



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ
ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Παρουσίαση των δικτύων 5G – Τεχνοοικονομική
προσέγγιση**

**Κυριάκος.Γ Σγαρδέλης
Λάζαρος.Α Μαυρουδής**

Επιβλέπων: Δημήτριος Κατσιάνης, ΕΔΙΠ

ΑΘΗΝΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παρουσίαση των δικτύων 5G – Τεχνοοικονομική προσέγγιση

Κυριάκος.Γ Σγαρδέλης
ΜΟΠ: 404

Λάζαρος.Α Μαυρουδής
ΜΟΠ: 411

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δημήτριος Κατσιάνης, ΕΔΙΠ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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 αρχικά κάναμε μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων παρουσιάζοντας συνοπτικά τα δίκτυα 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς. Στην συνέχεια αναλύσαμε την ανάγκη για το LTE, την εξέλιξη σε αυτό και το 4G κάνοντας εκτενέστερη αναφορά στην έννοια του 4G και στα Femtocells στα δίκτυα LTE.

Ουσιαστικός στόχος μετά την ανάλυση αυτή ήταν η ομαλή μετάβαση στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Σε αυτά αρχικά έγινε μια παρουσίαση των τεχνικών τους χαρακτηριστικών και των νέων τεχνολογιών που ενσωματώνουν. Δεν θα μπορούσε στο σημείο αυτό να αποφευχθεί η αναφορά στο πρόβλημα του φάσματος, ενώ ακολουθεί εκτενής επεξήγηση του Software Defined Networking και του Cloud Computing. Ακολουθεί τεχνοοικονομική ανάλυσή τους και γίνεται αναφορά σε προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

Τέλος κάναμε μια θεωρητική και πρακτική μοντελοποίηση για έναν θεωρητικό πάροχο. Αναλύσαμε μέσω διαγραμμάτων κάποια στοχαστικά μοντέλα ζήτησης βασισμένοι στα ποσοστά διείσδυσης του 5G για τη δεκαετία 2019-2020.

Ακόμη παρουσιάσαμε μια αξιολόγηση της επένδυσης και βρήκαμε την καθαρά παρούσα αξία για το θεωρητικό μας μοντέλο (εταιρεία). Κλείνοντας παραθέσαμε τα σημαντικότερα άρθρα που παρουσιάζουν τις τελευταίες εξελίξεις των δικτύων 5G.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα 5G

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: 5G, LTE, LTE advanced, 4G, UMTS, 3GPP, Small Cells, ETSI, Network Function Virtualization, NPV, PI, LRM, Fisher Pry Model, Gompertz Model, Logistic Model, Bass Model

ABSTRACT

In this thesis, we represent a techno-economic study on the integration of advanced technologies in the 5G network design in order to meet the specifications set by the ETSI organization. The 5G networks should ensure the continuous connectivity of users, providing at the same time the required QoS (Quality of Service) and make reality what we call IoT (Internet of Things). The 5G will be designed with flexibility and scalability. For this reason, service providers are turning to integration technologies such as Software Defined Networking (SDN), the Network Function Virtualization (NFV) and Cloud Computing. As part of this diplomatic thesis initially we did a throwback to the evolution of wireless networks by representing briefly networks 1st, 2nd and 3rd generation. Then we analyzed the need for LTE, the evolution in this and in the 4G, and we also made extensive reference to the concept of 4G and Femtocells in LTE networks. The essential aim after this analysis was the smooth transition to the 5th generation networks. These originally was a presentation of the technical features and new technologies that integrate. It could at this point to avoid referring to the problem of the spectrum, followed by extensive explanation of Software Defined Networking and Cloud Computing. Follows the techno-economic analysis, and reference is made to a proposed architecture.

Finally we made a theoretical and practical modeling of a theoretical provider. Analyzed through diagrams some stochastic demand models based on the 5G penetration rates for the decade 2019-2020.

Even we presented an evaluation of the investment and found the net present value for our theoretical model (company). Closing quoted the major articles presenting the latest developments of 5G networks.

