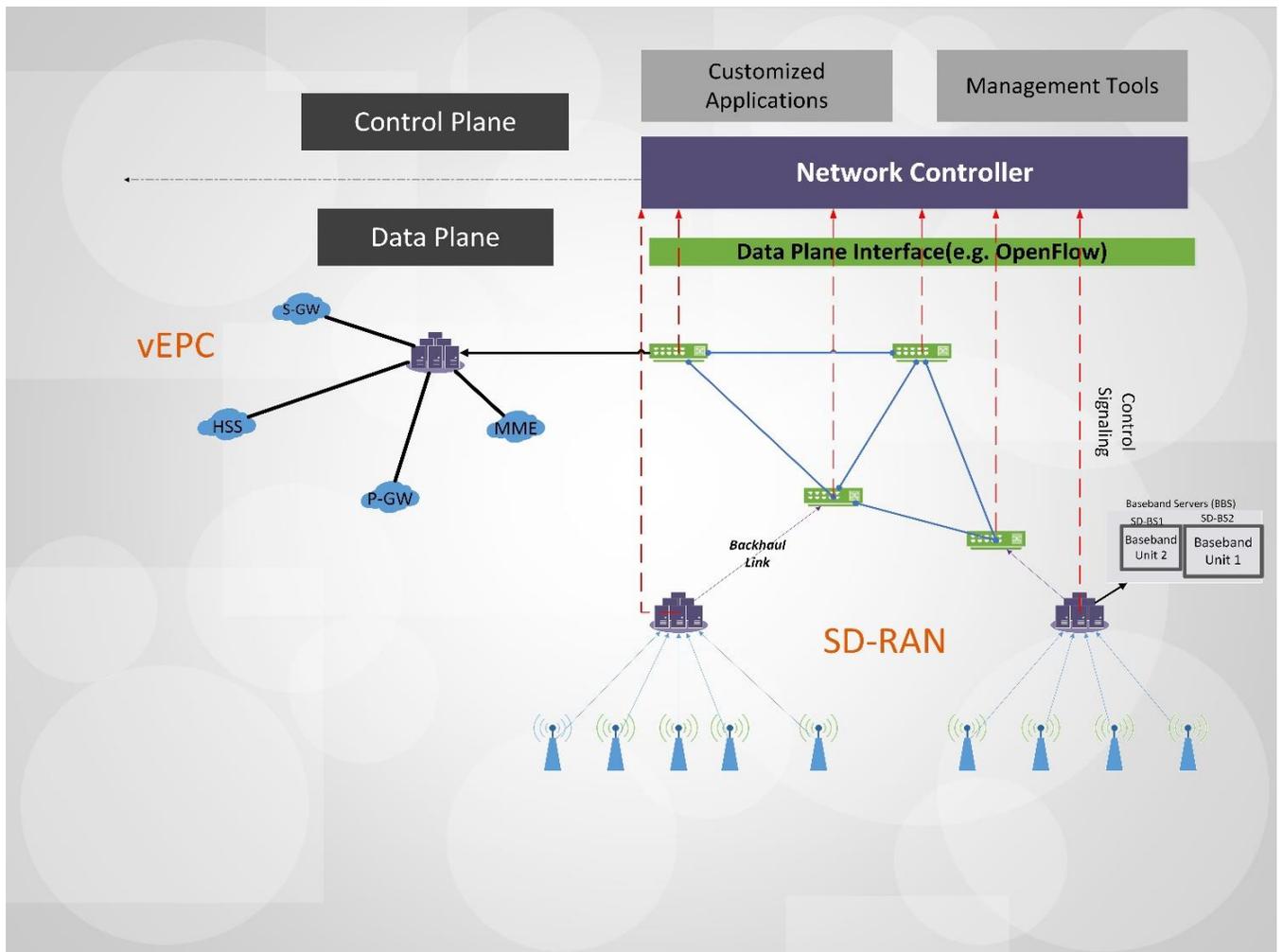
**Σχήμα 40: Απεικόνιση του traffic classifier για το SoftAir [64].**

- Resource-efficient Network Virtualization: Η τεχνολογία Network Virtualization παίζει καθοριστικό ρόλο στην δημιουργία του IaaS που περιεγράφηκε πιο πάνω. Τα εικονικά δίκτυα που δημιουργούνται μπορούν να διατεθούν α) σε διαφορετικές υπηρεσίες/εφαρμογές, έτσι ώστε κάθε υπηρεσία να τροφοδοτείται με πόρους βάση ξεχωριστών αλγορίθμων ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας, β) σε διαφορετικούς Network Operators έτσι ώστε πολλοί Network Operators να μοιράζονται δυναμικά την ίδια δικτυακή υποδομή μαζί με το διατιθέμενο φάσμα και προσφέρουν τη δυνατότητα γ) διευκόλυνσης της συνεργασίας και της συνύπαρξης διαφορετικών τεχνολογιών π.χ. multi-radiocRATs. Εφόσον οι ασύρματοι δικτυακοί πόροι είναι περιορισμένοι, το εργαλείο διαχείρισης το οποίο υλοποιήθηκε στο SoftAir θα αποφέρει σημαντικά οφέλη.
- Distributed and Collaborative Traffic Classification: Το SoftAir προσφέρει τη δυνατότητα για σημαντική βελτίωση στον αποδοτικό διαμορισμό του διαθέσιμου φάσματος. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιείται ένας μηχανισμός ταξινόμησης της κίνησης σε κάθε σταθμό βάσης (SD-BSs) ο οποίος συνεργάζεται με τον γενικό ταξινομητή κίνησης ο οποίος βρίσκεται στον SDN-controller του δικτύου προκειμένου να επιτύχουμε την γρήγορη και ακριβή ταξινόμηση της κίνησης του δικτύου. Ο στόχος του μηχανισμού αυτού, είναι να αναγνωρίσουμε την εφαρμογή που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ροή δεδομένων, τις απαιτήσεις της εφαρμογής αυτής σε QoS κ.α. Διαθέτοντας

λοιπόν τέτοιες πληροφορίες για τις ροές δεδομένων στο δίκτυο, μπορούμε να δημιουργήσουμε πολύ αποδοτικούς και προσαρμοστικούς μηχανισμούς traffic engineering, τόσο σε επίπεδο σταθμού βάσης όσο και σε επίπεδο δικτύου. Το προτεινόμενο εργαλείο διαχείρισης αποτελείται από δύο οντότητες, α) τους τοπικούς ταξινομητές κίνησης που βρίσκονται στους σταθμούς βάσης του δικτύου και β) τον γενικό ταξινομητή κίνησης ο οποίος βρίσκεται στον SDN-controller προκειμένου να έχει την ολιστική εικόνα του δικτύου.

### *3.4 Προσδοκώμενα Οφέλη*

Στην παρακάτω εικόνα, απεικονίζεται η συνολική αρχιτεκτονική του δικτύου που περιγράψαμε παραπάνω. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα, χρησιμοποιούμε το Radio Access Network του SoftAir και για το Core Network χρησιμοποιούμε την τεχνολογία Virtualization (vEPC). Όπως βλέπουμε, οι οντότητες του Core Network υλοποιούνται υπό μορφή software σε Virtual Machines οι οποίες τρέχουν σε servers που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε μεγάλα Data Centers. Όσο αφορά το RAN, η επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο σε BBSs, οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι σε Data Centers. Επιπλέον, όπως βλέπουμε στο σχήμα, υπάρχει κεντρική διαχείριση του δικτύου μέσω του Network Controller, ενώ παράλληλα είναι εγκατεστημένα τα εργαλεία διαχείρισης που περιγράψαμε πιο πάνω.

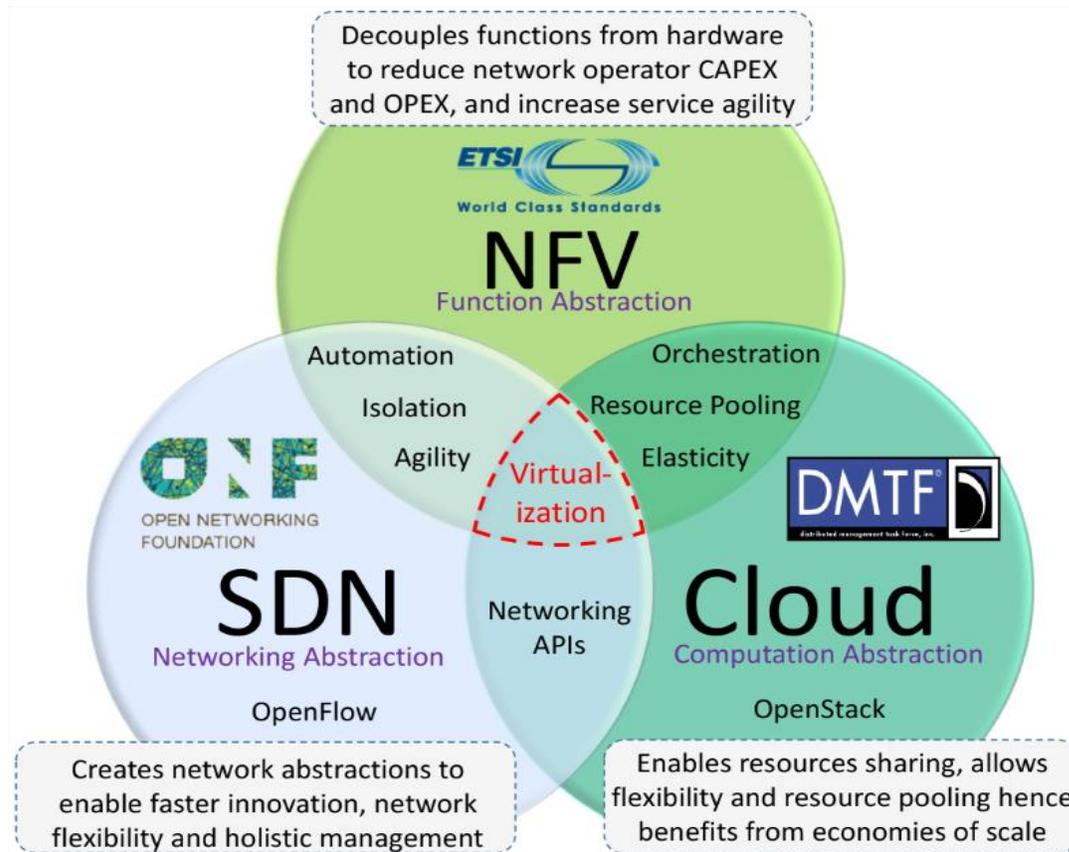


Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η τεχνολογία που παρουσιάσαμε ενσωματώνει όλες τις προτεινόμενες τεχνολογίες που θεωρείται ότι θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τα προσδοκώμενα οφέλη από την υιοθέτηση των παραπάνω τεχνολογιών [69] :

- **Επίσπευση της Καινοτομίας:** Ο συνδυασμός του SDN και του NFV μειώνει το time-to-market για την υλοποίηση νέων υπηρεσιών και προϊόντων, λόγω της χρήσης εικονικών πόρων και του κεντροποιημένου ελέγχου. Το γεγονός αυτό μειώνει την άμεση εξάρτηση από τους παρόχους.
- **Έλεγχος και Διαχείριση της Κίνησης στο Δίκτυο:** Η χρήση του SDN, επιτρέπει τον έλεγχο της κίνησης στο δίκτυο και την αποδοτική διαχείριση των διαθέσιμων δικτυακών πόρων. Ειδικά στην περίπτωση του handover, το πρωτόκολλο OpenFlow μπορεί να διευκολύνει την «περιπλάνηση» του χρήστη μεταξύ των software-defined σταθμών βάσης. Επιπλέον, η χρήση του traffic classifier που υλοποιείται στο SoftAir, κατηγοριοποιεί τις ροές δεδομένων που κυκλοφορούν στο δίκτυο και συλλέγει διάφορες πληροφορίες για αυτές, όπως το ρυθμό μετάδοσης, σε ποια εφαρμογή αντιστοιχούν, ποιους και πόσους πόρους απασχολούν κ.α. Η ιδιότητα αυτή δίνει τη δυνατότητα για real-time διαχείριση του δικτύου και δυναμική δέσμευση πόρων.

- **Ενεργειακή Απόδοση:** Το φορτίο εργασίας στο δίκτυο μεταβάλλεται ανάλογα με διάφορους παράγοντες όπως ο χρόνος, η περιοχή και άλλα γεγονότα που δεν μπορούν να προβλεφθούν. Από τη μία πλευρά, το SDN βελτιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας βασιζόμενο σε real-time συνθήκες. Ο SDN-controller, μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τον αριθμό των πόρων που διατίθενται στους χρήστες κάθε στιγμή. Από την άλλη, το NFV θα μειώσει τον αριθμό των συσκευών του δικτύου μέσω της ελαστικότητας της αρχιτεκτονικής του και της δυνατότητας διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων.
- **Ευελιξία και Επεκτασιμότητα:** Σήμερα, η εισαγωγή νέων τεχνολογιών και η αναβάθμιση των υπάρχουσών υπηρεσιών είναι πολύπλοκη υπόθεση λόγω της κλειστής αρχιτεκτονικής του δικτύου. Πολλές φορές μάλιστα, το κόστος της επένδυσης για την αναβάθμιση του δικτύου ξεπερνά τα οικονομικά οφέλη που θα προσφέρει αυτή. Το SDN και το NFV, διευκολύνει την επέκταση των υπηρεσιών και επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση της υποδομής και των εφαρμογών. Επιπλέον, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι ακόμα πιο ευέλικτη λόγω της χρήσης μηχανισμών ελέγχου της κίνησης του δικτύου και της ολιστικής εικόνας που διαθέτει για αυτό.
- **Διαμοιρασμός της Υποδομής και των Υπηρεσιών:** Η δυνατότητα ελέγχου που προσφέρει το SDN και η Virtualization δυνατότητα που προσφέρει η τεχνολογία NFV, επιτρέπει το διαμοιρασμό της υπάρχουσας υποδομής και των δικτυακών πόρων. Ένας πάροχος υπηρεσιών (SP), μπορεί να υλοποιήσει τις δικτυακές του λειτουργίες χρησιμοποιώντας την υποδομή ενός άλλου παρόχου. Όλες αυτές οι ενέργειες διαχειρίζονται από τον SDN-controller. Το γεγονός αυτό, έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέα μοντέλα χρέωσης υπηρεσιών. Με βάση το παράδειγμα που περιγράψαμε πιο πάνω, ο πρώτος πάροχος κερδίζει από την διάθεση των υπηρεσιών που υλοποιεί, ενώ ο δεύτερος κερδίζει από την ενοικίαση της υποδομής του.
- **Παρεμβολές μεταξύ των cells:** Πολλοί σταθμοί βάσης στην ίδια περιοχή θα μπορούσαν να προκαλέσουν παρεμβολές μεταξύ τους λόγω της επικάλυψης των cells, κακού συντονισμού κ.α. Οι παρεμβολές αυτές οδηγούν στην υποβάθμιση της προσφερόμενης υπηρεσίας (QoS). Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, επιτρέπει την διαχείριση των πόρων ραδιοπρόσβασης με αποδοτικό τρόπο λόγω της κεντροποιημένης αρχιτεκτονικής και της ολιστικής εικόνας που διαθέτει για το δίκτυο.
- **Ασφάλεια:** Η συνολική εικόνα που διαθέτουμε για το δίκτυο μας δίνει τη δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο και εντοπισμό πιθανών επιθέσεων στο δίκτυο. Ο SDN-controller, μπορεί να προσφέρει ασφάλεια υπό μορφή software όπως Intrusion Detection Systems, firewalls κ.α.

Στο Σχήμα 41, παρατίθεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίον σχετίζονται και αλληλοεπιδρούν οι προαναφερθείσες τεχνολογίες αιχμής καθώς και τα προσδοκώμενα οφέλη για τους παρόχους.



**Σχήμα 41: Σχέση μεταξύ των τεχνολογιών SDN, NFV και Cloud Computing [59].**

## 4. Τεχνοοικονομική Ανάλυση

Η τεχνολογία του συνδυασμού hardware και software πόρων σε μια μοναδική οντότητα υπό μορφή λογισμικού, είναι ο πυρήνας της τεχνολογίας Network Virtualization. Όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, το κεφαλαιακό κόστος CAPEX αναφέρεται στο κόστος ενοικίασης της περιοχής στην οποία θα εγκατασταθεί το δίκτυο και στο κόστος αγοράς των σταθμών βάσης που χρειάζονται για να καλύψουμε μια γεωγραφική περιοχή. Από την άλλη, το λειτουργικό κόστος (OPEX) προκύπτει κατά κύριο λόγο από την ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό θα παραθέσουμε ένα τεχνοοικονομικό μοντέλο που θα υπολογίζει το κεφαλαιακό κόστος (CAPEX), το λειτουργικό κόστος (OPEX) και το Total Cost of Ownership (TCO) για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική του δικτύου, η οποία ενσωματώνει τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

## 4.1 Οικονομικό Μοντέλο για το Radio Access Network

Η χρήση της τεχνολογίας Virtualization όσο αφορά το RAN υποδεικνύει μια νέα κατεύθυνση στην προσπάθεια εξεύρεσης μεθόδων για τη μείωση, του συνολικού κόστους και της ενεργειακής κατανάλωσης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η αυξανόμενη ανάγκη των χρηστών για αδιάκοπη συνδεσιμότητα και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται άμεσα από τη χωρητικότητα του δικτύου, το κόστος επέκτασης της οποίας, με τη χρήση παραδοσιακών τεχνικών γίνεται απαγορευτικό. Επομένως οι πάροχοι στρέφονται στην χρήση νέων τεχνολογιών όπως η χρήση του Cloud-RAN και του Network Virtualization. Το RAN αποτελεί το 40% του συνολικού λειτουργικού κόστους [72] ενός cellular δικτύου, γεγονός που κάνει ακόμα πιο επιτακτική την ανάγκη για μείωση του. Οι λειτουργίες ενός cellular δικτύου απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Το γεγονός αυτό δεν έχει επίπτωση μόνο στην αύξηση του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX) αλλά συμβάλει επίσης στην αύξηση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Είναι γεγονός ότι η ICT βιομηχανία ευθύνεται για το 2-3% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ενώ ο ρυθμός εκπομπής διπλασιάζεται κάθε χρόνο.

Πολλοί μεγάλοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών συνηγορούν στην υιοθέτηση της τεχνολογίας Virtualization για το RAN [73], προκειμένου να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ QoS, κόστους και ενεργειακής κατανάλωσης. Η τεχνολογία Virtualization στοχεύει στην αποδοτική χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου και στη δυνατότητα εκμετάλλευσης των «διασκορπισμένων» υπολογιστικών πόρων. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το Cloud Computing και το Virtual Networking, θα οδηγήσουν στη εισαγωγή των «πράσινων» τεχνολογιών στον τομέα των τηλεπικοινωνιών [74, 75]. Για παράδειγμα, αν οι εικονικοί πόροι συγκεντρώνονται σε Data Centers τα οποία τροφοδοτούνται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, θα υπάρξει μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> αλλά και εξοικονόμηση από τα λειτουργικά κόστη για τους παρόχους υπηρεσιών.

Ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο υλοποιείται σε μια περιοχή A το οποίο εκμεταλλεύεται από διαφορετικούς παρόχους και όπου εκεί βρίσκονται εγκατεστημένοι οι SD-BSs του SoftAir. Στο μοντέλο που παρουσιάζουμε, κάνουμε την παραδοχή ότι στους virtual operators προσφέρεται η ίδια ποσότητα διαθέσιμου φάσματος που προσφέρεται στους παρόχους του φυσικού δικτύου.

### 4.1.1 Υπολογισμός CAPEX

Αρχικά θα παραθέσουμε το μοντέλο υπολογισμού του κεφαλαιακού κόστους για ένα παραδοσιακό Radio Access Network, όπου δηλαδή δεν υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης εικονικών σταθμών βάσης.

Οι παράμετροι για ένα παραδοσιακό Radio Access Network είναι:

- $n_{op}$ : Ο αριθμός των παρόχων στην περιοχή
- $C_{cs-sbs}$ : Κόστος ενοικίασης περιοχής και εγκατάστασης του cell
- $C_{BS}$ : Κόστος σταθμού βάσης

- $N_{BSO}$ : Ο αριθμός των σταθμών βάσης ανά πάροχο

Σύμφωνα λοιπόν με το [70], το συνολικό κόστος ενοικίασης και εγκατάστασης του cell θα ισούται με

$$C_{cs-sbs-total} = n_{op} * N_{BSO} * C_{cs-sbs}$$

Ενώ το συνολικό κόστος εξοπλισμού των σταθμών βάσης για τους όλους τους διαφορετικούς παρόχους θα είναι

$$C_{BStotal} = n_{op} * N_{BSO} * C_{BS}$$

Επομένως το συνολικό κεφαλαιακό κόστος CAPEX για ένα παραδοσιακό δίκτυο RAN προκύπτει

$$CAPEX_{traditional} = C_{cs-sbs-total} + C_{BStotal} = n_{op} * N_{BSO} * (C_{cs-sbs} + C_{BS}) \quad (1)$$

Παραθέσαμε το μοντέλο που υπολογίζει το CAPEX για ένα παραδοσιακό δίκτυο RAN για να μπορέσουμε αργότερα να πραγματοποιήσουμε τη σύγκριση με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική για το RAN. Στη συνέχεια, παραθέτουμε το οικονομικό μοντέλο υπολογισμού του CAPEX για τη δημιουργία του Radio Access Network, ενός εικονικού δικτύου [70].

Οι παράμετροι του Virtual Network είναι:

- $n_{vs}$ : Ο αριθμός των εικονικών σταθμών βάσης ανά SD-BS
- $\lambda_{SBS}$ : Αριθμός χρηστών στην περιοχή A
- $N_{SBS}$ : Αριθμός SD-BS στην περιοχή A
- $R_{max}$ : Εύρος Κάλυψης του σταθμού βάσης
- $C_{cs-sbs}$ : Κόστος ενοικίασης περιοχής και εγκατάστασης του cell
- $C_{SBS}$ : Κόστος SD-BS σταθμού βάσης, όπου  $C_{SBS} = C_{BS} * [1 + 0.2 * (n_{vs} - 1)]$

Υποθέτουμε ότι το κόστος ενός SD-BS αυξάνεται κατά 20% ανάλογα με τον αριθμό εικονικών σταθμών βάσης που υλοποιούνται «πάνω» του.

Ο συνολικός αριθμός των σταθμών βάσης που χρειάζεται για να καλύψουμε την περιοχή A, αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή  $N_{SBS}$  και δίνεται από τον τύπο:

$$N_{SBS} = \frac{A}{\pi * R_{max}^2}$$

Η μεταβλητή  $N_{UE}$  αντιπροσωπεύει το συνολικό αριθμό χρηστών στην περιοχή A και δίνεται από τη σχέση,

$$N_{UE} = \lambda_{SBS} * A = n_{vs} * \lambda * \pi * R_{max}^2 * N_{SBS}$$

Το συνολικό κόστος για εγκατάσταση των σταθμών βάσης και την ενοικίαση της περιοχής όπου θα χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του δικτύου είναι,

$$C_{site} = N_{SBS} * C_{cs-sbs}$$

Το συνολικό κόστος για την απόκτηση των σταθμών βάσης προκειμένου να καλύψουμε την δεδομένη περιοχή A θα είναι,

$$C_{sbs} = N_{SBS} * C_{SBS}$$

Το συνολικό CAPEX για την υλοποίηση του περιγραφόμενου δικτύου, θα είναι το κόστος απόκτησης του απαιτούμενου αριθμού σταθμών βάσης συν το κόστος ενοικίασης της περιοχής που εγκαθιστούμε τους σταθμούς βάσης του δικτύου μας. Επομένως το συνολικό CAPEX για το RAN, θα είναι:

$$\begin{aligned} CAPEX_{RAN} &= C_{site} + C_{sbs} = \\ &= \frac{N_{UE}}{n_{vs} * \lambda * \pi * R_{max}^2} * (C_{cs-sbs} + C_{SBS}) \end{aligned} \quad (2)$$

#### 4.1.2 Υπολογισμός OPEX

Στην ενότητα αυτή, θα υπολογίσουμε το λειτουργικό κόστος OPEX για το RAN του δικτύου που περιγράψαμε πιο πάνω.

Ένας σταθμός βάσης αποτελείται από διάφορα μέρη τα οποία καταναλώνουν ενέργεια και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του λειτουργικού κόστους ενός

δικτύου. Τα μέρη του σταθμού βάσης που καταναλώνουν ενέργεια και οι αντίστοιχες μεταβλητές ισχύος είναι:

- Ισχύς Transceiver  $P_{trans}$
- Ισχύς Rectifier  $P_{rect}$
- Ισχύς επεξεργαστή ψηφιακού σήματος  $P_{DSP}$
- Ισχύς Ενισχυτή  $P_{PA}$
- Ισχύς MW μεταδότη  $P_{mw}$
- Ισχύς μηχανισμού ψύξης  $P_{air}$

Ένας σταθμός βάσης διαθέτει παραπάνω από μια κεραιές και κάθε κεραία διαθέτει από έναν Transceiver, έναν Rectifier, μια μονάδα επεξεργασίας ψηφιακού σήματος και έναν ενισχυτή ισχύος.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Shannon για τη χωρητικότητα καναλιού ισχύει,

$$R = w * w_{eff} * \log_2\left(1 + \frac{SNR}{SNR_{eff}}\right)$$

Όπου σύμφωνα με το [70], το  $w_{eff}$  ορίζεται ως η αποδοτικότητα του εύρους ζώνης και ισούται με 0.56, το  $SNR_{eff}=1$  και αντιπροσωπεύει την αποδοτικότητα του SNR και  $w$  είναι το διατιθέμενο bandwidth σε κάθε χρήστη.

Η ενεργειακή κατανάλωση του παραδοσιακού σταθμού βάσης  $P_{BS}$  δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$P_{BS} = n_a * (P_{trans} * P_{rect} * P_{PA} * P_{DSP}) + P_{air} + P_{mw} \quad (3)$$

Όπου  $n_a$  είναι ο αριθμός των τοποθετημένων σταθμών βάσης και  $P$  τα αντίστοιχα ποσά ισχύος. Σύμφωνα με το [70], τα μέρη του σταθμού βάσης που αναφέραμε πιο πάνω απαιτούν την εξής ποσότητα ισχύος μετρημένη σε Watts όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1: Μέρη του σταθμού βάσης και ενεργειακή κατανάλωση.**

<b>BS Parts</b>	<b>Power Consumption(W)</b>
DSP	100
Power Amplifier(MIMO)	10.4
Transceiver	100
Rectifier	100
Air Conditioner	225

Η Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση  $P_{BSO}$  για κάθε πάροχο ο οποίος χρησιμοποιεί  $N_{SBS}$  σταθμούς βάσης είναι:

$$P_{BSO} = N_{SBS} * P_{BS}$$

Αν υπάρχουν  $n_{op}$  πάροχοι στη περιοχή A, τότε η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου είναι:

$$P_{BSOP} = n_{op} * P_{BSO}$$

Ο αριθμός των χρηστών  $N_{UE}$ , που αντιστοιχούν σε κάθε operator σε μια περιοχή λ δίνεται μέσω της σχέσης:

$$N_{UE} = N_{SBS} * \lambda * \pi * R_{max}^2$$

Ο συνολικός αριθμός χρηστών που εξυπηρετούνται από  $n_{op}$  σε μια περιοχή A είναι:

$$N_{UEO} = n_{op} * N_{UE}$$

Η συνολική χωρητικότητα του δικτύου είναι  $R_O = N_{UEO} * R$ , όπου R η χωρητικότητα που αντιστοιχεί σε ένα χρήστη.

Για ένα παραδοσιακό σταθμό βάσης η καταναλισκόμενη ενέργεια per bit είναι:

$$P_{BSbit} = \frac{P_{BS}}{R_O} = \frac{P_{BS}}{\pi * \lambda * R_{max}^2 * ww_{eff} * \log_2(1 + SNR)}$$

Οι SD-BSs που χρησιμοποιούμε στο SoftAir, παρέχουν περισσότερες υπολογιστικές δυνατότητες από τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης, γεγονός που επιφέρει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ισχύ για το μηχανισμό ψύξης ( $P_{air}$ ) και το μηχανισμό μετάδοσης MW ( $P_{mw}$ ). Με την ίδια λογική όπως και πάνω, υποθέτουμε ότι οι απαιτήσεις σε ισχύ ενός SD-BS (για το MW και το μηχανισμό ψύξης) αυξάνεται γραμμικά κατά 20% ανάλογα με τον αριθμό εικονικών σταθμών βάσης που υλοποιούνται «πάνω» του. Έτσι λοιπόν θα έχουμε:

$$P_{airSBS} = P_{air} * [1 + 0.2 * (n_{vs} - 1)]$$

$$P_{mwsBS} = P_{mw} * [1 + 0.2 * (n_{vs} - 1)]$$

Επιπλέον, στην αρχιτεκτονική του SoftAir οι σταθμοί βάσης (SD-BSs), δίνουν τη δυνατότητα κάθε κεραία του να μοιράζεται μεταξύ των διαφορετικών εικονικών σταθμών βάσης (Virtual Base Stations) που υλοποιούνται «πάνω» στον φυσικό SD-BS. Με βάση την παραπάνω ιδιότητα, κάθε VBS θα διαθέτει τη δική του μονάδα επεξεργασίας ψηφιακού σήματος DSP αλλά θα μοιράζεται την κεραία του SD-BS, επομένως θα μοιράζεται και τον transceiver ( $P_{trans}$ ), τον rectifier ( $P_{rect}$ ) και τον ενισχυτή ισχύος ( $P_{PA}$ ).

Πιο συγκεκριμένα η κατανάλωση ισχύος για τα κοινόχρηστα στοιχεία θα είναι με βάση το μοτίβο που χρησιμοποιήσαμε πιο πάνω:

$$P_{rfSBS} = (P_{trans} + P_{rect} + P_{PA}) * [1 + 0.2 * (n_{vs} - 1)]$$

Επομένως η ενεργειακή κατανάλωση του σταθμού βάσης SD-BS του SoftAir είναι

$$P_{SBS} = n_a * P_{rfSBS} + n_{vs} * P_{DSP} + P_{airSBS} + P_{mwsBS}$$

Το συνολικό λειτουργικό κόστος OPEX για το Radio Access Network θα είναι το γινόμενο της ενέργειας που καταναλώνει ένας σταθμός βάσης επί τον αριθμό των σταθμών βάσης που είναι εγκατεστημένοι στην περιοχή επί την τιμή της κιλοβατώρας. Άρα προκύπτει ότι,

$$OPEX_{RAN} = P_{SBS} * N_{SBS} * C_{kwh} \quad (4)$$

## 4.2 Οικονομικό Μοντέλο για το Core Network

Ο παραδοσιακός δικτυακός εξοπλισμός τείνει στο να γίνεται όλο και πιο φθηνός όσο αφορά το κόστος απόκτησής του (CAPEX), ωστόσο από πλευράς λειτουργικού κόστους (OPEX) το κόστος παραμένει υψηλό. Όσο αφορά το σχεδιασμό των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, το παραπάνω γεγονός συνηγορεί στην υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το SDN, το NFV, το Cloud-RAN κ.α. Η χρήση της τεχνολογίας SDN, η οποία διαχωρίζει στον υπάρχοντα εξοπλισμό το επίπεδο διαχείρισης και το επίπεδο προώθησης πακέτων, προσφέρει μια σειρά από οφέλη όπως αναφέραμε και πιο πάνω. Για παράδειγμα, προσφέρει ευελιξία στο δίκτυο, μέσω της κεντροποιημένης διαχείρισης

του δικτύου, του traffic engineering αλλά και του traffic classifier, μια καινοτομία που προσφέρει το SoftAir. Από την άλλη πλευρά, η χρήση της τεχνολογίας Virtualization επιτρέπει την πραγματοποίηση των λειτουργιών του δικτύου σε Virtual Machines οι οποίες θα τρέχουν σε μη-εξειδικευμένο hardware. Αυτό το hardware, βρίσκεται συνήθως τοποθετημένο σε μεγάλα Data Centers τα οποία εξοπλίζουν ή νοικιάζουν οι πάροχοι των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Οι διαφορετικοί παίκτες στην αγορά που δημιουργείται (π.χ. Network Operators, Virtual Network Operators, πάροχοι υπηρεσιών, πάροχοι Data Centers κ.α.) και οι νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες υποδεικνύουν την δημιουργία και την υιοθέτηση νέων τεχνοοικονομικών μοντέλων.

#### 4.2.1 Υπολογισμός CAPEX

Στο vEPC που παρουσιάσαμε πιο πάνω οι λειτουργίες του Core Network υλοποιούνται σε Virtual Machines, σε μη εξειδικευμένο hardware. Το μη-εξειδικευμένο hardware, τοποθετείται σε Data Centers και η αγορά των servers και γενικότερα η επένδυση για τον εξοπλισμό του Data Center, η ενοικίαση ή αγορά του χώρου για τη στέγαση του Data Center καθώς και η one-time πληρωμή της άδειας για τις VNFs που εκτελούν τις δικτυακές λειτουργίες αποτελούν το CAPEX του Core Network.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι του CAPEX είναι:

- $C_{servers}$ : Το κόστος αγοράς των servers που χρησιμοποιούμε στο Data Center
- $C_{place}$ : Το κόστος ενοικίασης/δημιουργίας του Data Center
- $C_{license}$ : Κόστος license για τις VNFs

Ο αριθμός των servers  $n_{servers}$  που θα χρειαστούμε προκύπτει από τον αριθμό των Virtual Machines που χρειαζόμαστε για να εκτελεστούν οι λειτουργίες των δικτυακών οντοτήτων, όπως θα υπολογίσουμε παρακάτω. Επομένως το συνολικό κόστος αγοράς των servers θα ισούται με  $C_{servers} = n_{servers} * C_{xeon}$ , όπου  $n_{servers}$  ο αριθμός των απαιτούμενων server για το στήσιμο του δικτύου όπως θα αναλύσουμε παρακάτω και  $C_{xeon}$  είναι το κόστος αγοράς του Xeon Blade Server της Dell, το οποίο είναι 5.834€ [55].

Το κόστος  $C_{place}$  εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως αν θα στήσουμε εμείς το Data Center ή θα νοικιάσουμε έτοιμες εγκαταστάσεις, αν θα έχουμε συνιδιοκτησία του Data Center, η περιοχή, τετραγωνικά μέτρα, χρονολογία κατασκευής κτιρίου κ.α.

Η one-time πληρωμή της άδειας για τις VNFs  $C_{license}$ , αποτελείται από τις άδειες όλων των δικτυακών οντοτήτων που τρέχουμε υπό μορφή software

$$C_{license} = C_{HSS} + C_{MME} + C_{SGW} + C_{PGW} + C_{OVS} + C_{OFcontroller}$$

Επομένως το συνολικό κεφαλαιακό κόστος CAPEX, θα είναι

$$CAPEX_{vEPC} = C_{servers} + C_{license} + C_{place} \quad (5)$$

#### 4.2.2 Υπολογισμός OPEX

Το λειτουργικό κόστος (OPEX) ενός εικονικού δικτύου, αφορά κυρίως τη λειτουργία των VMs και τη συντήρηση του Data Center. Πιο συγκεκριμένα, στο λειτουργικό κόστος εντάσσονται η κατανάλωση ενέργειας του hardware που τοποθετείται στο Data Center, επιδιορθώσεις σε βλάβες που μπορεί να προκύψουν, αναβαθμίσεις software κ.α.

Η υλοποίηση του vEPC χωρίζεται σε δύο στάδια: α) στην αντιστοίχιση των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των VMs και του Server και β) στην αντιστοίχιση των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των VNFs και της VM.

Το τεχνοοικονομικό μοντέλο που παρουσιάζεται στο [71] και στο οποίο θα βασιστούμε υποδεικνύει το πώς γίνεται η αντιστοίχιση των πόρων του server και ο διαμοιρασμός τους μεταξύ των VMs που φιλοξενούνται στον server αυτό.

Υποθέτουμε ότι χρησιμοποιούμε τον XEON blade server, ο οποίος προσφέρει πόρους όπως CPU, μνήμη, αποθηκευτικό χώρο και δικτυακές δυνατότητες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Στον Πίνακα 3, παραθέτουμε τους διαθέσιμους πόρους για κάθε VM που φιλοξενείται σε έναν Blade Server.

**Πίνακας 2: Πόροι XEON Blade Server.**

<b>CPU</b>	<b>Memory</b>	<b>Storage</b>	<b>Networking</b>
2x XEON CPU (2x 4 cores)	64 GB ECC RAM	2TB RAID 1- HDD	4x 10GB

**Πίνακας 3: Διαθέσιμοι πόροι για κάθε VM που φιλοξενείται στον XEON Blade Server.**

<b>VM max</b>	<b>CPU per VM</b>	<b>Memory Per VM</b>	<b>Storage Per VM</b>	<b>Networking Per VM</b>	<b>Packet Processing Per VM</b>
4 VMs	2 core per VM	8 GB per VM	250 GB per VM	10 Gbps Max.	1.9 Mpps Per VM

Όπως παρατηρούμε και στον Πίνακα 2, πέρα από τους βασικούς πόρους που προσφέρονται από τον server δηλώνεται επιπλέον για κάθε VM, η ταχύτητα

επεξεργασίας πακέτου. Τα Open Virtual Switches (oVS) που χρησιμοποιούμε στο Core Network του SoftAir, επεξεργάζονται περίπου 1.4 Mpps στον πρώτο πυρήνα και 0,5 Mpps στον δεύτερο πυρήνα σύμφωνα με τους συγγραφείς [71], επομένως υποθέτουμε ότι η ταχύτητα επεξεργασίας πακέτων της τάξης του 1.9 Mpps αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο.

Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας επεξεργασίας των πακέτων και της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου εξαρτάται από το μέγεθος των πακέτων που διακινούνται μέσα στο δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο, η ταχύτητα επεξεργασίας των πακέτων μπορεί να υπολογιστεί δεδομένης της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα ισχύουν οι τύποι,

$$T_{processing} = \frac{T_{throughput} * 1 \text{ packet}}{8 \text{ bit} * \text{packet}_{length}}$$

Ή αλλιώς  $T_{processing}[Mpps] = 0.368 * T_{throughput}[Gbps]$ .

Από την άλλη, ο αριθμός των Virtual Machines που απαιτείται για την ικανοποίηση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

Για παράδειγμα για το HSS,

$$VM_{CPU} = \text{ceil}\left(\frac{CPU \text{ per HSS required}}{CPU \text{ per VM provided}}\right)$$

$$VM_{mem} = \text{ceil}\left(\frac{Memory \text{ per HSS required}}{Memory \text{ per VM provided}}\right)$$

$$VM_{Net} = \text{ceil}\left(\frac{Bitrate \text{ per HSS required}}{Bitrate \text{ per VM provided}}\right)$$

$$VM_{PPS} = \text{ceil}\left(\frac{Packet \text{ Rate per HSS required}}{Packet \text{ Rate per VM provided}}\right)$$

$$VM_{str} = \text{ceil}\left(\frac{Storage \text{ per HSS required}}{Storage \text{ per VM provided}}\right)$$

Τέλος ο συνολικός αριθμός VMs που χρειάζεται για την εκτέλεση της συγκεκριμένης λειτουργίας θα είναι,

$$VM_{requiredperHSS} = \max(VM_{cpu}; VM_{mem}; VM_{net}; VM_{PPS}; VM_{storage})$$

Όσο αφορά στην αντιστοίχιση των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των VNFs και της VM, κάθε δικτυακή συσκευή ή κάθε VNF, «δηλώνει» στην VM τις απαιτήσεις της σε πόρους και η VM ελέγχει αν ο server διαθέτει τους απαιτούμενους πόρους για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης λειτουργίας. Με άλλα λόγια η VNF ζητάει τους πόρους από τη VM στην οποία υλοποιείται, στη συνέχεια η VM ελέγχει τις απαιτήσεις αυτές και μεταβιβάζει το αίτημα στο server ο οποίος με τη σειρά του προσφέρει τους απαραίτητους πόρους. Εφόσον, βρούμε λοιπόν πόσες Virtual Machines χρειάζονται για την υλοποίηση των δικτυακών οντοτήτων, μπορούμε να υπολογίσουμε σύμφωνα με τους Πίνακες 1 και 2 τον αριθμό των servers που θα χρειαστούμε  $n_{servers}$ . Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 κάθε server μπορεί να προσφέρει μέχρι 4 Virtual Machines, επομένως αφού υπολογίσουμε τον αριθμό των Virtual Machines που χρειάζεται για να υλοποιηθεί κάθε μία από τις οντότητες του δικτύου κορμού, μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τον αριθμό των servers που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε. Το λειτουργικό κόστος OPEX για το vEPC, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω προκύπτει από την ενεργειακή κατανάλωση του Data Center. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ενεργειακή κατανάλωση του Data Center θα πολλαπλασιάσουμε τον αριθμό των servers με την μέση ενεργειακή κατανάλωση η οποία είναι 1332 kWh [56] επί την τιμή της kWh.

Επομένως,

$$OPEX_{vEPC} = n_{servers} * 1332 * 0.21 \quad (6)$$

### 4.3 Total Cost of Ownership (TCO)

Γενικά, Total Cost of Ownership (TCO) είναι μια οικονομική εκτίμηση, που προορίζεται να βοηθήσει τους αγοραστές και τους ιδιοκτήτες να καθορίσουν το άμεσο και έμμεσο κόστος ενός προϊόντος ή συστήματος. Το TCO για ένα δικτυακό προϊόν, ορίζεται ως το συνολικό κόστος που δαπανήθηκε για την απόκτηση του εξοπλισμού και το κόστος που δαπανάται για τη λειτουργία και συντήρηση του εξοπλισμού αυτού. Κατά συνέπεια, το κόστος, για την ιδιοκτησία του συστήματος, είναι το άθροισμα των επί μέρους δύο τύπων κόστους, δηλαδή του CAPEX και του OPEX.

Στο μοντέλο μας, προκειμένου να υπολογίσουμε ακριβέστερα το κεφαλαιακό και το λειτουργικό κόστος της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, χωρίσαμε την οικονομική ανάλυση σε δύο μέρη. Πρώτα υπολογίσαμε το κεφαλαιακό (CAPEX) και λειτουργικό κόστος (OPEX) για το RAN και στη συνέχεια υπολογίσαμε τα ίδια μεγέθη για το vEPC.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω και σύμφωνα με τις εξισώσεις (1), (2) το συνολικό κόστος για το RAN θα ισούται με  $Cost_{RAN} = OPEX_{RAN} + CAPEX_{RAN}$ .

Με την ίδια λογική το συνολικό κόστος για το vEPC, θα ισούται με το άθροισμα των αντίστοιχων μεγεθών του κεφαλαιακού CAPEX και του λειτουργικού κόστους OPEX του δικτύου κορμού. Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3), (4) το κόστος για το vEPC, θα ισούται με  $Cost_{vEPC} = OPEX_{vEPC} + CAPEX_{vEPC}$

Τέλος το Total Cost of Ownership (TCO) για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική προκύπτει από το άθροισμα του συνολικού κόστους των επιμέρους τμημάτων του δικτύου (RAN και vEPC) και θα είναι,

$$\begin{aligned}
 TCO &= Cost_{vEPC} + Cost_{RAN} & (7) \\
 &= OPEX_{vEPC} + CAPEX_{vEPC} + CAPEX_{RAN} + OPEX_{RAN} \\
 &= (n_{servers} * 1332 * 0.21) + (C_{servers} + C_{license} + C_{place}) \\
 &\quad + \left[ \frac{N_{UE}}{n_{vs} * \lambda * \pi * R_{max}^2} * (C_{cs-sbs} + C_{SBS}) \right] + (P_{SBS} * N_{SBS} \\
 &\quad * C_{kwh}
 \end{aligned}$$

## 5. Θεωρητική Αξιολόγηση

Ο οργανισμός Heavy Reading, πραγματοποίησε μια σειρά από συνεντεύξεις με 27 ανώτερα στελέχη οι οποίοι εργάζονταν σε 18 διαφορετικούς Network Operators, συγκεντρώνοντας απόψεις όσο αφορά την υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το SDN και το NFV [60]. Με βάση αυτές τις συνεντεύξεις, παρατηρήθηκε ότι τα επιχειρηματικά κίνητρα των Network Operators για να υιοθετήσουν αυτές τις τεχνολογίες ήταν:

- Μικρότερου κόστους hardware
- Μικρότερο λειτουργικό κόστος (OPEX), κυρίως λόγω της κεντροποιημένης αρχιτεκτονικής και της απουσίας συντήρησης διασκορπισμένου εξοπλισμού
- Νέες υπηρεσίες και προϊόντα, τα οποία υποστηρίζουν την τεχνολογία SDN
- Βελτίωση του OSS (Operating Support System), με τη χρήση του SDN
- Μικρότερο κόστος ενεργειακής κατανάλωσης
- Γρηγορότεροι κύκλοι αναβάθμισης προϊόντων, τόσο στο hardware όσο και στο software
- Προσέλκυση νέων πελατών μέσω της χρήσης των virtual υπηρεσιών

Η ενσωμάτωση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στο σχεδιασμό του 5G, θα οδηγήσει στην απλοποίηση των λειτουργιών του δικτύου και στην αποδοτική χρησιμοποίηση των δικτυακών πόρων. Το γεγονός αυτό θα έχει τα εξής οφέλη από την πλευρά του παρόχου: α) θα ενισχύσει το εισόδημα τους και β) και θα μειώσει το Total Cost of Ownership (TCO) [68]. Το TCO είναι το άθροισμα του κεφαλαιακού κόστους (CAPEX) και του λειτουργικού κόστους (OPEX) για την υλοποίηση και την προσφορά των δικτυακών υπηρεσιών στους πελάτες. Για παράδειγμα, ο αυτοματοποιημένος συντονισμός των λειτουργιών του δικτύου, περιορίζει την ανθρώπινη παρέμβαση γεγονός το οποίο οδηγεί σε μικρότερο λειτουργικό κόστος. Από την άλλη πλευρά, όσο αφορά το κεφαλαιακό κόστος CAPEX, η ευελιξία της αρχιτεκτονικής και η βέλτιστη τροφοδοσία με πόρους των δικτυακών συναρτήσεων, οδηγεί σε μείωση του κόστους εξοπλισμού.

Από τεχνοοικονομικής άποψης, η ολοένα και μεγαλύτερη ενσωμάτωση του software στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, θα επιταχύνει τον ρυθμό καινοτομίας και θα μειώσει το λειτουργικό κόστος. Το γεγονός αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ο ανταγωνισμός σε επιχειρηματικό πεδίο να μεταφερθεί από τον τομέα του hardware στον τομέα του software. Έτσι θα δημιουργηθούν νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες προκειμένου να εισέλθουν περισσότεροι παίκτες στην αγορά. Η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών όπως αυτές που αναφέρουμε πιο πάνω, είναι αναπόφευκτη λόγω της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας και του μειωμένου λειτουργικού κόστους που προσφέρεται μέσω της χρήσης απλοποιημένου hardware. Η χρήση του SDN και του NFV, υπόσχεται μειώσεις κόστους λόγω της χρήσης απλοποιημένου hardware και της δυνατότητας τους να τρέχουν τις λειτουργίες του δικτύου υπό μορφή software [63]. Επιπλέον, η κεντροποιημένη αρχιτεκτονική και η συντονισμένη διαχείριση του δικτύου, οδηγεί

στην εξοικονόμηση λόγω της αναβολής των επενδύσεων για αναβάθμιση του δικτύου. Επιπλέον, η κεντροποίηση των λειτουργιών που αφορούν τον έλεγχο του δικτύου επιτρέπουν τη δυναμική δέσμευση πόρων και τη πραγματοποίηση real-time αλλαγών ανάλογα με την κατάσταση που επικρατεί στο δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λειτουργικού κόστους μέσω της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, αλλά και τη μείωση του κεφαλαιακού κόστους αφού πλέον υπάρχουν λιγότερες δικτυακές συσκευές αφού στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, βρίσκονται υλοποιημένες υπό μορφή hardware. Μάλιστα μπορούμε να μειώσουμε ακόμη περισσότερο το λειτουργικό κόστος μέσω του αποδοτικότερου διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένους αλγορίθμους [44, 45, 46].

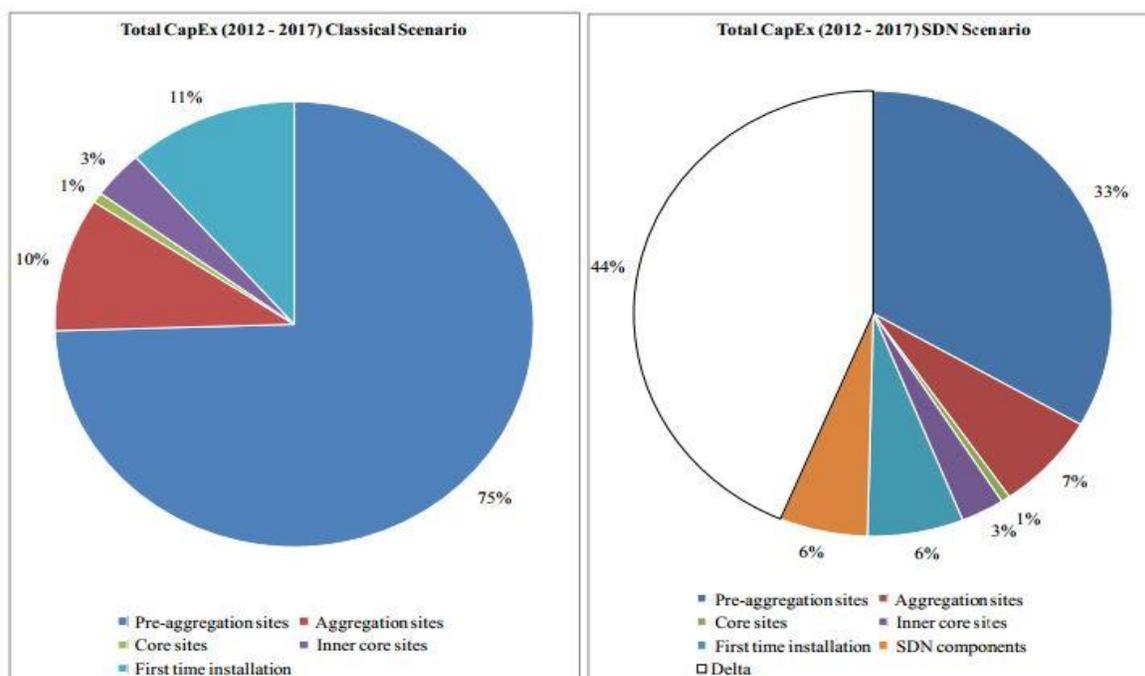
Διάφορες θεωρητικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί όσο αφορά τα οικονομικά οφέλη που θα αποφέρει στους παρόχους το "softwarization" των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Για παράδειγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 42, οι συγγραφείς στο [68] παραθέτουν τον παρακάτω πίνακα στον οποίο απεικονίζονται οι εκτιμήσεις τους για το πώς θα επηρεάσει τις διάφορες κατηγορίες του λειτουργικού κόστους ενός δικτύου, η ενσωμάτωση τεχνολογιών NFV και SDN.

OPEX category	Function area	Expected impact range
Network/IT operations	Deployment (rollout) and upgrade	50–90% saving
	Capacity management	60–80% savings
	Assurance (remote NOC)	Up to 5–25% savings
	Assurance (inside plant field repair)	80–95% savings
Network operations	Transport	10–25% savings
	Partner supplier management	Up to 40% increase in cost
Environmental operations	Power	20–70% savings
	Real estate	Up to 30–50% savings
Service operations	Assurance	10–20% savings
	Onboarding	5–10% savings

**Σχήμα 42: Εκτιμήσεις ποσοστών μείωσης του OPEX [68].**

Μια άλλη μελέτη υποστηρίζει ότι η ενσωμάτωση της τεχνολογίας του SDN στην αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων επικοινωνιών, θα μπορούσε να μειώσει κατά 44% το κεφαλαιακό κόστος CAPEX του δικτύου [51]. Στο Σχήμα 43 που ακολουθεί, απεικονίζεται το ποσοστό μείωσης του κεφαλαιακού κόστους για κάθε μια από τις κατηγορίες CAPEX. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για ένα δίκτυο [47], μετρώντας το κεφαλαιακό του κόστος πριν και μετά την ενσωμάτωση της τεχνολογίας του SDN στο δίκτυο.

### General CapEx reduction of 44%

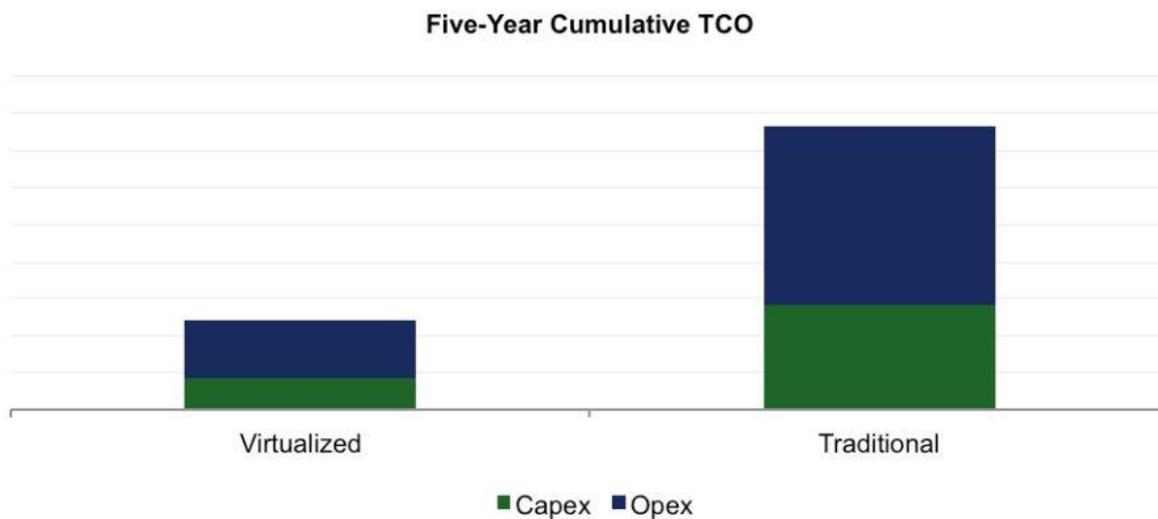


**Σχήμα 43: Ποιοτική Εκτίμηση μείωσης κάθε κατηγορίας CAPEX όταν χρησιμοποιείται το SDN [51].**

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, για το δίκτυο κορμού επιλέξαμε το vEPC της εταιρείας NEC. Θεωρούμε ότι χρησιμοποιώντας ένα virtualized δίκτυο κορμού θα έχουμε σημαντική μείωση του Total Cost of Ownership για το δίκτυο μας. Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε και η ACG Research, η οποία πραγματοποίησε μια οικονομική μελέτη με θέμα το Virtualization του δικτύου κορμού [48]. Στην έρευνα αυτή, γίνεται μια σύγκριση όσο αφορά το TCO, μεταξύ ενός παραδοσιακού δικτύου κορμού και ενός virtualized δίκτυο κορμού. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, είναι κάτι παραπάνω από ενθαρρυντικά αφού σύμφωνα με την έρευνα η υιοθέτηση της τεχνολογίας NFV θα αποφέρει μείωση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX κατά 68% ενώ στο λειτουργικό κόστος OPEX, θα υπάρξει μείωση της τάξης του 67%. Επιπλέον, σύμφωνα με την έρευνα αυτή, οι NOs που υιοθέτησαν ένα virtual δίκτυο κορμού αρχίσαν να εξοικονομούν χρήματα από τον πρώτο χρόνο, ενώ υποστηρίζεται ότι σε 3

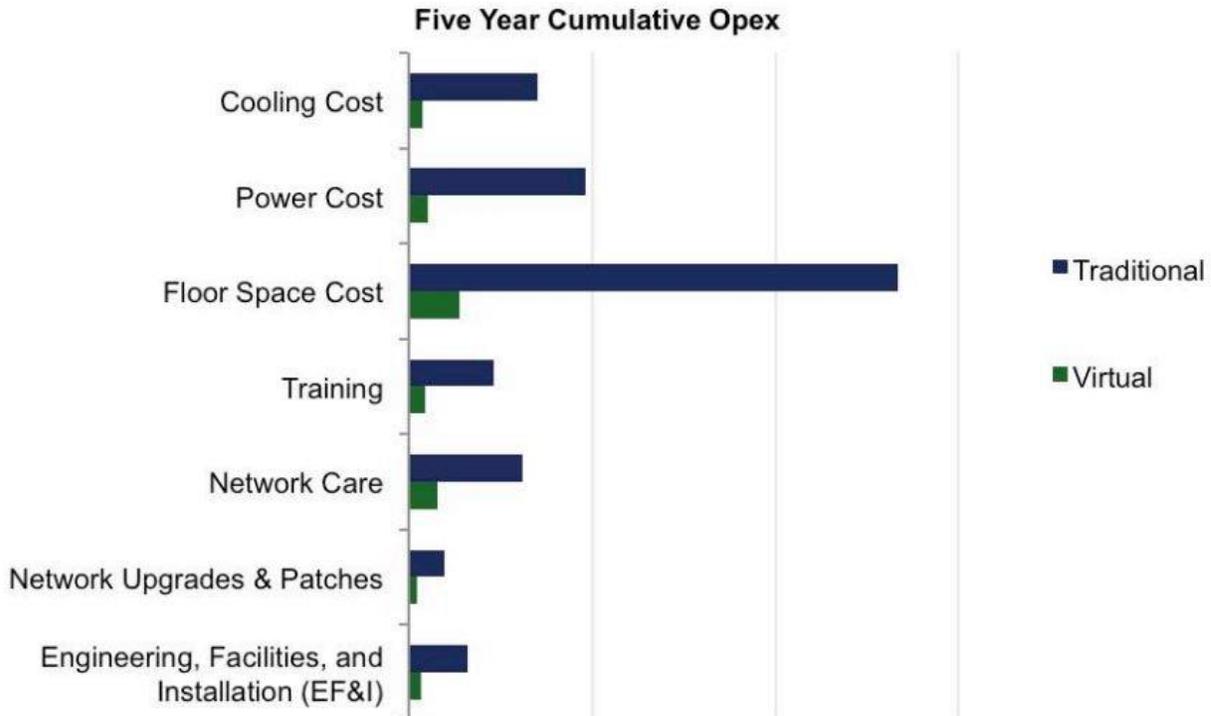
χρόνια θα έχουν αποσβέσει το κόστος της επένδυσης για την αρχική μετατροπή του δικτύου κορμού.

Στο Σχήμα 44 απεικονίζεται ποιοτικά η μείωση του TCO, τόσο για το CAPEX όσο και το OPEX, από την υιοθέτηση του virtualized δικτύου κορμού σε βάθος πενταετίας.



**Σχήμα 44: Ποιοτική Εκτίμηση μείωσης του TCO σε βάθος πενταετίας [48].**

Στο Σχήμα 45, βλέπουμε ποιοτικά τη μείωση κάθε κατηγορίας του λειτουργικού κόστους όπως παρουσιάζεται στην παραπάνω έρευνα από την υιοθέτηση του virtualized δικτύου κορμού.



**Σχήμα 45: Ποιοτική Εκτίμηση μείωσης κάθε κατηγορίας OPEX σε βάθος πενταετίας [48].**

Πώς όμως η ενσωμάτωση των τεχνολογιών που παρουσιάσαμε πιο πάνω, οδηγούν στις μειώσεις του CAPEX και του OPEX όπως προκύπτει από τις παραπάνω μελέτες;

Όσο αφορά το CAPEX, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία NFV, δεν υπάρχει η ανάγκη αγοράς εξειδικευμένου hardware αφού μπορούμε να υλοποιούμε τις δικτυακές συσκευές υπό μορφή software σε απλούς servers. Παράλληλα με τη χρήση του SDN, ο συντονισμός των υπάρχοντων δικτυακών συσκευών μεταφέρεται σε μια εξωτερική συσκευή η οποία ελέγχει πολλές δικτυακές συσκευές μέσω του OpenFlow. Παρότι υπάρχει ένα επιπλέον κόστος για την απόκτηση των OpenFlow-controllers, οι δικτυακές συσκευές γίνονται πιο απλές και φθηνές, αφού δεν διαθέτουν εξειδικευμένα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, μέσω της χρήσης του SDN αποκτούμε συνολική εικόνα για τον τρόπο χρησιμοποίησης του δικτύου και έτσι μας δίνεται η δυνατότητα για χρήση της τεχνολογίας traffic engineering. Μέσω της τεχνολογίας αυτής, μπορούμε να αποφύγουμε την υπερβολική επέκταση της χωρητικότητας του δικτύου και να μειώσουμε το κεφαλαιακό κόστος [47]. Ακόμη, το κεφαλαιακό κόστος μειώνεται λόγω της δυνατότητας διαμοιρασμού των στοιχείων του δικτύου μεταξύ των operators (π.χ. διαμοιρασμός των σταθμών βάσης). Οι κύριες παράμετροι που θα επηρεάσουν το μέγεθος του κεφαλαιακού κόστους, λόγω της εφαρμογής των προτεινόμενων τεχνολογιών είναι [51]:

- Εξοικονόμηση κεφαλαιακού κόστους, χρησιμοποιώντας απλούστερες συσκευές.

- Το επιπλέον κόστος, για την απόκτηση νέων συσκευών όπως τους OpenFlow-controllers.
- Ο αριθμός των switches που μπορούν να διαχειρίζονται από έναν OpenFlow-controller.
- Ευθυγράμμιση των επενδύσεων που πραγματοποιούνται στο δίκτυο, με τις πραγματικές απαιτήσεις του δικτύου.
- Αύξηση του ρυθμού χρησιμοποίησης του δικτύου, λόγω του SDN-controller που μας δίνει τη συνολική εικόνα του δικτύου.

Όσο αφορά το λειτουργικό κόστος, με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας SDN μειώνεται το κόστος από την κατανάλωση ενέργειας, αφού πλέον το Control Plane μετατοπίζεται από τις συσκευές αφού υπάρχει κεντρική διαχείριση. Επιπλέον, όπως είπαμε και πιο πάνω ελαττώνοντας τον αριθμό των συσκευών του δικτύου πέρα από μείωση του CAPEX, έχουμε και μείωση του OPEX αφού δεν υπάρχει και η αντίστοιχη ανάγκη για κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας συνολικά στο δίκτυο είναι ακόμη μικρότερη, επειδή υπάρχει διαμοιρασμός των δικτυακών συσκευών και μεγαλύτερη χρησιμοποίηση του δικτύου.

Επιπλέον, το κόστος συντήρησης του δικτύου είναι μικρότερο αφού λόγω της τεχνολογίας SDN υπάρχει συντονισμένη διαχείριση πολλών ξεχωριστών συσκευών. Ακόμη, παρατηρείται μείωση του λειτουργικού κόστους που προκύπτει από αναγκαίες επισκευές και αυτό γιατί, λόγω του διαμοιρασμού των δικτυακών πόρων, έχουμε και διαμοιρασμό των εξόδων επισκευής, στους διάφορους παρόχους που χρησιμοποιούν την κοινή υποδομή. Επιπροσθέτως, μείωση του λειτουργικού κόστους παρατηρείται και από το γεγονός ότι λόγω της κεντρικής-αυτοματοποιημένης διαχείρισης που προσφέρει η ενσωμάτωση της τεχνολογίας SDN, έχουμε μικρότερες απαιτήσεις για «χειροκίνητη» διαχείριση του δικτύου, άρα και μικρότερο αριθμό σφαλμάτων και μικρότερη ανάγκη για απασχόληση προσωπικού.

## 6. Πειραματική Αξιολόγηση

Για μία τεχνοοικονομική ανάλυση δεν αρκεί μόνο η μαθηματική απεικόνιση των μεθόδων κόστους όπως την πραγματοποιήσαμε στο Κεφάλαιο 4, αλλά είναι απαραίτητη και η ποσοτική ανάλυση, ούτως ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για την οικονομική βιωσιμότητα και τα οικονομικά οφέλη κάθε τεχνολογίας.

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται η ποσοτική ανάλυση των μεθόδων κόστους που περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιώντας πειράματα έτσι ώστε να σημειωθούν οι βασικές οικονομικές ιδιότητες της παραπάνω αρχιτεκτονικής που παρουσιάζεται και να δοθούν κίνητρα για την αξιοποίηση της.

### 6.1 Περιβάλλον Αξιολόγησης

Στον Πίνακα 4 καταγράφονται όλες οι τιμές των μεταβλητών και παραμέτρων, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του κεφαλαιακού κόστους CAPEX και του λειτουργικού κόστους OPEX για την εγκατάσταση του Radio Access Network (RAN). Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τις μεταβλητές για την αγορά, την εγκατάστασή και τη λειτουργία των σταθμών βάσης, καθώς και το κόστος ενεργειακής κατανάλωσης.

**Πίνακας 4: Τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό του CAPEX και του OPEX για την εγκατάσταση του Radio Access Network (RAN).**

<b>Παράμετρος</b>	<b>Περιγραφή</b>	<b>Τιμή</b>
$n_{vs}$	Αριθμός των εικονικών σταθμών βάσης ανά SD-BS.	Μέχρι 6 εικονικούς σταθμούς βάσης [70]
$\lambda_{SBS}$	Αριθμός χρηστών στην περιοχή A.	100-1000 χρήστες*
$N_{SBS}$	Αριθμός φυσικών σταθμών βάσης SD-BS για να καλύψουμε την περιοχή A.	10-100 σταθμοί βάσης ανά $km^2$ * [37]
$C_{cs-sbs}$	Κόστος ενοικίασης περιοχής και εγκατάστασης του cell.	5.000 € [83]
$C_{SBS}$	Κόστος SD-BS σταθμού βάσης, όπου $C_{SBS} = C_{BS} * [1 + 0.2 * (n_{vs} - 1)]$ ανάλογα με τον αριθμό εικονικών σταθμών βάσης που υλοποιούνται σε αυτόν.	15.596 € όταν δεν έχει υλοποιηθεί κανένας εικονικός σταθμός βάσης [97]
$P_{trans}$	Ισχύς Transceiver	100 Watt [70]
$P_{rect}$	Ισχύς Rectifier	100 Watt [70]
$P_{DSP}$	Ισχύς επεξεργαστή ψηφιακού σήματος	100 Watt [70]
$P_{PA}$	Ισχύς Ενισχυτή	10.4 Watt [70]
$P_{mw}$	Ισχύς MW μεταδότη	80 Watt [70]
$P_{air}$	Ισχύς μηχανισμού ψύξης	225 Watt [70]
$n_{op}$	Αριθμός παρόχων σε μια περιοχή A	10 διαφορετικοί πάροχοι*
$n_a$	Αριθμός κεραιών ανά BS	2x2 MIMO (4 κεραιές) [99]

Στον Πίνακα 5 παραθέτουμε τους πόρους που απαιτεί κάθε οντότητα του vEPC για να εκτελέσει τις δικτυακές της λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στις οντότητες SG-W, PG-W, MME, HSS, OpenFlow-controllers και Open Virtual Switch. Επειδή δεν υπάρχει δημόσια αναφορά για αυτές τις απαιτήσεις, παραθέτουμε κάποιες ενδεικτικές τιμές [71].

**Πίνακας 5: Τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό του CAPEX και του OPEX για την εγκατάσταση του Virtual Core Network (vEPC).**

<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>
<b>CPU per S/PG-W</b>	4,00 [71]	<b>Pps (Mpps) per HSS</b>	3,676 [71]
<b>Mem (GB) per S/PG-W</b>	32,00 [71]	<b>HDD (GB) per HSS</b>	3.000,00 [71]
<b>Net (Gbps) per S/PG-W</b>	10,00 [71]	<b>CPU per OF controller</b>	8,00 [71]

<b>Pps (Mpps) per S/PG-W</b>	7,353 [71]	<b>Mem (GB) per OF controller</b>	32,00 [71]
<b>HDD (GB) per S/PG-W</b>	40,00 [71]	<b>Net (Gbps) per OF controller</b>	2,00 [71]
<b>CPU per MME</b>	8,00 [71]	<b>Pps (Mpps) per OF controller</b>	1,471 [71]
<b>Mem (GB) per MME</b>	40,00 [71]	<b>HDD (GB) per OF controller</b>	40,00 [71]
<b>Net (Gbps) per MME</b>	5,00 [71]	<b>CPU per OVS</b>	1,00 [71]
<b>Pps (Mpps) per MME</b>	3,676 [71]	<b>Mem (GB) per OVS</b>	8,00 [71]
<b>HDD (GB) per MME</b>	1.000,00 [71]	<b>Net (Gbps) per OVS</b>	4,00 [71]
<b>CPU per HSS</b>	8,00 [71]	<b>Pps (Mpps) per OVS</b>	5,882 [71]
<b>Mem (GB) per HSS</b>	32,00 [71]	<b>HDD (GB) per OVS</b>	40,00 [71]
<b>Net (Gbps) per HSS</b>	5,00 [71]	<b>C<sub>place</sub></b>	5.000,0 - 25.000,0 € *
<b>C<sub>HSS</sub></b>	500 € *	<b>P<sub>server</sub></b>	1332 W [56]
<b>C<sub>MME</sub></b>	500 € *	<b>C<sub>OFcontroller</sub></b>	3.000,0 € [98]
<b>C<sub>SPGW</sub></b>	500 € *	<b>C<sub>OVS</sub></b>	500 € *
<b>C<sub>server</sub></b>	5.262,0 € [55]	<b>C<sub>kwh</sub></b>	0,15-0,25 € *

Βάση των τιμών των μεταβλητών που παρατίθενται στους Πίνακες 4 και 5, και εφαρμόζουμε τις δεδομένες τιμές στις εξισώσεις που δημιουργήθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Στα επόμενα κεφάλαια υπολογίζονται τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO, θέτοντας ως μεταβλητές κάθε φορά διαφορετικές παραμέτρους, ούτως ώστε να καταλήξει κανείς σε σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά (αύξηση/μείωση) των δαπανών για κάθε μία από τις τεχνολογίες αυτές.

## 6.2 Περιγραφή Πειραμάτων

Μετά από ενδελεχή έρευνα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, βρέθηκαν οι τυπικές τιμές, που επιλέχθηκαν και κατέστησαν το θεμέλιο για τη συγκεκριμένη μελέτη σχετικά με τις παραμέτρους των μοντέλων, οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά στους Πίνακες 4 και 5. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε σε κάποιες από τις τιμές υπάρχει το σύμβολο (\*), ενώ σε άλλες παραθέτουμε ένα εύρος δυνατών τιμών. Οι τιμές που συνοδεύονται από αστερίσκο αποτελούν δικές μας εκτιμήσεις των πραγματικών τιμών, καθώς οι εταιρείες δεν παρέχουν πρόσβαση σε αυτά τα

οικονομικά στοιχεία. Ωστόσο, η επιλογή των τιμών έγινε με γνώμονα να μην ξεφύγουμε σε τάξη μεγέθους.

Πιο συγκεκριμένα, για την μεταβλητή  $C_{kwh}$ , δώσαμε ένα λογικό εύρος τιμών μέσα στο οποίο υπάγεται και η τιμή κιλοβατώρας στην Ελλάδα τη δεδομένη στιγμή. Για τη μεταβλητή των σταθμών βάσης  $N_{SBS}$  βασιστήκαμε στον πίνακα VIII της εργασίας [37], που παραθέτει τον αριθμό σταθμών βάσης που απαιτούνται για την κάλυψη διάφορων βιομηχανικών και εμπορικών περιοχών στη Σουηδία, αναφέροντας πόλεις όπως η Στοκχόλμη, η Ουψάλα κ.α. Όσο αφορά τις μεταβλητές  $\lambda_{SBS}$  και  $n_{vs}$ , θα χρησιμοποιήσουμε το εύρος τιμών που παρατίθενται στην εργασία [70]. Τέλος για τη μεταβλητή  $C_{place}$  μετά από ενδελεχή έρευνα των τρόπων εκμετάλλευσης ενός Data Center (κατασκευή εξ' αρχής ή ενοικίαση τμήματος ενός μεγαλύτερου Data Center) και των διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή ενοικίασης ενός κτηρίου (τετραγωνικά, περιοχή κ.α.) καταλήξαμε στο εικονιζόμενο εύρος τιμών.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε μια σειρά πειραμάτων και κάθε φορά, θα μεταβάλλουμε μία από τις μεταβλητές και θα ελέγχουμε τη μεταβολή του κεφαλαιακού κόστους CAPEX, του λειτουργικού κόστους OPEX και του Total Cost of Ownership (TCO). Αφού επιλέξουμε την μεταβλητή που θα μεταβάλλουμε, θα θέσουμε στις άλλες μεταβλητές μια μέση τιμή του εύρους τιμών για κάθε μεταβλητή.

### 6.2.1 1<sup>ο</sup> Πείραμα: Ανάλυση Κόστους για Μεταβαλλόμενο Αριθμό Virtual Slices (VBSs)

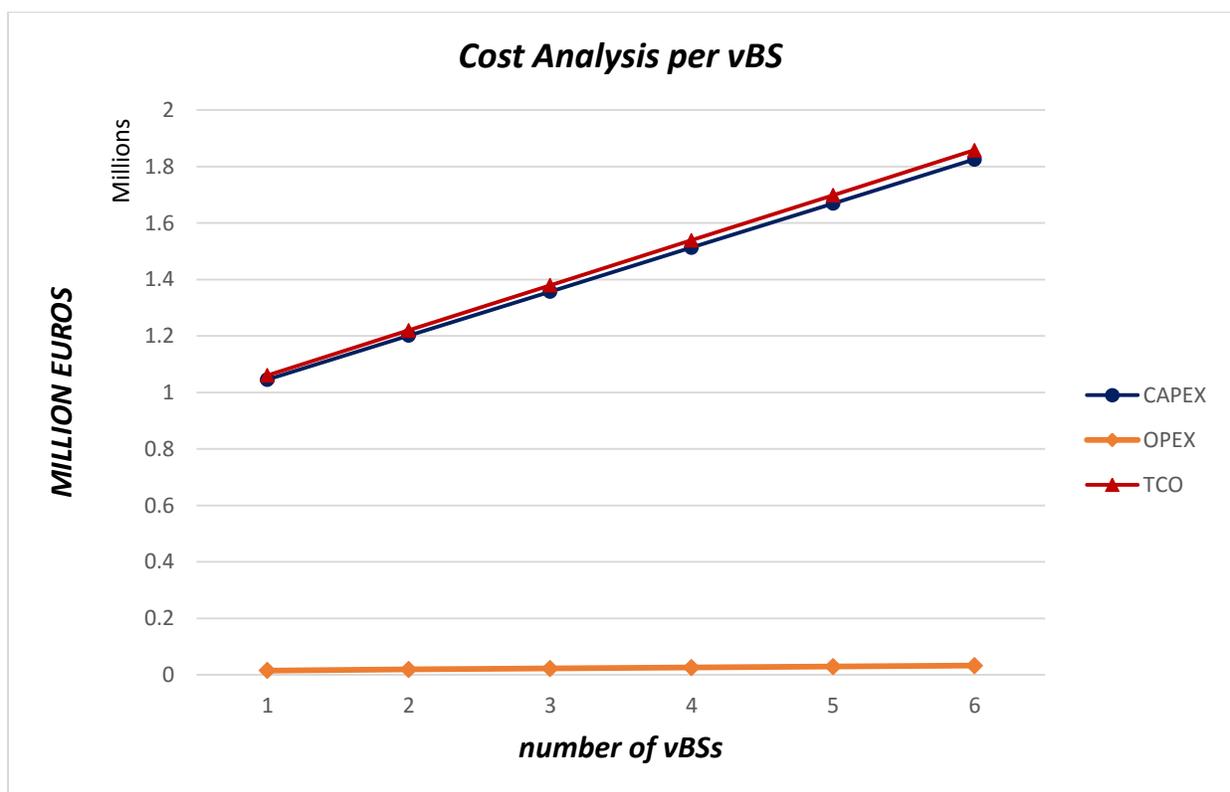
Στο πρώτο πείραμα που θα πραγματοποιήσουμε, έχουμε ως στόχο να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά του κεφαλαιακού κόστους, του λειτουργικού κόστους και του TCO όταν αυξάνουμε τον αριθμό των εικονικών κόμβων που υλοποιούμε πάνω σε έναν SD-BSs. Εφόσον όπως είπαμε στο πείραμα αυτό το ρόλο της μεταβλητής θα παίξει ο αριθμός των εικονικών κόμβων ( $n_{vs}$ ), θα θέσουμε στις άλλες μεταβλητές μια μέση τιμή η οποία προκύπτει από το εύρος ζώνης που αντιστοιχίσαμε σε κάθε μεταβλητή. Στον Πίνακα 6 που ακολουθεί, βλέπουμε τις τιμές που επιλέξαμε ως μέση τιμή για τις άλλες μεταβλητές:

**Πίνακας 6: Μέση Τιμή των μεταβλητών κατά την εκτέλεση του πειράματος 1**

Παράμετρος	Τιμή
$N_{SBS}$	50 φυσικοί σταθμοί βάσης ανά km <sup>2</sup>
$C_{place}$	10.000 €
$C_{kwh}$	0.21 €
$\lambda_{SBS}$	500 χρήστες

Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, κάθε SD-BS μπορεί να φιλοξενήσει μέχρι 6 virtual Base Stations. Για τον υπολογισμό του κεφαλαιακού κόστους CAPEX εφαρμόζουμε τους αντίστοιχους τύπους από το Κεφάλαιο 4 για τον υπολογισμό του κεφαλαιακού κόστους τόσο για το RAN όσο και για το vEPC, δηλαδή τις σχέσεις (2) και (5). Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους OPEX χρησιμοποιούμε τις σχέσεις (4) και (6), ενώ αφού έχουμε υπολογίσει τα CAPEX και OPEX θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (7) προκειμένου να υπολογίσουμε το Total Cost of Ownership. Τελικά, εφαρμόζοντας στις παραπάνω σχέσεις τα

δεδομένα που παρατίθενται στους Πίνακες 4, 5 και 6, είναι δυνατό να προκύψουν ορισμένες γραφικές παραστάσεις. Στην γραφική παράσταση του Σχήματος 46, φαίνεται το OPEX, το CAPEX και το TCO του δικτύου όταν μεταβάλλουμε το πλήθος των εικονικών σταθμών βάσης που υλοποιούμε πάνω σε κάθε φυσικό SD-BS. Όπως αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία σέ έναν φυσικό SD-BSs μπορούν να υλοποιηθούν μέχρι 6 εικονικοί σταθμοί βάσης (vBSs).



**Σχήμα 46: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης ανάλογα με τον αριθμό εικονικών σταθμών βάσης που υλοποιούμε σέ ένα φυσικό σταθμό βάσης.**

Όπως προκύπτει από τη γραφική παράσταση του Σχήματος 46, παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τον αριθμό των vBSs αυξάνεται το TCO για το δίκτυο. Επίσης παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος του TCO αποτελείται από το κεφαλαιακό κόστος, δηλαδή το κόστος εξοπλισμού και υλοποίησης των φυσικών και εικονικών σταθμών βάσης. Το λειτουργικό κόστος κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα από 15.000 € για ένα vBS ανά φυσικό σταθμό βάσης μέχρι 30.000 € για έξι vBSs. Αναμέναμε το λειτουργικό κόστος να είναι αισθητά μικρότερο λόγω του γεγονότος ότι έχουμε χρησιμοποιήσει τεχνολογία διαμοιρασμού των διαθέσιμων κεραιών μεταξύ

των διαφορετικών παρόχων εξοικονομώντας έτσι σε ενέργεια και λειτουργικό κόστος.

Στη συνέχεια με βάση το παραπάνω πείραμα και τις σχέσεις που αναπτύξαμε στο οικονομικό μοντέλο του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, θα κάνουμε μια υπόθεση εργασίας και θα υπολογίσουμε το κέρδος που θα έχουμε σε κεφαλαιακό κόστος σε περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε την προτεινόμενη υλοποίηση.

Υποθέτουμε ότι θέλουμε να στήσουμε ένα δίκτυο με 100 σταθμούς βάσης με τον παραδοσιακό τρόπο, δηλαδή χωρίς να υλοποιήσουμε εικονικούς σταθμούς βάσης. Αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (1) από το Κεφάλαιο 4 προκειμένου να υπολογίσουμε το κεφαλαιακό κόστος ενός παραδοσιακού δικτύου RAN και στη συνέχεια τη σχέση (5) όπως και προηγουμένως για να υπολογίσουμε το συνολικό CAPEX (RAN και vEPC). Αφού εκτελέσουμε τις πράξεις προκύπτει ότι το συνολικό CAPEX για ένα παραδοσιακό δίκτυο 100 σταθμών βάσης θα ισούται με 2.075.148 €.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική η αντίστοιχη τιμή για 100 σταθμούς βάσης δίνεται όταν υλοποιούμε 1 vBS σε κάθε φυσικό σταθμό βάσης επειδή στην αρχική υπόθεση του πρώτου πειράματος έχουμε θέσει αριθμό φυσικών σταθμών βάσης στην τιμή 50. Επομένως έχουμε τους αντίστοιχους 100 σταθμούς βάσης, 50 φυσικούς και 50 εικονικούς σταθμούς βάσης (vBS). Όπως προέκυψε από την παραπάνω γραφική παράσταση το αντίστοιχο κεφαλαιακό κόστος CAPEX στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι 1.045.348 €, δηλαδή πετυχαίνουμε μείωση του κεφαλαιακού κόστους κατά 49%. Σε αντίστοιχη μελέτη που παραθέσαμε στο Κεφάλαιο 5 και αφορούσε την εισαγωγή της τεχνολογίας SDN στο δίκτυο πετύχαινε μείωση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX κατά 44% (Σχήμα 43).

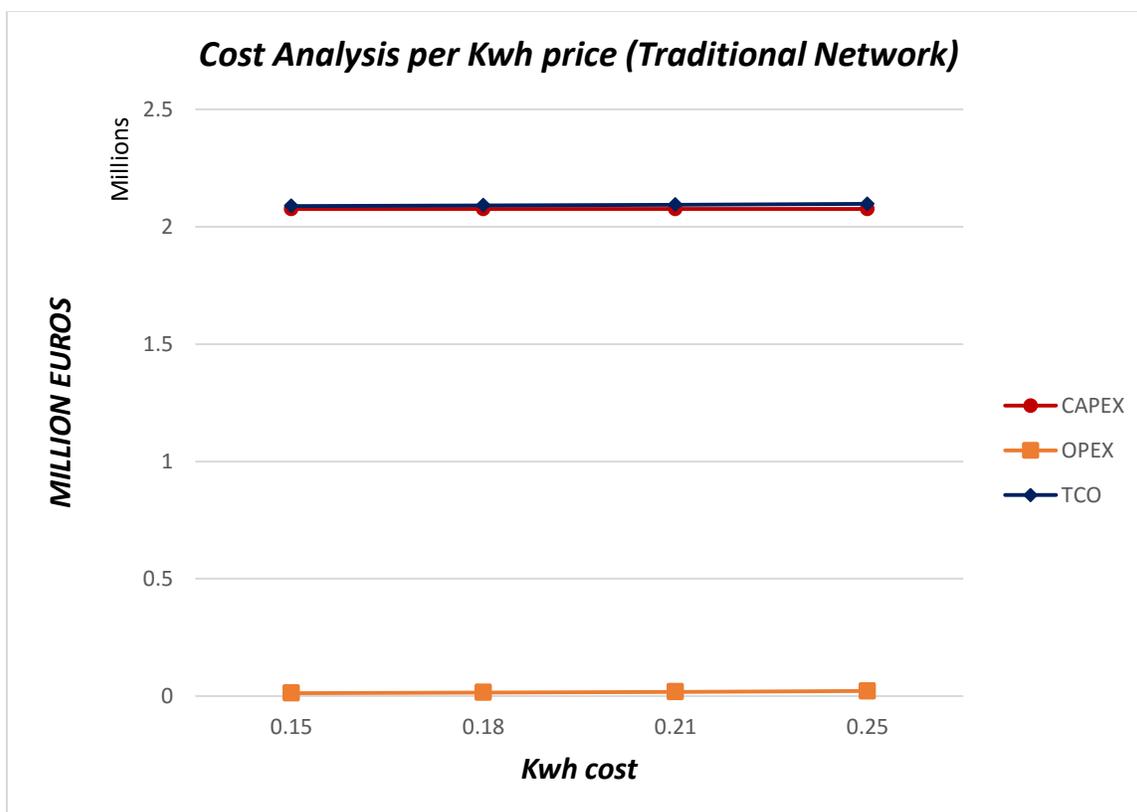
### *6.2.2 2<sup>ο</sup> Πείραμα: Ανάλυση Κόστους για Μεταβαλλόμενη Τιμή Κιλοβατώρας*

Στο επόμενο πείραμα θα πραγματοποιήσουμε την ίδια υπόθεση εργασίας που περιεγράφηκε πιο πάνω, αλλά αυτή τη φορά θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται τα οικονομικά μεγέθη του δικτύου, όταν μεταβάλλουμε την τιμή της κιλοβατώρας. Όπως και προηγουμένως, όσο αφορά την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, για τον υπολογισμό του κεφαλαιακού κόστους CAPEX εφαρμόζουμε τους αντίστοιχους τύπους από το Κεφάλαιο 4 για τον υπολογισμό του κεφαλαιακού κόστους τόσο για το RAN όσο και για το vEPC, δηλαδή τις σχέσεις (2) και (5). Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους OPEX χρησιμοποιούμε τις σχέσεις (4) και (6), ενώ αφού έχουμε υπολογίσει τα CAPEX και OPEX θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (7) προκειμένου να υπολογίσουμε το Total Cost of Ownership.

Για το παραδοσιακό δίκτυο, θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (1) από το Κεφάλαιο 4 προκειμένου να υπολογίσουμε το κεφαλαιακό κόστος ενός παραδοσιακού δικτύου RAN και στη συνέχεια τη σχέση (5) όπως και προηγουμένως για να υπολογίσουμε το συνολικό CAPEX (RAN και vEPC). Για το λειτουργικό κόστος OPEX θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (3) και (4) του τεχνοοικονομικού μοντέλου. Τέλος, θα

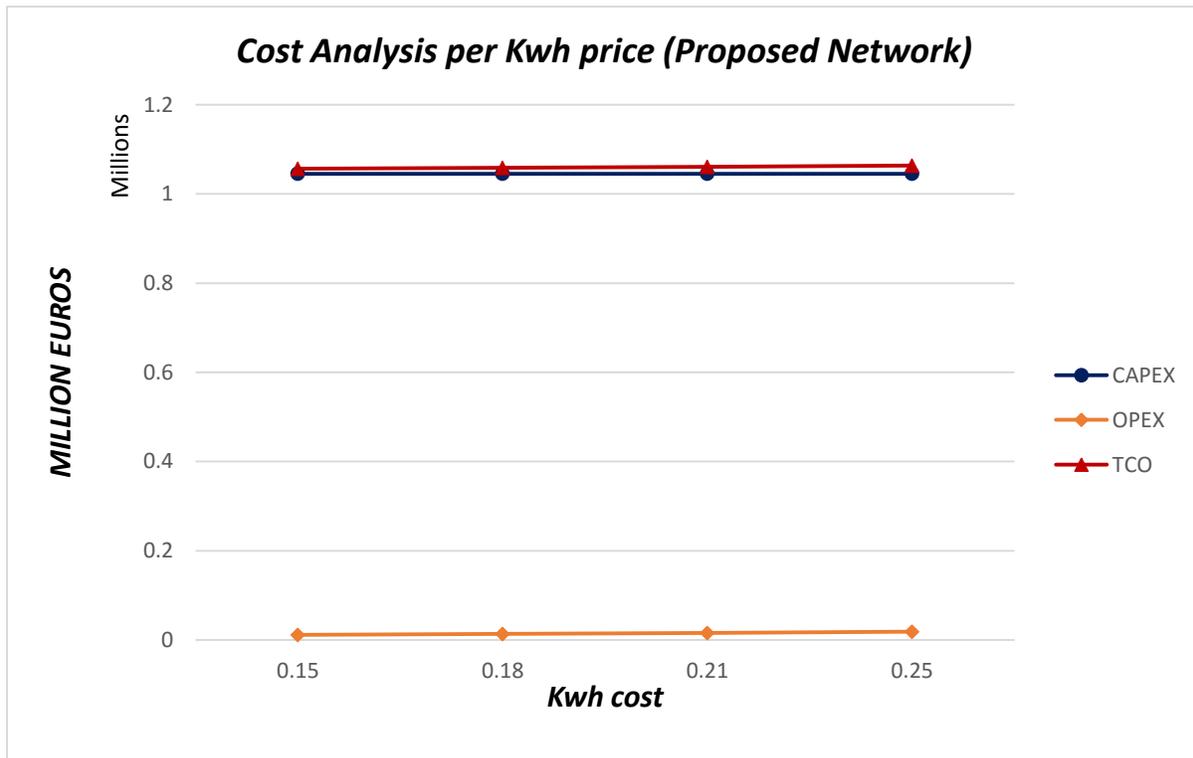
χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (7) προκειμένου να υπολογίσουμε το Total Cost of Ownership. Εφαρμόζοντας τις τιμές που επιλέξαμε για την υπόθεση εργασίας στις σχέσεις που αναφέρθηκαν, προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.

Το Σχήμα 47, απεικονίζει το CAPEX, OPEX και TCO συναρτήσε της τιμής κόστους της κιλοβατώρας, όταν υλοποιούμε το δίκτυο με τον παραδοσιακό τρόπο, δηλαδή χωρίς τη χρήση εικονικών σταθμών βάσης. Παρατηρούμε, όπως αναμέναμε, ότι το μεγαλύτερο μέρος του TCO αποτελείται από το CAPEX ενώ το λειτουργικό κόστος κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα από 12.000 € μέχρι 22.000 €.



**Σχήμα 47: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για ένα παραδοσιακό δίκτυο ανάλογα με την τιμή κόστους της κιλοβατώρας.**

Στη γραφική παράσταση του Σχήματος 48 απεικονίζονται τα CAPEX, OPEX και TCO συναρτήσε της τιμής κόστους της κιλοβατώρας, όταν υλοποιούμε το δίκτυο με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, δηλαδή με τη χρήση εικονικών σταθμών βάσης. Παρατηρούμε, όπως αναμέναμε, ότι το μεγαλύτερο μέρος του TCO αποτελείται από το CAPEX ενώ το λειτουργικό κόστος κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα από 10.000 € μέχρι 18.000 €. Η τιμή της κιλοβατώρας έχει σημαντική επίπτωση τόσο στο λειτουργικό κόστος του Radio Access Network όσο και στο λειτουργικό κόστος του vEPC, εφόσον όλες οι οντότητες του δικτύου κορμού υλοποιούνται σε servers υπό μορφή software.

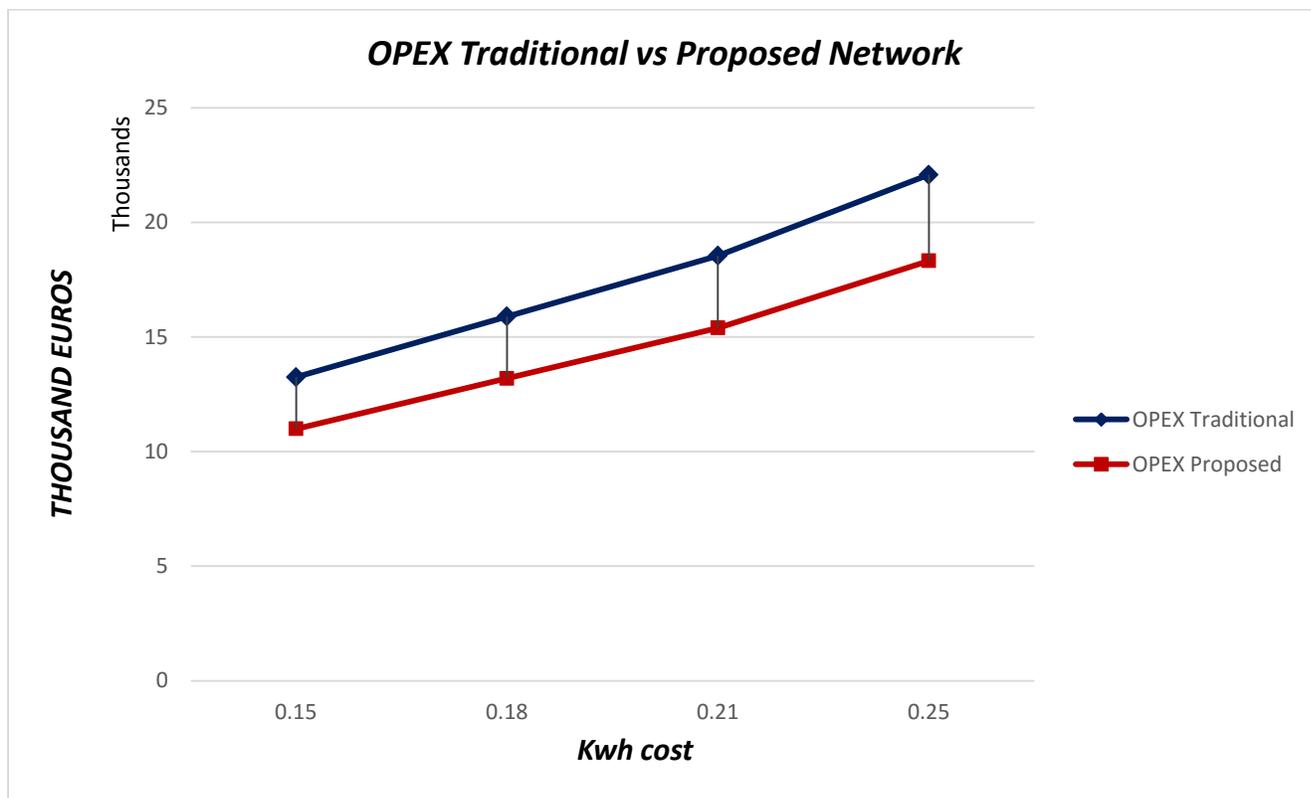


**Σχήμα 48: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ανάλογα με την τιμή κόστους της κιλοβατώρας.**

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η τιμή της κιλοβατώρας, δεν επηρεάζει το κεφαλαιακό κόστος του δικτύου, αφού ούτε η αγορά του εξοπλισμού ούτε η εγκατάσταση και η ενοικίαση του χώρου που θα υλοποιηθεί το cell εξαρτάται από την τιμή της κιλοβατώρας. Για το λόγο αυτό, στο συγκεκριμένο πείραμα θα ασχοληθούμε με τη σύγκριση του λειτουργικού κόστους OPEX, στην περίπτωση που υλοποιούμε το δίκτυο με τον παραδοσιακό τρόπο και στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

Έτσι λοιπόν, όπως φαίνεται και την επόμενη γραφική παράσταση του Σχήματος 49 το λειτουργικό κόστος για το παραδοσιακό δίκτυο είναι αισθητά μεγαλύτερο από το λειτουργικό κόστος, όταν χρησιμοποιούμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Παρατηρώντας τις τιμές της επόμενης γραφικής παράστασης και κάνοντας τη σύγκριση μεταξύ των δύο υλοποιήσεων, παρατηρούμε ότι με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική πετυχαίνουμε μείωση του λειτουργικού κόστους OPEX κατά 17%. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι υλοποιώντας το δίκτυο με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική και ενσωματώνοντας τις τεχνολογίες αιχμής που αναφέραμε στα

προηγούμενα κεφάλαια, επιτυγχάνουμε τη μείωση του OPEX όπως φαίνεται και στην παρακάτω γραφική παράσταση.