SUBJECT AREA: Δίκτυα 5G

KEYWORDS: 5G, LTE, LTE advanced, 4G, UMTS, 3GPP, Small Cells, ETSI, Network Function Virtualization, NPV, PI, LRM, Fisher Pry Model, Gompertz Model, Logistic Model, Bass Model

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Δημήτριο Κατσιάνη για την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης επιθυμούμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες για την επιστημονική του καθοδήγηση, το ενδιαφέρον και την ανθρωπιά του, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	12
1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	13
1.1 Ιστορία Ασύρματων Δικτύων (thesis).....	13
1.2 Εξέλιξη Ασύρματων Δικτύων.....	14
1.2.1 Ασύρματα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G).....	15
1.2.2 Ασύρματα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G).....	16
1.2.3 Ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G)	18
1.3 Η ανάγκη για το LTE	22
1.4 Σύνοψη	24
2 LTE ΚΑΙ LTE ADVANCED	26
2.1 Εισαγωγή στο LTE.....	26
2.2 Οι προδιαγραφές της 3GPP για το LTE.....	27
2.3 Η εξέλιξη στο 4G.....	30
2.4 Εισαγωγή στο LTE-ADVANCED	31
2.4.1 Οι απαιτήσεις του LTE-ADVANCED	31
2.4.2 Συστήματα 4 ^{ης} Γενιάς (4G).....	32
2.5 Η έννοια του 4G.....	33
2.6 Η εξέλιξη από το UMTS στο LTE.	33
2.7 Femtocells στα Δίκτυα LTE	34
3 ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5 ^{ης} ΓΕΝΙΑΣ.....	38
3.1 Γενική εισαγωγή.....	38
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και νέες τεχνολογίες	40
3.3 Το πρόβλημα του φάσματος.....	45
3.4 Οργανισμός ETSI – Network Function Virtualization	48
3.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά	50
3.4.2 Αρχιτεκτονική – Οφέλη	51
3.5 Software Defined Networking.....	53
3.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά	55
3.5.2 Οφέλη	57
3.6 Cloud Computing.....	58
3.6.1 Cloud-RAN : Radio Access μέσω Cloud – Οφέλη	59

4	ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ	63
4.1	Γενική εισαγωγή – Οικονομικές έννοιες	63
4.2	Small Cells – Οικονομική ανάλυση.....	65
4.3	Cloud computing – οικονομική ανάλυση.....	72
4.4	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική	76
5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	80
5.1	Παρουσίαση του Παρόχου που θα μοντελοποιηθεί	80
5.2	Ζήτηση υπηρεσιών.....	80
5.2.1	Διαδικασία Διάδοσης μιας Καινοτομίας.....	81
5.2.2	Στοχαστικά Μοντέλα Ζήτησης.....	83
5.2.2.1	Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression Model)	84
5.2.2.2	Μοντέλο Fisher-Pry (Fisher-Pry Model)	84
5.2.2.3	Μοντέλο Bass (Bass Model)	85
5.2.2.4	Μοντέλο Gompertz (Gompertz Model)	85
5.2.2.5	Λογιστικό Μοντέλο (Logistic Model).....	87
5.2.3	Πρόβλεψη.....	89
5.2.3.1	Πρόβλεψη Ζήτησης του 5G στην Ελλάδα	89
5.2.3.1.1	Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression Model)	91
5.2.3.1.2	Μοντέλο Fisher-Pry (Fisher-Pry Model)	91
5.2.3.1.3	Μοντέλο Gompertz I(Gompertz I Model)	92
5.2.3.1.4	Μοντέλο Gompertz II(Gompertz II Model)	93
5.2.3.1.5	Σιγμοειδής Καμπύλη Διείσδυσης του 5G στην Ελλάδα	93
5.3	Αξιολόγηση επένδυσης	95
5.3.1	Μέθοδος Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV)	96
5.3.2	Μέθοδος Εσωτερικού Επιτοκίου Προεξόφλησης (Internal Rate of Return-IRR)	96
5.3.3	Μέθοδος Δείκτη Κερδοφορίας (Profitability Index-PI)	97
5.3.4	Αποτελέσματα Αξιολόγησης Επένδυσης.....	98
6	ΑΡΘΡΑ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟ 5G	102
6.1	Γιατί θα αλλάξει τον κόσμο μας ;	102
6.2	Συμμετοχή ΟΤΕ στις έρευνες.....	103
6.3	Η Samsung μπαίνει στον αστερισμό του 5G.....	103
6.4	Συνεργασία Ericsson και Telefonica για το 5G.....	104
6.5	Πέντε προκλήσεις στον δρόμο προς τα δίκτυα 5G	106
6.6	Τελευταίες εξελίξεις.....	109

6.7	Η Ericsson παρουσιάζει το μέλλον του 5G	110
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	114
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	115

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Οι γενιές τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.....	15
Εικόνα 2 : Δίκτυο 2ης γενιάς (2G).....	17
Εικόνα 3 : Ασύρματο δίκτυο 3ης γενιάς (3G).....	19
Εικόνα 4 : Analysis Mason 1.....	23
Εικόνα 5 : Analysis Mason 2.....	23
Εικόνα 6 : Η εξέλιξη των κινητών δικτύων.....	25
Εικόνα 7 : Αντιπαραβολή των Αρχιτεκτονικών Macrocell-Pico cell.....	36
Εικόνα 8 : Τα τρία «κύματα» των μελλοντικά συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο 5G.....	39
Εικόνα 9 : Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps.....	41
Εικόνα 10 : Σύγκριση του latency μεταξύ του δικτύου 4G και της πρόβλεψης για το 5G.....	42
Εικόνα 11 : Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη ..	43
Εικόνα 12 : Radar Chart των θεωρητικών δυνατοτήτων του 5G.....	45
Εικόνα 13 : Επέκταση της κάλυψης ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification.....	47
Εικόνα 14 : Παραδείγματα Network Functions Virtualization.....	50
Εικόνα 15 : Μοντέλο Υπηρεσιών Cloud Computing και αντιστοίχισή τους στην Αρχιτεκτονική του NFV.....	52
Εικόνα 16 : Control και Data Plane χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας SDN.....	55
Εικόνα 17 : Τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του Cloud Computing.....	59
Εικόνα 18 : Σύγκριση μεταξύ της παραδοσιακής σχεδίασης των cellular δικτύων και με κεντροποιημένη επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης.....	61
Εικόνα 19 : Οι κατηγορίες λειτουργικού κόστους (OPEX) για έναν πάροχο υπηρεσιών.....	65
Εικόνα 20 : Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Femtocells.....	67
Εικόνα 21 : Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Macrocells.....	67
Εικόνα 22 : Κατανάλωση ενέργειας για κάθε είδος σταθμού βάσης.....	68
Εικόνα 23 : Σύγκριση κόστους εγκατάστασης των Small Cells και το κέρδος που έχουμε σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells.....	70
Εικόνα 24 : Απεικόνιση του σεναρίου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση.....	71
Εικόνα 25 : Μελέτη απόδοσης του κόστους και της ενέργειας για τις διαφορετικές στρατηγικές εγκατάστασης [83]......	72
Εικόνα 26 : Pie Chart του μηνιαίου λειτουργικού κόστους ενός Data Center [84]......	75
Εικόνα 27 : Κεντροποιημένη Cloud-RAN αρχιτεκτονική [85].....	76
Εικόνα 28 : Network Virtualization του SoftAir [78]......	79
Εικόνα 29 : Hardware Δικτυακές συσκευές και η υλοποίησή τους σε Virtual Machines [79]......	79
Εικόνα 30: Διάδοση καινοτομίας στο χρόνο.....	82

Εικόνα 31 : Fisher-Pry στο χρόνο	84
Εικόνα 32 : Μοντέλο Gompertz	87
Εικόνα 33 : Ποσοστό διείσδυσης 4G στην Ελλάδα	90
Εικόνα 34 : Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	91
Εικόνα 35 : Data Fitting του Μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης.....	91
Εικόνα 36 : Εκτίμηση Παραμέτρων του Μοντέλου Fisher-Pry.....	91
Εικόνα 37 : Data Fitting του Μοντέλου Fisher-Pry.....	92
Εικόνα 38 : Εκτίμηση Παραμέτρων του Μοντέλου Gompertz I.....	92
Εικόνα 39 : Data Fitting του Μοντέλου Gompertz I	92
Εικόνα 40 : Εκτίμηση Παραμέτρων του Μοντέλου Gompertz II	93
Εικόνα 41 : Data Fitting του Μοντέλου Gompertz II	93
Εικόνα 42 : Αναμενόμενη Διείσδυση 5G στην Ελλάδα	94
Εικόνα 43 : Αναμενόμενο ποσοστό διείσδυσης	94
Εικόνα 44 : Καμπύλες Εσόδων-OPEX Εξόδων ανα έτος λειτουργίας	100
Εικόνα 45 : Cash Balance-PV of Free Cash Flows ανά Έτος Λειτουργίας	100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Τα χαρακτηριστικά των γενιών κινητής τηλεφωνίας	22
Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά συστήματος LTE.....	27
Πίνακας 3 : Εκδόσεις προδιαγραφών της 3GPP για το UMTS και το LTE.....	28
Πίνακας 4 : Οι προδιαγραφές του 3GPP για τις σειρές που χρησιμοποιούν το UMTS και το LTE.....	30
Πίνακας 5 : Στόχοι LTE-Advanced πλήρως συμφορισμένου buffer.....	32
Πίνακας 6 : Εκδόσεις 99,4,5,6,7,8.....	34
Πίνακας 7: Μεριδίο αγοράς σε βάθος δεκαετίας	80
Πίνακας 8 : Πελατειακή Βάση της Εταιρείας τη δεκαετία 2019-2028.....	95
Πίνακας 9: Έσοδα/Έτος για κάθε Πακέτο της Hellas 5G τη δεκαετία 2019-2028.....	98
Πίνακας 10 : NPV-IRR-PI της Επένδυσης	99

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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 5ης γενιάς (5G). Τα δίκτυα 5ης 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.