**Σχήμα 49: Σύγκριση του λειτουργικού κόστους OPEX για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση.**

### 6.2.3 3<sup>ο</sup> Πείραμα: Ανάλυση Κόστους για Μεταβαλλόμενο Αριθμό Σταθμών Βάσης

Τέλος θα πραγματοποιήσουμε ένα ακόμη πείραμα, στο οποίο θα επιχειρήσουμε να συγκρίνουμε για μία υπόθεση εργασίας, όλα τα οικονομικά μεγέθη για την υλοποίηση και τη λειτουργία ενός δικτύου. Η σύγκριση θα γίνει μεταξύ της υλοποίησης του δικτύου με χρήση της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής και της υλοποίησης όπου χρησιμοποιείται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, συναρτήσει των σταθμών βάσης που υλοποιούμε στο δίκτυο.

Υπενθυμίζουμε τις ενδεικτικές τιμές που έχουμε θέσει και οι οποίες αποτελούν τη μέση τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής.

**Πίνακας 7: Μέση Τιμή των μεταβλητών κατά την εκτέλεση του πειράματος 2**

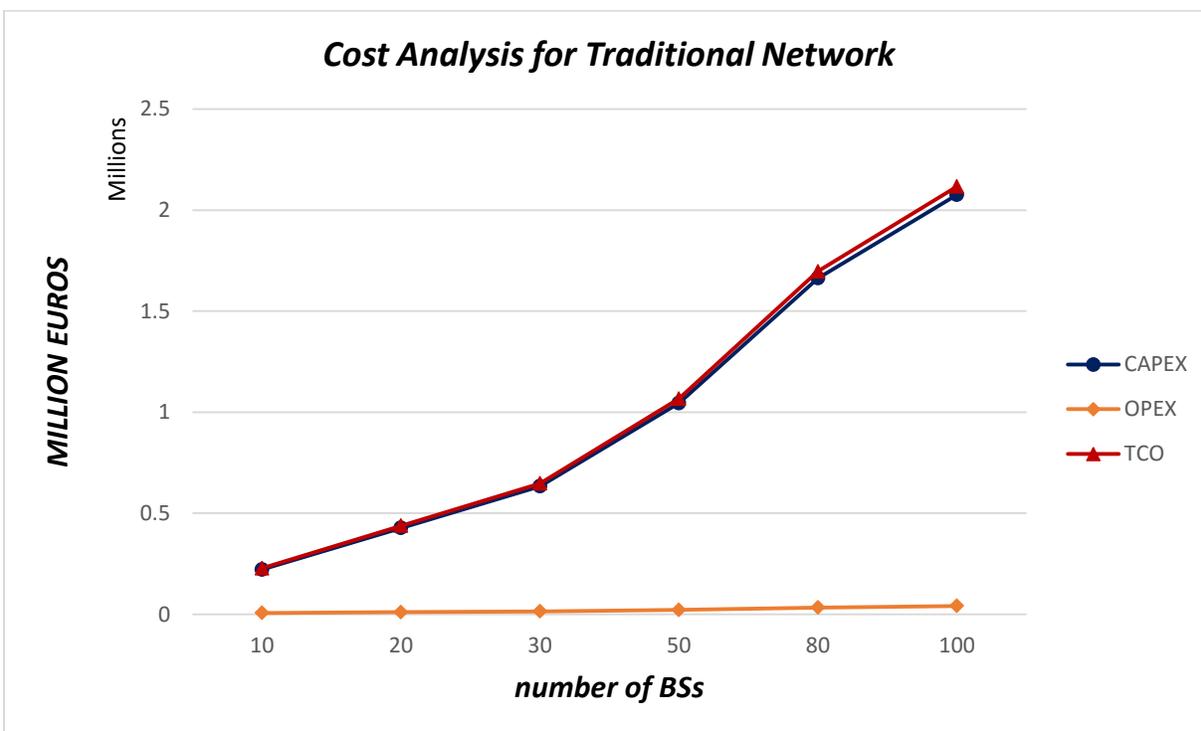
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>
<b>C<sub>place</sub></b>	10.000 €
<b>C<sub>kwh</sub></b>	0.25 €
<b>λ<sub>SBS</sub></b>	500 χρήστες

Στο πείραμα αυτό, θα μεταβάλλεται ο αριθμός των σταθμών βάσης που θα εγκαθιστούμε κάθε φορά. Στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική, θα εξετάσουμε τις περιπτώσεις όπου εγκαθιστούμε 10, 20, 30, 50, 80 και 100 φυσικούς σταθμούς βάσης.

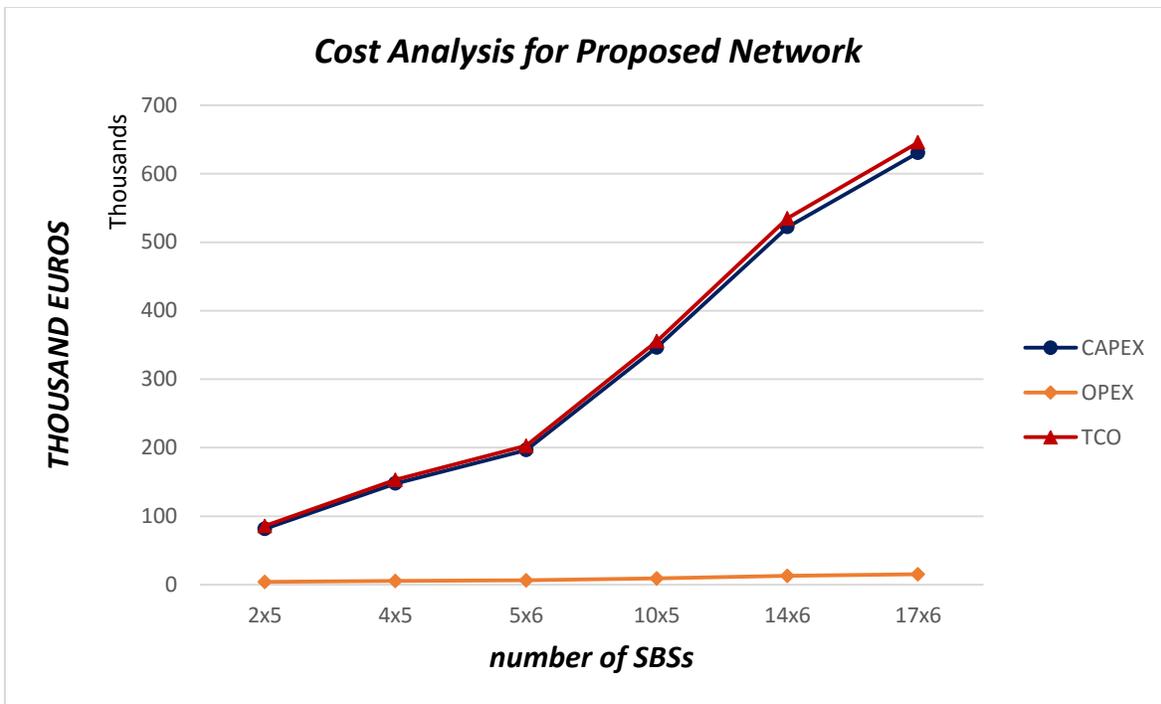
Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, θα εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι μπορούμε να υλοποιήσουμε μέχρι 6 εικονικούς σταθμούς βάσης (vBS) «πάνω» σε έναν φυσικό σταθμό βάσης (SD-BS). Πιο συγκεκριμένα, εφόσον στην πρώτη περίπτωση στην αντίστοιχη παραδοσιακή αρχιτεκτονική χρειαζόμαστε 10 σταθμούς βάσης, στην αρχιτεκτονική μας θα εκμεταλλευτούμε την ιδιότητα των εικονικών σταθμών βάσης και θα εγκαταστήσουμε 2 φυσικούς σταθμούς βάσης, όπου στον καθένα θα υλοποιήσουμε 5 εικονικούς σταθμούς βάσης ( $2 \cdot 5 = 10$ ). Θα συμβολίσουμε την περιγραφόμενη υλοποίηση  $2 \times 5$  όπου το 2 συμβολίζει τον αριθμό των φυσικών σταθμών βάσης που έχουμε εγκαταστήσει, ενώ το 5 θα συμβολίζει τον αριθμό των εικονικών σταθμών βάσης που έχουμε υλοποιήσει «πάνω» σε κάθε ένα φυσικό σταθμό βάσης. Από εδώ και στο εξής, θα ακολουθείται αυτός ο συμβολισμός που περιγράψαμε πιο πάνω όπου ο αριθμός πριν το «x» αναφέρεται στους φυσικούς σταθμούς βάσης, ενώ ο αριθμός μετά από αυτό αναφέρεται στους εικονικούς σταθμούς που έχουμε υλοποιήσει σε κάθε έναν από αυτούς.

Με βάση λοιπόν την υπόθεση εργασίας που περιγράψαμε, εφαρμόζουμε τις τιμές των μεταβλητών στις αντίστοιχες σχέσεις που χρησιμοποιήσαμε και πιο πάνω και τις

οποίες υλοποιήσαμε στο Κεφάλαιο 4, και έτσι πήραμε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις.



**Σχήμα 50: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για το παραδοσιακό δίκτυο ανάλογα με τον αριθμό σταθμών βάσης.**

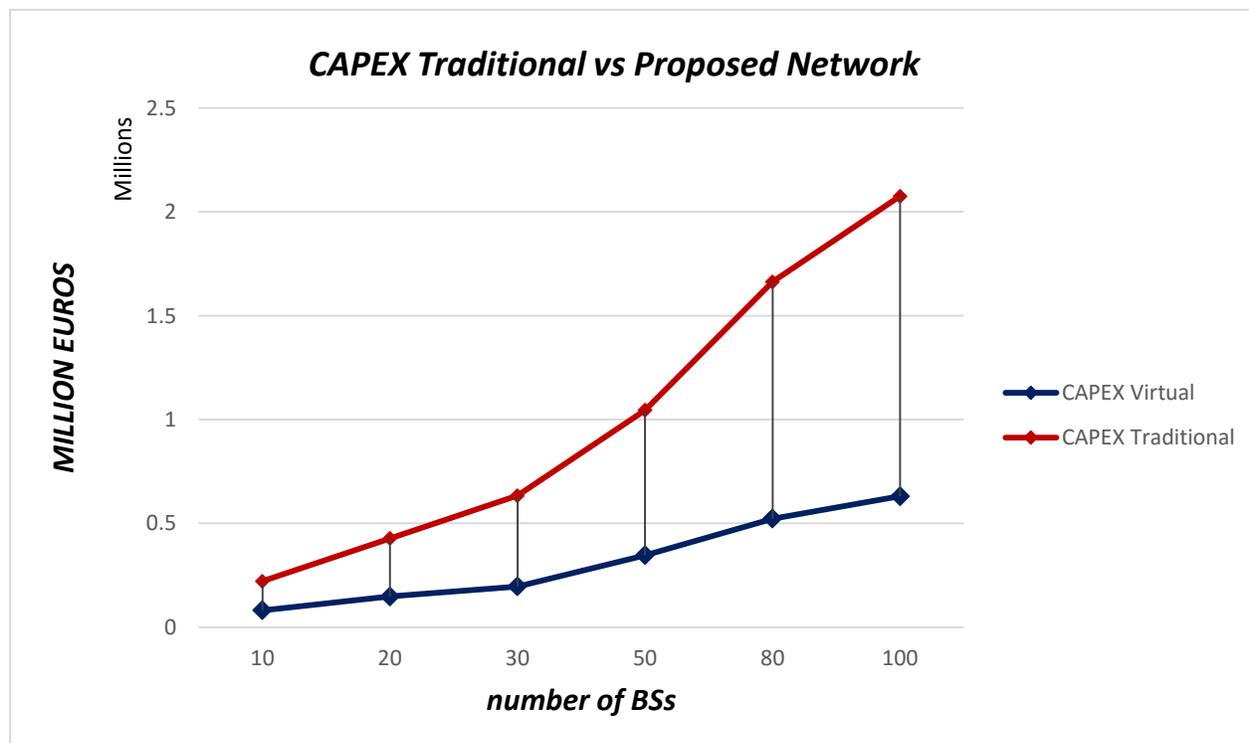


**Σχήμα 51: Οικονομική ανάλυση του κόστους υλοποίησης για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ανάλογα με τον αριθμό σταθμών βάσης.**

Όπως αναμέναμε και για την δεδομένη υπόθεση εργασίας, από τις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 50 και 51, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μέρος του Total Cost of Ownership αποτελείται από το κεφαλαιακό κόστος CAPEX, ενώ το λειτουργικό κόστος είναι αισθητά μικρότερο αφού μιλάμε για ποσά της τάξεως μερικών δεκάδων χιλιάδων ευρώ και για τις δύο υλοποιήσεις. Ακόμη, είναι ολοφάνερο ότι από τις δυο υλοποιήσεις που παραθέτουμε, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη υλοποίηση μπορούμε να πετύχουμε σημαντική μείωση τόσο του λειτουργικού, όσο και του κεφαλαιακού κόστους σε σχέση με την παραδοσιακή υλοποίηση του δικτύου.

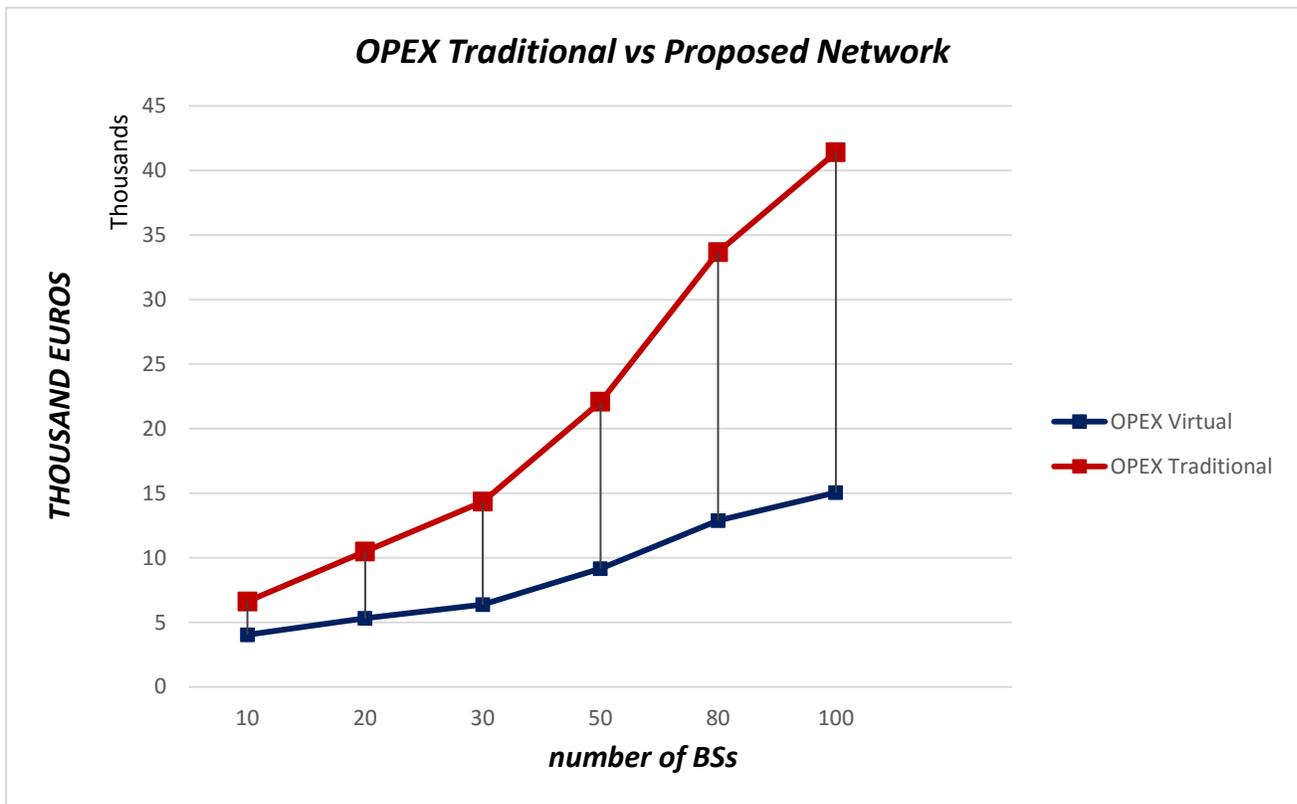
Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, με βάση το σενάριο που περιγράψαμε, συγκρίνουμε ξεχωριστά τα οικονομικά μεγέθη που προκύπτουν για κάθε υλοποίηση και υπολογίζουμε το ποσοστό της μείωσης που μας απέφερε η υιοθέτηση της δικής μας αρχιτεκτονικής και κατ' επέκταση η ενσωμάτωση των τεχνολογιών αιχμής που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Παρατηρώντας λοιπόν τη γραφική παράσταση του Σχήματος 52 η οποία αποτελεί μια σύγκριση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX για τις δύο διαφορετικές υλοποιήσεις του δικτύου, είναι εμφανές ότι η προτεινόμενη υλοποίηση στην οποία χρησιμοποιούνται και εικονικοί σταθμοί βάσης χαρακτηρίζεται από μικρότερο κεφαλαιακό κόστος. Η σημαντική αυτή μείωση που παρατηρούμε στην γραφική παράσταση, αντιστοιχεί ποσοτικά σε μείωση της τάξεως του 68%, όπως υπολογίστηκε βάση των τιμών που μας επεστράφησαν από το οικονομικό μοντέλο.