1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΔΙΚΤΥΩΝ

1.1 Ιστορία Ασύρματων Δικτύων (thesis)

Ο Heinrich Rudolf Hertz ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε και παρήγαγε ραδιοκύματα το 1888 και μέχρι το 1894 ο σύγχρονος, τότε, τρόπος μετάδοσης μηνυμάτων ήταν μέσω τηλέγραφου. Ο Gulielmo Marconi κατάφερε να στείλει και να λάβει μηνύματα, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα, σε μια απόσταση 2 μιλίων. Το 1899, ο Marconi έστειλε μήνυμα σε απόσταση εννέα μιλίων κατά μήκος του καναλιού του Bristol και σε 31 μίλια κατά μήκος των Αγγλικών καναλιών προς την Γαλλία. Το 1901 ήταν σε θέση να μεταδώσει πέρα από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Έκτοτε ο Marconi έμεινε γνωστός ως ο “πατέρας του ασύρματου”. Κατά την διάρκεια του Δεύτερου Παγκόσμιου Πολέμου, πρώτος ο στρατός των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποίησε ραδιοσήματα για μετάδοση δεδομένων. Αυτό ενέπνευσε μια ομάδα ερευνητών το 1971 στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης και έτσι δημιουργήθηκε το πρώτο δίκτυο επικοινωνιών βασισμένο σε πακέτα, το επονομαζόμενο ALOHANET.

Το ALOHANET ήταν το πρώτο ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network - WLAN) που ανήκει στην οικογένεια των 802.11 προτύπων. Αυτό το πρώτο WLAN αποτελούταν από 7 υπολογιστές, οι οποίοι βρίσκονταν σε 4 διαφορετικά νησιά, και χρησιμοποιώντας ερασιτεχνικούς ραδιοσταθμούς είχαν την δυνατότητα να επικοινωνούν μέσω αμφίδρομης τοπολογίας αστέρα.

Τα πρώτα WLAN χρησιμοποιούσαν μια unlicensed ζώνη συχνοτήτων (902MHz - 928MHz), η οποία αργότερα γέμισε με παρεμβολές από μικρές συσκευές και βιομηχανικά μηχανήματα, με αποτέλεσμα να επιστρατευθεί η τεχνική διάχυσης φάσματος για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές αυτές.

Τα WLAN δεύτερης γενιάς, καθώς και τα τρίτης γενιάς, ήταν τέσσερις φορές πιο γρήγορα σε σχέση με τα αρχικά, με ρυθμό μετάδοσης έως και 2 Mbps. Το 1990, η IEEE 802 εκτελεστική επιτροπή θέσπισε το 802.11 working group για να δημιουργήσει ένα πρότυπο WLAN, το οποίο καθιέρωσε την συχνότητα λειτουργίας στα 2.4GHz. Το 1997 το group αυτό ενέκρινε το IEEE 802.11 ως το πρώτο WLAN που λειτουργεί σε ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν θεσπιστεί και άλλα πρότυπα όπως τα WPAN, WRAN κτλ. [1]

1.1 Τι είναι τα Ασύρματα Δίκτυα

Ως ασύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, συνήθως τηλεφωνικά ή δίκτυα υπολογιστών, τα οποία χρησιμοποιούν, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικώς δίκτυα υπολογιστών.

Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο «δίκτυο» τηλεπικοινωνιακών κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια.

Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και επομένως, δεν μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών.

1.2 Εξέλιξη Ασύρματων Δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να χωριστούν σε δυο ευρείες κατηγορίες: τα ασύρματα δίκτυα που έχουν μια καθορισμένη με σαφήνεια υποδομή (δηλ., κυψελωτά δίκτυα) και τα ad hoc (χωρίς υποδομή) δίκτυα. Αν και τα ad hoc δίκτυα παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, στη συνέχεια η μελέτη που ακολουθεί αναφέρεται κυρίως στα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα. Από αυτά, τα συστήματα που χρησιμοποιούνται περισσότερο στα σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι τα κυψελωτά συστήματα δεύτερης και τρίτης γενιάς με χαρακτηριστικούς αντιπροσώπους το GSM και το UMTS αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες φάσεις από τις οποίες έχουν περάσει τα κυψελωτά δίκτυα καθώς και η τάση των νέων υπηρεσιών.

Από το έτος 1979 – όπου και λειτούργησε το πρώτο παγκοσμίως κυψελωτό σύστημα στην Ιαπωνία – μέχρι τις μέρες μας, η ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας υπήρξε ραγδαία. Στο διάστημα αυτών των χρόνων αναπτύχθηκαν πολλά συστήματα που αντικατέστησαν ή συμπλήρωσαν τη λειτουργία παλαιότερων δικτύων και προσέφεραν την εμπειρία σημαντικών εφαρμογών. Το κάθε σύστημα από αυτά ανήκει σε κάποια τεχνολογική γενιά που διακρίνεται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά.

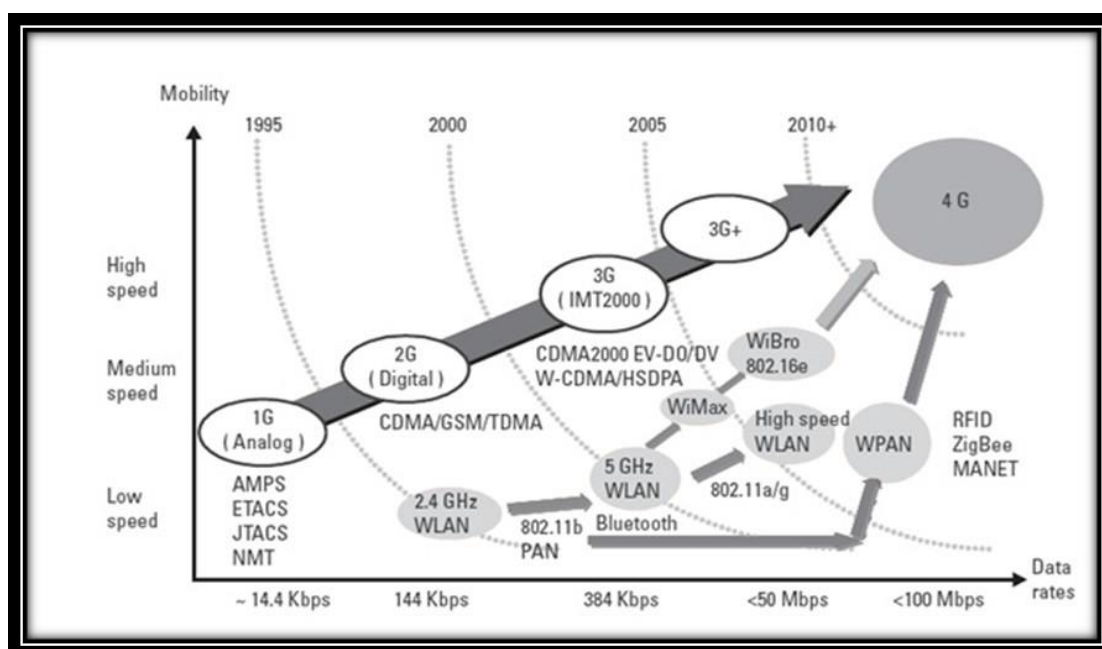
Με τεχνικούς όρους, οι γενιές τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ορίζονται ως εξής:

✓ **0G** : ARP

✓ **1G** : NMT, AMPS, TACS

✓ **2G** : GSM, i-DEN, D-AMPS, CDMA One, PDC

- ✓ **2,5G** : GPRS
- ✓ **2,75G** : EDGE
- ✓ **3G** : W-CDMA, UMTS, FOMA, CDMA2000, TD-SCDMA
- ✓ **3,5G** : HSDPA
- ✓ **3,75G** : HSUPA
- ✓ **3,99G** : Evolved UMTS
- ✓ **4G**



Εικόνα 1 : Οι γενιές τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

1.2.1 Ασύρματα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G)

Πρώτης γενιάς δίκτυα (1G) είναι τα πρώτα αναλογικά κυψελωτά συστήματα που ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του '80. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους ήταν η αναλογική διαμόρφωση FM και η τεχνική FDD (Frequency Division Duplexing – Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας).

Παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι το AMPS (Advanced Mobile Phone System), το οποίο αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες, το NMT (Nordic Mobile Telephone), το οποίο τέθηκε σε λειτουργία την ίδια περίοδο στις Σκανδιναβικές Χώρες και στη συνέχεια επεκτάθηκε σε Ανατολική Ευρώπη και Ρωσία και το TACS (Total Access Communication System), με έδρα λειτουργίας τη Μεγάλη Βρετανία. Η μετάβαση από τα κυψελωτά συστήματα 1ης γενιάς σε εκείνα της 2ης γενιάς σηματοδεύτηκε από την εισαγωγή των ψηφιακών τεχνικών.