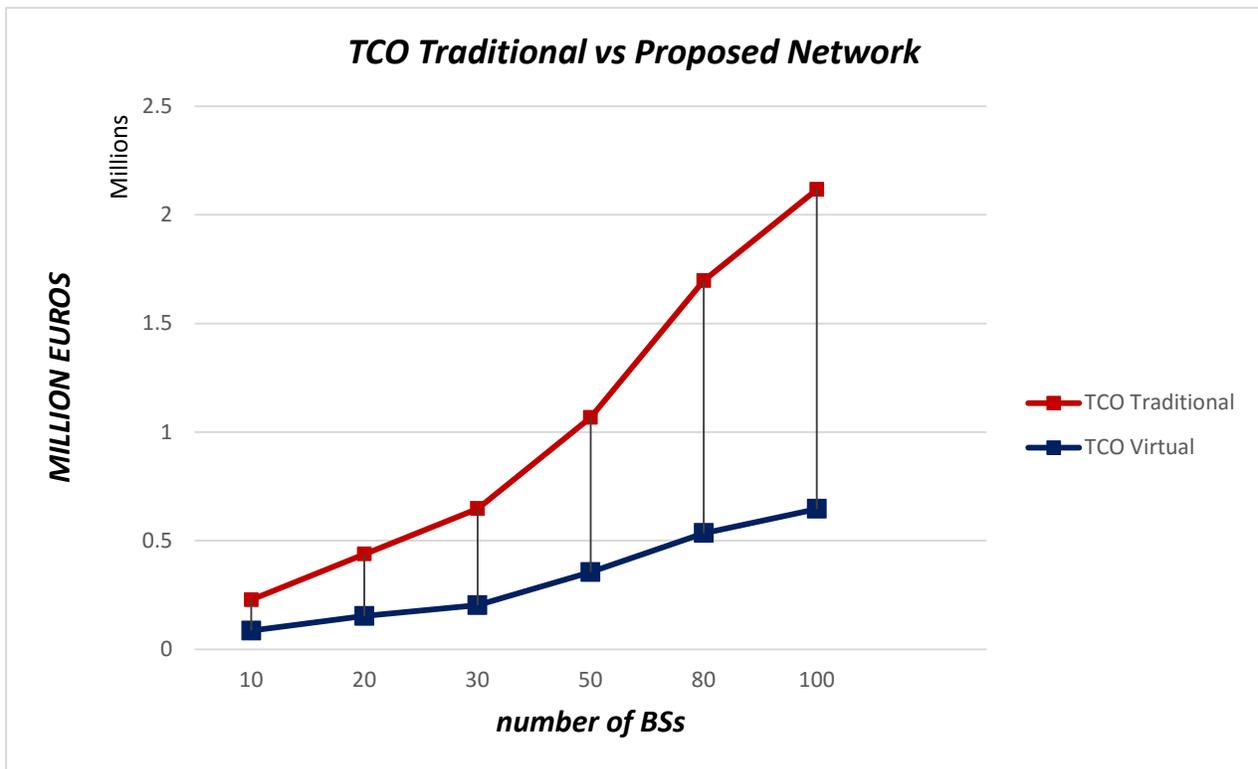
**Σχήμα 52: Σύγκριση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση**

Στη γραφική παράσταση του Σχήματος 53, απεικονίζεται η σύγκριση του λειτουργικού κόστους OPEX για τις δύο διαφορετικές υλοποιήσεις του δικτύου και είναι εμφανές ότι η προτεινόμενη υλοποίηση στην οποία χρησιμοποιούνται και εικονικοί σταθμοί βάσης χαρακτηρίζεται από μικρότερο λειτουργικό κόστος. Η σημαντική αυτή μείωση που παρατηρούμε στην γραφική παράσταση, αντιστοιχεί ποσοτικά σε μείωση της τάξεως του 63%.



**Σχήμα 53: Σύγκριση του λειτουργικού κόστους OPEX για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση**

Στην τελευταία γραφική παράσταση η οποία παρατίθεται στο Σχήμα 54, απεικονίζεται η σύγκριση του Total Cost of Ownership (TCO) για τις δύο διαφορετικές υλοποιήσεις του δικτύου και όπως ήταν αναμενόμενο η προτεινόμενη υλοποίηση χαρακτηρίζεται από μικρότερο TCO. Η σημαντική αυτή μείωση που παρατηρούμε στην γραφική παράσταση, αντιστοιχεί ποσοτικά σε μείωση της τάξεως του 69%.



**Σχήμα 54: Σύγκριση του Total Cost of Ownership για την παραδοσιακή υλοποίηση σε σχέση με την προτεινόμενη υλοποίηση**

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα που μας επεστράφησαν από τα παραπάνω πειράματα, μπορούμε να βγάλουμε κάποια πρώτα ασφαλή συμπεράσματα όσο αφορά τις τεχνολογίες αιχμής και το 5G γενικότερα, αλλά και για την αρχιτεκτονική που προτείναμε ειδικότερα.

Αρχικά, όλα τα αποτελέσματα τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά συνηγορούν στο γεγονός ότι η εισαγωγή των τεχνολογιών αιχμής όπως το SDN, το NFV, το Cloud Computing και οι Ultra Dense Deployments οδηγούν σε σημαντική μείωση τόσο του CAPEX όσο και του OPEX, γεγονός το οποίο συνεπάγεται και μείωση του TCO. Στην αρχιτεκτονική που προτείναμε αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι οι παραπάνω τεχνολογίες και οπότε αναμένουμε αντίστοιχα αποτελέσματα.

Όσο αφορά το TCO, είδαμε ότι το μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από το κεφαλαιακό κόστος σε κάθε περίπτωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι χρησιμοποιούμε το vEPC και στις δύο υλοποιήσεις προκειμένου να ωφεληθούμε από το διαμοιρασμό του λειτουργικού κόστους μεταξύ των παρόχων αλλά και από τα επιμέρους οφέλη που προσφέρει η τεχνολογία NFV για το δίκτυο κορμού.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, σε όλα τα πειράματα σημειώσαμε σημαντικά ποσοστά μείωσης του TCO, του OPEX και του CAPEX συγκρίνοντας τις δύο υλοποιήσεις, ισοφαρίζοντας και μερικές φορές ακόμα και ξεπερνώντας τις θεωρητικές προβλέψεις που παραθέσαμε στο Κεφάλαιο 5, οι οποίες αφορούν την ενσωμάτωση τεχνολογιών στην αρχιτεκτονική του δικτύου τις οποίες έχουμε ενσωματώσει και εμείς στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

## 7. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής αναλύσαμε τα χαρακτηριστικά, τις απαιτήσεις και τα ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη των cellular δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G), τα οποία θα προσφέρουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και αδιάκοπη συνδεσιμότητα. Πραγματοποιούμε μια ανασκόπηση των τεχνολογιών αιχμής οι οποίες θεωρείται ότι θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, όπως οι Ultra Dense Deployments, το NFV, το SDN και το Cloud Computing. Οι τεχνολογίες αυτές θα αποτελέσουν τη λύση για την ενοποίηση του δικτύου, την βέλτιστη διαχείριση και το δυναμικό διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων.

Οι ανάγκες του χρήστη για real-time υπηρεσίες, θα αναγκάσουν τους παρόχους υπηρεσιών να ερευνήσουν για νέους πιο ευέλικτους τρόπους να παρέχουν υπηρεσίες, έχοντας ως γνώμονα τη μείωση του CAPEX και του OPEX. Η τεχνολογία NFV θα αποτελέσει το μέσο για να αρθούν οι εξαρτήσεις μεταξύ του δικτύου και των «κλειστών» δικτυακών συσκευών, προσφέροντας έτσι στους παρόχους μεγαλύτερη ευελιξία, ευκολότερη και πιο γρήγορη αναβάθμιση του εξοπλισμού του δικτύου και μείωση του κόστους διαχείρισης. Η χρήση του Cloud Computing, γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ παρόχων και χρηστών με τη χρήση του μοντέλου κοστολόγησης “pay-per-use”. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του τομέα ICT στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς θα δημιουργήσει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για νέους παίκτες, ενώ θα ανοίξει το δρόμο για νέους τρόπους συνεργασίας αλλά και ανταγωνισμού μεταξύ των διαφορετικών παρόχων. Ο ανταγωνισμός πλέον θα μεταφερθεί στο επίπεδο του software, ενώ το hardware θα πάψει να αποτελεί την κύρια αιτία διαφοροποίησης μεταξύ των παρόχων.

Στη διπλωματική αυτή, προτείναμε μια αρχιτεκτονική για το δίκτυο 5G, η οποία όπως είπαμε ενσωματώνει όλες τις παραπάνω τεχνολογίες αιχμής. Με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική αποφεύγουμε τα μειονεκτήματα της κεντροποιημένης επεξεργασίας των σημάτων βασικής ζώνης, συνδυάζοντας τόσο κεντροποιημένες όσο και μη-κεντροποιημένες στρατηγικές στο διαμοιρασμό των πόρων ραδιοπρόσβασης και χρησιμοποιώντας virtual σταθμούς βάσης (vBS). Επιπλέον, προσφέρεται η δυνατότητα για εγκαθίδρυση real-time υπηρεσιών cloud.

Στο Κεφάλαιο 4 υπάρχουν σημαντικές εξισώσεις, στις οποίες εφαρμόζοντας τις τιμές για τις παραμέτρους και για τις μεταβλητές, που υπάρχουν στο Κεφάλαιο 6 προκύπτουν τα πειραματικά αποτελέσματα για τα διάφορα κόστη CAPEX, OPEX και TCO, που φαίνονται παραπάνω. Η εξοικονόμηση που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία SDN και το πρωτόκολλο OpenFlow, σε ότι αφορά το κεφαλαιακό κόστος (CAPEX) είναι πολύπλευρη. Αρχικά παρατηρείται μείωση του CAPEX λόγω της χρησιμοποίησης απλούστερων –άρα και φθηνότερων- δικτυακών συσκευών. Παρά το κόστος που προκύπτει από την αγορά επιπλέον εξοπλισμού όπως OpenFlow-controllers, η ποσοτική ανάλυση δείχνει ότι η εξοικονόμηση από τη χρήση του SDN, υπερκαλύπτει το κόστος του επιπλέον εξοπλισμού. Επομένως συμπεραίνουμε ότι η χρήση της τεχνολογίας SDN μπορεί να συμβάλλει δραστικά στη μείωση του κεφαλαιακού κόστους.

Η χρήση των virtual Base Stations, θα μας αποφέρει σημαντική μείωση του κόστους εξοπλισμού για το Radio Access Network ενώ παράλληλα το κέρδος αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των vBSs που υλοποιούμε «πάνω» σε έναν SD-BS.

Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί μεγάλο μέρος του OPEX για τα cellular δίκτυα. Με τη χρήση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, παρατηρούμε σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους τόσο λόγω της χρήσης vBSs οι οποίοι καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια αλλά και επειδή επιτρέπουμε την κοινή χρήση των διαθέσιμων κεραιών κάθε σταθμού βάσης, από διαφορετικούς παρόχους. Επιπροσθέτως, η χρήση της τεχνολογίας Virtualization και η υλοποίηση των λειτουργιών του δικτύου σε Data Centers υποκινεί την ανάπτυξη των πράσινων τεχνολογιών τροφοδοτώντας αυτά τα Data Centers με εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως αιολική ενέργεια, φωτοβολταϊκά κ.α.

Στο Κεφάλαιο 6, εφαρμόζοντας τις τιμές για τις παραμέτρους και για τις μεταβλητές, και αξιοποιώντας τις σχέσεις που υλοποιήσαμε στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιούνται τα πειράματα για διάφορες υποθέσεις εργασίας, προκειμένου να εκτιμήσουμε τη μεταβολή των οικονομικών μεγεθών που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Παρατηρώντας λοιπόν τις γραφικές απεικονίσεις στο Κεφάλαιο 6, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για το κόστος υλοποίησης συναρτήσεως διαφόρων παραγόντων, αλλά και για την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών συνολικά.

Η εισαγωγή των τεχνολογιών αιχμής όπως το SDN, το NFV, το Cloud Computing και οι Ultra Dense Deployments οδηγούν σε σημαντική μείωση τόσο του CAPEX όσο και του OPEX, γεγονός το οποίο συνεπάγεται και μείωση του TCO. Επιπλέον, στη σύγκριση που πραγματοποιήσαμε μεταξύ μιας παραδοσιακής αρχιτεκτονικής και της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής η οποία ενσωματώνει όλες αυτές τις τεχνολογίες καταφέραμε να ισοφαρίσουμε ή και να ξεπεράσουμε τις θεωρητικές προβλέψεις μείωσης του κόστους που θα απέφερε η ενσωμάτωση των παραπάνω τεχνολογιών.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα μας και συνηγορούν στην χρήση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σε σχέση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική είναι:

- Μείωση του λειτουργικού κόστους OPEX κατά 63%
- Μείωση του κεφαλαιακού κόστους CAPEX από 44% έως 68%.
- Μείωση του TCO κατά 69%, όπως αυτό προέκυψε από το τρίτο πείραμα που πραγματοποιήσαμε.

Συμπερασματικά λοιπόν, από τα παραπάνω ευρήματα είναι δυνατό να καταλήξει κανείς σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα, που αναμένεται να ενισχύσουν τη θέση των προαναφερθέντων τεχνολογιών και να ωθήσουν τους ενδιαφερόμενους να στραφούν στην ενσωμάτωση τους στην αρχιτεκτονική των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς.

## 8. Μελλοντική Έρευνα

Είναι σημαντικό στο μέλλον να σημειωθούν προσπάθειες για ερευνητική δραστηριότητα στη συγκεκριμένη τεχνολογία, χρησιμοποιώντας κάθε ιδιότητα και συμπληρώνοντας την υπάρχουσα έρευνα. Υπάρχουν αρκετά ζητήματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνας προκειμένου να γίνει πραγματικότητα η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, αλλά και η τεχνολογία 5G εν γένει.

Αρχικά, ένα ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί είναι ο τρόπος με τον οποίο τα υπάρχοντα δίκτυα θα επικοινωνούν και θα συνεργάζονται με τις νέες τεχνολογίες του δικτύου. Μια ιδέα είναι η μεταφορά του υπάρχοντος δικτύου κορμού και του RAN σε ξεχωριστές πλατφόρμες Cloud [93], κατά τη φάση υλοποίησης του δικτύου 5G. Προκειμένου να αποφύγουμε τη υλοποίηση παράλληλων δικτύων, δημιουργείται η ανάγκη υλοποίησης διεργασιών και πρωτοκόλλων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επικοινωνία και η διαλειτουργικότητα των προϋπάρχοντων δικτύων με τη νέα αρχιτεκτονική του δικτύου.

Επιπλέον, όπως είπαμε η κεντροποίηση και ο διαμοιρασμός των διαθέσιμων πόρων του δικτύου θα οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση του και μείωση του κόστους, ωστόσο ελλοχεύει ο κίνδυνος να δημιουργηθούν bottlenecks, μεγαλύτερο latency και σημεία κατάρρευσης ολόκληρου του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, η μη-κεντροποίηση των δικτυακών πόρων προσφέρει καλύτερη απόδοση και μικρότερο latency, αλλά εξανεμίζονται τα οικονομικά οφέλη που προσφέρονται από την κεντροποίηση των πόρων και επιπλέον, γίνεται απαραίτητη η δημιουργία πολλών Data Centers σε διαφορετικές περιοχές, αυξάνοντας έτσι κατακόρυφα το λειτουργικό κόστος. Η εύρεση της χρυσής τομής μεταξύ των δύο περιπτώσεων που αναφέραμε είναι ζωτικής σημασίας.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, τα HetNets θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση των ετερογενών δικτύων, είναι οι παρεμβολές μεταξύ των κοντινών cells. Το πρόβλημα αυτό ενισχύεται ακόμα περισσότερο από την χωρίς σχεδιασμό εγκατάσταση Small Cells στο δίκτυο. Επιπλέον, η ταυτόχρονη λειτουργία των Small Cells και των Macrocells δημιουργεί ακανόνιστου μεγέθους και σχήματος cells, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για δημιουργία μηχανισμού ελέγχου της ισχύος και του διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων, προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές μεταξύ των cells [94].

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η τεχνολογία του Software Defined Networking θα διαδραματίσει πολύ σημαντικό ρόλο στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας SDN προκειμένου να μπορέσει να ενσωματωθεί και να είναι λειτουργική σε επίπεδο υποδομής δικτύου. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει ακόμα ομοφωνία στο ποιος είναι ο βέλτιστος τρόπος για να υλοποιηθεί ένα προγραμματιζόμενο switch (π.χ. σε απόδοση, ευελιξία κ.α.). Επιπλέον, υπάρχει η ανάγκη για τη δημιουργία ενιαίας προγραμματιζόμενης διεπαφής για την υλοποίηση SDN cellular υποδομών. Τέλος, ζητήματα ασφάλειας στην τεχνολογία SDN συνεχίζουν να αποτελούν ανοιχτό πρόβλημα.

Όσο αφορά την τεχνολογία Network Virtualization, ένα NFV framework απαιτεί την αποδοτική χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων και την πλήρη απομόνωση των Virtual Networks προκειμένου να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την κατανομή και το διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων πρέπει να σχεδιάζονται με γνώμονα τις ετερογενείς υποδομές, τις απαιτήσεις των Network Operators, κάποια κριτήρια δίκαιου διαμοιρασμού κ.α. Γενικότερα, τα ζητήματα που σχετίζονται με τον αποδοτικό διαμοιρασμό των πόρων, την απομόνωση των Virtual Networks, το μοντέλο κοστολόγησης και την απομακρυσμένη διαχείριση χρήζουν περαιτέρω έρευνας [95].

Ακόμη είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένα καινοτόμο και βιώσιμο επιχειρηματικό μοντέλο για να υποστηρίξει το διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων και τη συνύπαρξη διαφορετικών παρόχων στο ίδιο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί πώς τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα θα χειρίζονται τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους διαφορετικούς παρόχους που εκμεταλλεύονται το δίκτυο και το διαμοιρασμό των φυσικών και εικονικών υποδομών, μειώνοντας παράλληλα το κεφαλαιακό και λειτουργικό κόστος (CAPEX/OPEX) [96].

Τέλος, τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς θα υποστηρίζουν M2M (Machine to Machine) Communication. Ένας μεγάλος αριθμός M2M συσκευών σε ένα cell μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα σε ότι αφορά την κυκλοφοριακή συμφόρηση και την υπερφόρτωση του RAN. Επί του παρόντος, έχουν γίνει αρκετές προτάσεις προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υπερφόρτωσης του RAN (π.χ. M2M prioritization, back-off adjustment κ.α.), ωστόσο κάθε μια από αυτές τις μεθόδους διαθέτει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και καμία από αυτές δεν έχει αναγνωριστεί ως η καλύτερη λύση [94].