Τα πρώτα κινητά ασύρματα δίκτυα έκαναν επίσης την εμφάνισή τους στην δεκαετία του 1980 με την εκκίνηση των συστημάτων πρώτης γενιάς (1G). Αν και σήμερα η τεχνολογία τους θεωρείται ξεπερασμένη, εν τούτοις αποτέλεσαν έναν σημαντικό σταθμό στην ιστορική εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Σχετικά γρήγορα οι δυνατότητές τους δεν επαρκούσαν για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών.

Τα κυριότερα προβλήματα τους ήταν:

1. Η χαμηλή ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών
2. Η χαμηλή απόδοση του δικτύου
3. Το χαμηλό επίπεδο ασφαλείας τους και οι υψηλές πιθανότητες αποκλεισμού (blocking probabilities).

Έπειτα από τις προσπάθειες αντιμετώπισης των διάφορων προβλημάτων των συστημάτων πρώτης γενιάς και μετά από έντονες διεργασίες γεννήθηκαν τα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G).

1.2.2 Ασύρματα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G)

Τα 2ης γενιάς δίκτυα (2G) είναι τα πρώτα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα που πρωτοεμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '90. Η ανάπτυξη των συστημάτων αυτών βασίστηκε στη χρήση ψηφιακών επεξεργασιών σημάτων, καθώς και σε μια σειρά από επεκτάσεις των αλγορίθμων συμπίεσης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης και την αύξηση της χωρητικότητας συστήματος και της περιοχής κάλυψης.

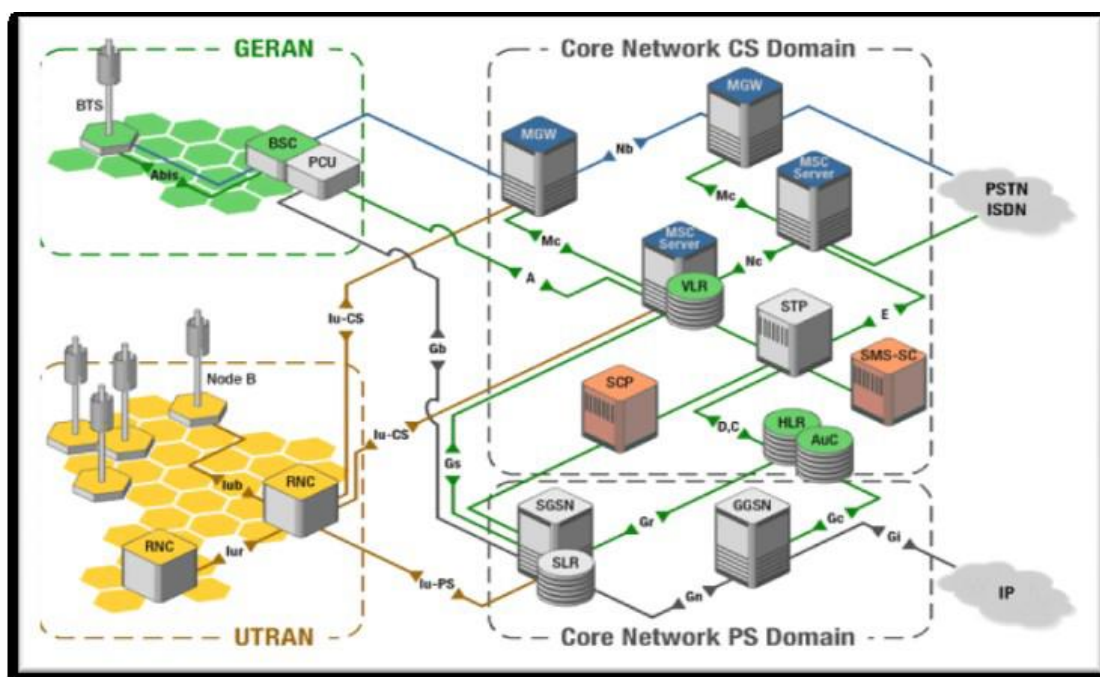
Με τα συστήματα 2ης γενιάς σημειώθηκε σημαντική βελτίωση στην ποιότητα φωνής, καθώς η ψηφιακά κωδικοποιημένη πληροφορία υπόκειται σε ασθενέστερη παραμόρφωση σε σχέση με την αναλογική πληροφορία, ενώ παράλληλα έγινε δυνατή η χρήση πολυπλεξίας με περισσότερο αποτελεσματικό τρόπο, με αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας.