## Βιβλιογραφία

1. <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
2. S. Parkvall, A. Furuskar, and E. Dahlman. Evolution of LTE toward IMT-Advanced. IEEE Communications Magazine (Volume:49, Issue: 2), 2011.
3. A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas. LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology. IEEE Wireless Communications (Volume:17, Issue: 3), pages 10-22, June 2010.
4. Χρήστος Ι. Μπούρας, Πανεπιστημιακές σημειώσεις , μάθημα: Ευρυζωνικές Τεχνολογίες, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.
5. J. Hoadley, and P. Maveddat. Enabling Small Cell Deployment with HetNet. IEEE Wireless Communications (Volume:19, Issue:2), pages 4-5, April 2012.
6. T. Mersch. Radisys White Paper. LTE Femtocell from Concept to Reality, September 2011. <http://go.radisys.com/rs/radisys/images/paper-femto-lte-roadmap.pdf>
7. H. Claussen, Alcatel-Lucent. Future Cellular Networks. April 2012 [http://www.ict-befemto.eu/fileadmin/documents/publications/WCNC\\_2012\\_Workshop\\_Paris/Claussen - Future Cellular Networks - WCNC12 HetNet Keynote.pdf](http://www.ict-befemto.eu/fileadmin/documents/publications/WCNC_2012_Workshop_Paris/Claussen - Future Cellular Networks - WCNC12 HetNet Keynote.pdf)
8. M. Karimzadeh, L. Valtulina, and G. Karagiannis. Applying SDN/OpenFlow in Virtualized LTE to support Distributed Mobility Management (DMM). 4th International Conference on Cloud Computing and Services Science, April 2014.
9. Ericsson White Paper, More than 50 billion Connected Devices, February 2011. [http://www.akosrs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna\\_agenda/Internetni\\_protokol\\_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf](http://www.akosrs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf)
10. 5GPPP. 5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services. February 2015. <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf>
11. GSMA Intelligence. Understanding 5G: Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile, December 2014. <https://gsmaintelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download>
12. N. Panwar, S. Sharma, and A.K. Singh. A Survey on 5G: The Next Generation of Mobile Communication. Special Issue on Radio Access Network Architectures and Resource Management for 5G, Elsevier Physical Communication. November 6,2015.
13. F. Boccardi, R. W. Heath Jr, A. Lozano, T. L. Marzetta, P. Popovski. Five Disruptive Technology Directions for 5G. IEEE Communications Magazine, February 2014.

14. X. Zhou, Z. Zhao, R. Li, Y. Zhou, T. Chen, Z. Niu, and H. Zhang. Toward 5G: When explosive Bursts Meet Soft Cloud. IEEE Network (Impact Factor: 2.54) 28(6):12-17, November 2014.
15. D. Soldani, and A. Manzalini. A 5G Infrastructure for "Anything-as-a-Service". Journal of Telecommunications System & Management, January 2014.
16. I. Giannoulakis, E. Kafetzakis, G. Xylouris, G. Gardikis, and A. Kourtis. On the Applications of Efficient NFV Management Towards 5G Networking. IEEE 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), 2014 1st International Conference on, 2014.
17. D. Sabella, A. De Domenico, E. Katranaras, M. Ali Imran, M. Di Girolamo, U. Salim, M. Lalam, K. Samdanis, and A. Maeder. Energy Efficiency Benefits of RAN-as-a-Service Concept for a Cloud-Based 5G Mobile Network Infrastructure. IEEE Access (Volume:2), December 2014.
18. N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, S. Geirhofer. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. IEEE Communications Magazine (Volume:52, Issue:2), February 2014.
19. P. Kela, J. Turkka, M. Costa. Borderless Mobility in 5G Outdoor Ultra-Dense Networks. IEEE Access (Volume:3), August 2015.
20. F. Richter, A. Fehske, and G. P. Fettweis. Energy Efficiency Aspects of Base Station Deployment Strategies for Cellular Networks. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70<sup>th</sup>.
21. R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi and D. Soldani. SDN-based 5G mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies Special Issue. Enabling 5G: energy and spectrally efficient communication systems. Volume 26, Issue 1, pages 82–92, January 2015.
22. Huawei White Paper. 5G: A Technology Vision ,2013. <http://www.huawei.com/5gwhitepaper/>
23. NGMN Alliance, NGMN 5G White Paper, February 17, 2015.
24. Samsung White Paper. 5G Vision, February 2015. <http://www.samsung.com/global/business-images/insights/2015/Samsung-5G-Vision-0.pdf>
25. V. Jungnickel, C. Bock, J. Ferrer, D. Levi, V. Marques, T. Mendes, M. Parker. Software-defined Architecture for 5G Front- and Backhaul over Heterogeneous Access Networks. Workshop on Radio Access and Spectrum Innovations for 5G, Athens 17 March 2014.
26. N. M. Mosharaf Kabir Chowdhury, and Raouf Boutaba. Network Virtualization: State of the art and research challenges. IEEE Communications Magazine, August 2009.

27. A. Azcorra, and U. Carlos. NetWorld 2020 ETP, Network and Service Virtualization White Paper, 2014.
28. D. Trossen, and D. Soldani. NetWorld 2020 ETP, What is 5G (Really) About? White Paper, 2014.
29. E. Calvanese Strinati. NetWorld 2020 ETP, Next Generation of Wireless Networks White Paper, 2014.
30. A. Osseiran, F. Boccardi, V. Vraun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren. Scenarios for the 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. IEEE Communications Magazine (Volume:52, Issue: 5), Pages 26-35, May 2014.
31. O. Sefraoui, M. Aissaoui, and M. Eleuldj. OpenStack: Toward an Open-source Solution for Cloud Computing. International Journal of Computer Applications 55(3):38-42, October 2012
32. H. Wang, Q. Jing, R. Chen, B. He, Z. Qian, and L. Zhou. Distributed Systems Meet Economics: Pricing in the Cloud. Microsoft Research Asia, June 2010.
33. A. Dawson, M K. Marina, and F. J. Garcia. On the Benefits of RAN Virtualization in C-RAN Based Mobile Networks. EWSDN '14 Proceedings of the 2014 Third European Workshop on Software Defined Networks, Pages 103-108 ,2014.
34. C. Weinhardt, A. Anandasivam, B. Blau, N. Borissov, T. Meinl, W. Michalk, J. Stöber. Cloud Computing – A Classification, Business Models, and Research Directions. Business & Information Systems Engineering 1(5): 391-399, 2009.
35. J. DiGiglio, D. Ricci. High Performance, Open Standard Virtualization with NFV and SDN. [http://www.windriver.com/whitepapers/ovp/ovp\\_whitepaper.pdf](http://www.windriver.com/whitepapers/ovp/ovp_whitepaper.pdf)
36. Y. Chien, and R. Sion. To Cloud or Not to Cloud? Musings On Costs and Viability. SOCC '11 Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Cloud Computing, Article No. 29 ,2011.
37. J. Markendahl, and O. Makitalo. A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium.
38. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
39. [https://en.wikipedia.org/wiki/Hata\\_model\\_for\\_urban\\_areas](https://en.wikipedia.org/wiki/Hata_model_for_urban_areas)
40. Rui. L. Aguiar. NetWorld 2020 ETP, Mobility/Connectivity and Networking Layer White Paper, 2014
41. <http://www.3gpp.org/hetnet>
42. [https://blogs.oracle.com/cloud/entry/what\\_s\\_driving\\_the\\_cloud](https://blogs.oracle.com/cloud/entry/what_s_driving_the_cloud)

43. [http://www.zte.com.cn/endata/magazine/zte technologies/2015/no2/articles/201503/t20150324\\_432510.html](http://www.zte.com.cn/endata/magazine/zte technologies/2015/no2/articles/201503/t20150324_432510.html)
44. V. Shrivastava, P. Zerfos, Kang-won Lee, H. Jamjoom, Yew-Huey Liu, and S. Banerjee. Application-aware virtual machine migration in data centers. INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE
45. A. Pahlevan, P. Del Valle, D. Atienza. Exploiting CPU-Load and Data Correlations in Multi-Objective VM Placement for Geo-Distributed Data Centers. 2015
46. T. Das, M. Caria, A. Jukan, M. Hoffmann. A Techno-economic Analysis of Network Migration to Software-Defined Networking. Submitted to ICC 2014
47. B. Naudts, M. Kind, F. Westphal, S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavet. Techno-economic Analysis of Software Defined Networking as Architecture for the Virtualization of a Mobile Network. 2013 Second European Workshop on Software Defined Networks
48. ACG Research. Total Cost of Ownership Study, Virtualizing the Mobile Core [http://www.affirmednetworks.com/wp-content/uploads/2015/07/TCO-Report\\_7.13.15\\_ACG-Template.pdf](http://www.affirmednetworks.com/wp-content/uploads/2015/07/TCO-Report_7.13.15_ACG-Template.pdf)
49. Arthur D. Little. Reshaping the future with SDN and NFV. Bell Labs, May 2015 [http://sdn.ieee.org/images/files/pdf/adl\\_belllabs\\_2015\\_reshapethefuture.pdf](http://sdn.ieee.org/images/files/pdf/adl_belllabs_2015_reshapethefuture.pdf)
50. J. Liu, T. Zhao, S. Zhou, Y. Cheng, and Z. Niu. CONCERT: A Cloud-Based Architecture for Next-generation Cellular Systems. IEEE Wireless Communications Mag., 2014, 21(6):14-22.
51. B. Naudts. Techno-economic Analysis of SDN. Internet Based Communication Networks and Services, October 30, 2012 [http://www.ewsdn.eu/files/Presentations/EWSDN%202012/5\\_1\\_Techno-economic\\_analysis.pdf](http://www.ewsdn.eu/files/Presentations/EWSDN%202012/5_1_Techno-economic_analysis.pdf)
52. S. Jain, A. Kumar, S. Mandal, J. Ong, L. Poutievski, A. Singh, S. Venkata, J. W-anderer, J. Zhou, M. Zhu, J. Zöllner, U. Hölzle, S. Stuart, and Amin Vahdat. B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN. CONFERENCE PAPER in ACM SIGCOMM Computer Communication Review 43(4):3-14, August 2013.
53. C. Y. Hong, S. Kandula, R. Mahajan, M. Zhang, V. Gill, M. Nanduri, and R. Wattenhofer. Achieving High Utilization with Software-Driven WAN. SIGCOMM '13 Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference.
54. [https://en.wikipedia.org/wiki/Equity\\_\(economics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Equity_(economics))
55. <http://www.dell.com/us/business/p/poweredge-m620/pd>
56. <http://www.dell.com/learn/us/en/04/shared-content~data-sheets~en/documents~comparing-the-performance-and-powe-of-poweredge-vrtx-and-hp-c3000.pdf>

57. Network Function Virtualization-Introductory White Paper. [https://portal.etsi.org/nfv/nfv\\_white\\_paper.pdf](https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf) , SDN and OpenFlow World Congress, Darmstadt-Germany, October 22-24,2012.
58. Network Function Virtualization-Update White Paper. [https://portal.etsi.org/nfv/nfv\\_white\\_paper2.pdf](https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper2.pdf) , SDN and OpenFlow World Congress, Frankfurt-Germany, October 15-17,2013.
59. R. Mijumbi, J. Serrat, J. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba. Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges. IEEE Communication Surveys and Tutorials, September 25,2015.
60. S. Perrin, and S. Hubbard. Practical Implementation of SDN & NFV in the WAN. <https://networkbuilders.intel.com/docs/HR-Intel-SDN-WP.pdf> , October 2013.
61. C. Giraldo, F. Gil-Castineira, C. Lopez-Bravo, F.J. Gonzalez-Castano. A Software-Defined Mobile Network Architecture.2014 The First International Workshop on Cooperative Wireless Networks, IEEE, 2014.
62. J. Wang, H. Fu, C. Cao. Software Defined Networking for Telecom Operators: Architecture and Applications. 2013 8<sup>th</sup> International Conference on Communications and Networking in China(CHINACOM), 2013.
63. A. Manzalini, R. Saracco, C. Buyukkoc, P. Chemouil, S. Kuklinski, A. Gladisch, M. Fukui, E. Dekel, D. Soldani, M. Ulema, W. Shen, W. Cerroni, F. Callegati, G. Schembra, V. Riccobene, C. Machuca, A. Galis, J. Mueller. Software-Defined Networks for Future Networks and Services. White Paper based on the IEEE Workshop SDN4FNS (Trento 11<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup> November, 2013), January 29, 2014.
64. Akyildiz, I. F., Lin, S.-C., Wang, P., "Wireless Software-defined Networks (W-SDNs) and Network Function Virtualization (NFV) for 5G Cellular Systems: An Overview and Qualitative Evaluation," Computer Network (Elsevier) Journal, vol. 93, Part 1, pp. 66-79, December 2015.
65. R. Jain. Openflow, Software Defined Networking(SDN) and Network Function Virtualization(NFV), 2014. <http://www.cse.wustl.edu/~jain/tutorials/ftp/icc14.pdf>
66. A. Risdianto, E. Mulyana. Implementation and Analysis of Control and Forwarding Plane for SDN.7<sup>th</sup> International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA),2012.
67. M. Jammal, T. Singh, A. Shami, R. Asal, and Y. Li. Software-Defined Networking: State of the Art and Research Challenges. Computer Network (Elsevier) Journal Volume 72, Pages 74–98, October 29, 2014.
68. E. Hernandez-Valencia, S. Izzo, B. Polonsky. How Will NFV/SDN Transform Service Provider OPEX. IEEE Network Volume:29, Issue: 3, pages 60-67, June 2015.
69. A. L. Valdivieso Caraguay, L.I. Barona Lopez, L. J. Garcia Villalba. An Overview of Integration of Mobile Infrastructure with SDN/NFV Networks. ICIT 2015 7<sup>th</sup> International Conference on Information Technology, 2015.

70. M. Rahman, C. Despins, S. Affes. Analysis of CAPEX and OPEX Benefits of Wireless Access Virtualization. IEEE International Conference on Communications 2013: IEEE ICC'13-Workshop on Energy Efficiency in Wireless Networks & Wireless Networks for Energy Efficiency (E2Nets),2013
71. T.M. Knoll. Life-Cycle cost modelling for NFV/SDN based mobile networks. Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE), pages 1-8, November 2015
72. M. Chiosi, D. Clarke, P. Willis. Network Virtualization: An Introduction, Benefits, Enables Challenges & Call for Action, SDN and OpenFlow World Congress, Darmstadt, Germany, October 2012
73. Smart 2020, Enabling the Low-Carbon Economy in the Information Age, The Climate Group, London U.K, 2008
74. Li-Chun Wang, S. Rangapillai. A survey on green 5G cellular networks. Signal Processing and Communications (SPCOM), 2012
75. Chih-Lin I, C. Rowell, S. Han, Z Xu, G. Li, Z. Pan. Toward green and soft: a 5G perspective. IEEE Communications Magazine (Volume:52, Issue: 2), February 2014
76. A. Gudipati, D. Perry, L. Erran Li, S. Katti. SoftRAN: Software Defined Radio Access Network. HotSDN '13 Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking, Pages 25-30, August 2013.
77. J. Costa-Requena, J. Llorente Santos, V. Ferrer Guasch, K. Ahokas, G. Premsankar, S. Luukkainen, O. Lopez Perez, M. Uriarte Itzazelaia, I. Ahmad, M. Liyanage, M. Ylianttila, E. Montes de Oca. SDN and NFV Integration in Generalized Mobile Network Architecture. Networks and Communications (EuCNC), 2015 European Conference, June 2015.
78. Ian F. Akuylidiz, P. Wang, S.C Lin. SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems. Computer Network (Elsevier) Journal, vol. 85, pp. 1-18, July 2015.
79. K. Shatzkamer. Applying Systems Thinking to Mobile Networking. [https://sdm.mit.edu/news/news\\_articles/webinar\\_032315/webinar32315.pdf](https://sdm.mit.edu/news/news_articles/webinar_032315/webinar32315.pdf)
80. Χρήστος Ι. Μπούρας, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, μάθημα: Δίκτυα Δημόσιας Χρήσης και Διασύνδεση Δικτύων, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.
81. F. Vaz, P. Sebastiao, L. Goncalves, and A. Correia. Economic and Environmental Comparative Analysis on Macro-Femtocells deployments in LTE-A. Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronics Systems (VITAE), 2013 3rd International Conference, pages 1-5, June 2013.
82. C. Bouras, V. Kokkinos, and A. Papazois. Financing and Pricing Small Cells in Next-Generation Mobile Networks. 2th International Conference on Wired and Wireless Internet Communications (WWIC'2014), Paris, France, 2014.

83. S. F. Yunas, J. Niemela, M. Valkama, and T. Isotalo. Techno-Economical Analysis and Comparison of Legacy and Ultra-Dense Small Cell Networks. 13th Annual IEEE Workshop on Wireless Local Networks, WLN 2014.
84. J. Hamilton. Cost of Power in Large-Scale Data Centers. <http://perspectives.mvdirona.com/2008/11/cost-of-power-in-large-scale-data-centers/>
85. Clark Chen, China Mobile Research Institute. C-RAN: The Road Towards Green Radio Access Network. August 2012.
86. Alcatel-Lucent Strategic White Paper. Why Service Providers Need An NFV Platform. [https://networkbuilders.intel.com/docs/NP2013113597EN\\_NFV\\_Platform\\_StraWhitePaper.pdf](https://networkbuilders.intel.com/docs/NP2013113597EN_NFV_Platform_StraWhitePaper.pdf)
87. Intel, NEC. NEC Virtualized EPC Innovation Powered by Multi Core Intel Architecture Processors. [https://networkbuilders.intel.com/docs/communications\\_nec\\_virtualized\\_epc\\_paper.pdf](https://networkbuilders.intel.com/docs/communications_nec_virtualized_epc_paper.pdf)
88. H. Hawilo, A. Shami, M. Mirahmadi, and R. Asal. NFV: State of the Art, Challenges and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC). IEEE Network Magazine 28(6): 18-26, November 2014.
89. Alcatel-Lucent Technology White Paper. The Journey to Packet Core Virtualization-Evolving the Packet Core to an NFV/SDN Architecture. <http://www.tmcnet.com/tmc/whitepapers/documents/whitepapers/2014/9899-journey-packet-core-virtualization-evolution-the-packet-core.pdf>
90. Khan, Farhan Ahmad (2014). Virtualized EPC: Unleashing the potential of NFV and SDN, 25th European Regional Conference of the International Telecommunications Society (ITS), Brussels, Belgium, 22-25 June 2014.
91. Intel, Intel® Data Plane Development Kit (Intel® DPDK) Overview Packet Processing on Intel® Architecture, December 2012. <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/presentation/dpdk-packet-processing-ia-overview-presentation.pdf>
92. <http://www.orange.com/en/news/2015/mars/5G-towards-the-mobile-Internet-of-the-future>
93. P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess, and A. Benjebbour. Design Considerations for a 5G Network Architecture, IEEE Communications Magazine (Volume:52, Issue: 11), November 2014
94. W. H. Chin, Z. Fan, and R. J. Haines. Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks. Accepted for publication in IEEE Wireless Communications April 2014
95. E. Hossain and M. Hasan. 5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine (Volume:18, Issue:3), June 2015.

96. V. C. M. Borges, K. V. Cardoso, E. Cerqueira, M. Nogueira, and A. Santos. Aspirations, challenges, and open issues for software-based 5G networks in extremely dense and heterogeneous scenarios. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2015, No. 1, June 2015.

97. <https://www.winncom.com/en/products/998-03-536>

98. <http://searchsdn.techtarget.com/news/2240232731/NEC-slashes-OpenFlow-prices-with-a-3000-SDN-starter-pack>

99. [https://www.winncom.com/pdf/Airspan\\_Air4g\\_W24/Airspan\\_Air4G\\_Brochure\\_070111.pdf](https://www.winncom.com/pdf/Airspan_Air4g_W24/Airspan_Air4G_Brochure_070111.pdf)