Η 2η γενιά δικτύων παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα περιαγωγής, προσφέροντάς τους χωρίς ασυνέχειες επικοινωνία ανεξαρτήτου της τοποθεσίας στην οποία βρίσκονται. Η δυνατότητα περιαγωγής έγινε ο πρόδρομος για την ανάπτυξη πολλών εφαρμογών και έφερε την κινητικότητα στη ζωή μας. Πλέον, η κινητικότητα θεωρείται ως η θεμελιώδης πλευρά κάθε εφαρμογής. Η δυνατότητα όμως υποστήριξης υπηρεσιών δεδομένων είναι περιορισμένη στα 2ης γενιάς δίκτυα.

Η ανάγκη για υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων οδήγησε στην εισαγωγή των συστημάτων GPRS και EDGE, δυο συστημάτων που ανήκουν στη χρονική περίοδο ανάμεσα στη 2η και την επόμενη γενιά. Πράγματι, η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και video πραγματικού χρόνου ή να παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες, οδήγησε στη σχεδίαση των συστημάτων 3ης γενιάς (3G).

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς είχαν γίνει πλέον ψηφιακά και στον τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών, σε αυτά διακρίνονται τα συστήματα GSM (Global System for Mobile), το ADC (American Digital Cellular or IS-54), το PDC (Personal Digital Cellular), το DCS- 1800 (Digital Communication System στα 1800 MHz) και τα ασύρματα συστήματα χαμηλότερων στρωμάτων DECT (Digital European Cordless Telephone), CT2 (Cordless Telephone 2), PACS (Personal Access Communication Systems) και PHS (Personal Handy Phone System).

Η δεύτερη γενιά συστημάτων κατόρθωσε να αποκαταστήσει την εμπιστοσύνη των χρηστών στις επικοινωνίες και σήμερα κατέχει εξέχουσα θέση ανάμεσα στα συστήματα επικοινωνιών.



Εικόνα 2 : Δίκτυο 2ης γενιάς (2G)

Τα χαρακτηριστικά που συνετέλεσαν στην επιτυχία και στην αλματώδη εξάπλωση αυτής της γενιάς είναι:

1. Το δίκτυο πλέον είναι ψηφιακό το οποίο οδηγεί σε αναβάθμιση της ποιότητας όλων των παρεχόμενων υπηρεσιών.
2. Υποστηρίζονται υπηρεσίες δεδομένων και παρέχονται νέες υπηρεσίες.
3. Η εν γένει βελτίωση +της απόδοσης του δικτύου
4. Η εκμετάλλευση του δεδομένου φάσματος συχνότητων.

Εξαιτίας της ψηφιακής μορφής του δικτύου και των νέων τεχνικών που αναπτύχθηκαν, τα συστήματα δεύτερης γενιάς θεωρούνται ασφαλείς υλοποιήσεις. Ωστόσο δύο κυρίως παράμετροι οδηγούν σήμερα στην διαπίστωση ότι τα συστήματα δεύτερης γενιάς δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών.

Πρώτον, ο αριθμός των χρηστών ασύρματων επικοινωνιών διευρύνεται συνεχώς με ταχείς ρυθμούς και δεύτερον, υπάρχει μία αυξανόμενη ζήτηση για νέους τύπους υπηρεσιών (π.χ. video streaming, file downloading, ηλεκτρονικό εμπόριο κτλ), οι οποίες απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με τις ήδη διαθέσιμες και ενισχυμένα επίπεδα ασφάλειας. Γίνεται φανερό λοιπόν ότι για την κάλυψη των απαιτήσεων αυτών είναι απαραίτητο το δίκτυο να υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και να εκμεταλλεύεται αποδοτικά όλους τους διαθέσιμους πόρους.

Δεδομένου ότι η μεγάλη ζήτηση υπηρεσιών και ταχύτητας υπηρεσιών έδειχναν ότι η τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος που χρησιμοποιούσαν τα συστήματα δεύτερης γενιάς έπρεπε να αλλάξει σε μεταγωγή πακέτου, η αλλαγή αυτή προς τα συστήματα τρίτης γενιάς επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας τα ενδιάμεσα συστήματα (2.5G) όπως το HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), GPRS (General Packet Radio Service), και EDGE (Enhance Data for GSM Evolution). Η εξέλιξη των συστημάτων σε συστήματα τρίτης γενιάς (3G) ήρθε ως φυσικό επακόλουθο των απαιτήσεων των χρηστών για νέες, βελτιωμένες υπηρεσίες.

1.2.3 Ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G)

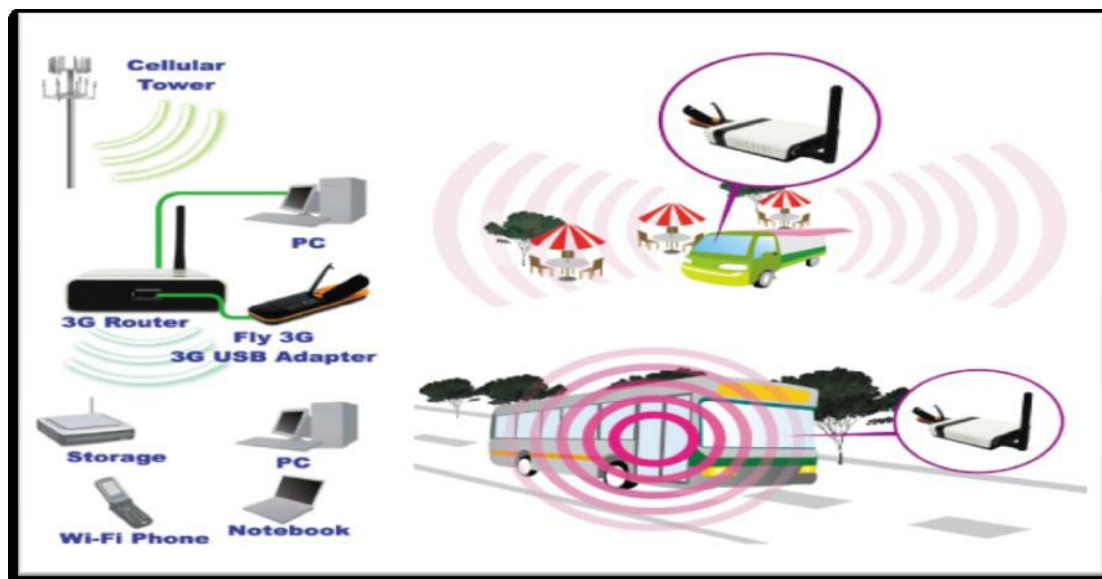
Πράγματι, η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και video πραγματικού χρόνου ή να παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες, οδήγησε στη σχεδίαση των συστημάτων 3ης γενιάς (3G).

Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και η δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης των 384 Kbps.

Τα δίκτυα 3ης γενιάς δεν θα αντικαταστήσουν τα δίκτυα 2ης γενιάς, τα οποία θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται. Κύριο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται είναι το W-CDMA, στο οποίο στηρίζεται το πιο γνωστό δίκτυο 3ης γενιάς, το UMTS. Ωστόσο, η αποτυχία του W-CDMA πρόσδωσε την αληθινή εμπειρία τρίτης γενιάς, ανάγκασε τη βιομηχανία να αρχίσει νωρίτερα από το προβλεπόμενο την υλοποίηση των HSDPA και HSUPA (3,5G).

Τα συστήματα αυτά προσφέρουν αληθινές 3G εφαρμογές, αν και αυτές οι υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες είναι για περιορισμένο αριθμό πελατών, γεγονός που οδήγησε σε συμφόρηση αυτών των δικτύων.

Εξαιτίας του κινδύνου κορεσμού των HSDPA και HSUPA συστημάτων, αλλά και για την αποφυγή κενού στην τεχνολογία ανάμεσα στα 3,5G και την επόμενη γενιά (4G), μελετήθηκε η εισαγωγή του Super 3G ή αλλιώς Evolved UMTS (3,99G) μέχρι τον Ιούνιο του 2007. Το Evolved UMTS πρόσφερε ταχύτητες από 30Mbps έως και 100Mbps.



Εικόνα 3 : Ασύρματο δίκτυο 3ης γενιάς (3G)

Τα κινητά ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς όπως το ιαπωνικό δίκτυο ARIB, το ευρωπαϊκό UMTS συστημάτων και το βορειοαμερικανικό CDMA-2000 βασίζονται σε αρχιτεκτονική δικτύου all-IP για να παρέχουν τις υποσχόμενες ευρυζωνικές υπηρεσίες και τις εγγυήσεις σε QoS.

Εξαιτίας της τεχνολογίας CDMA(Code Division Multiple Access) την οποία κατά βάση χρησιμοποιούν, η διαπροσωπική επικοινωνία μπορεί να εμπλουτιστεί με υψηλής ποιότητας εικόνα και βίντεο, η δε πρόσβαση σε δεδομένα και υπηρεσίες δημόσιων και ιδιωτικών δικτύων διευκολύνεται από τους υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και τις νέες ευέλικτες δυνατότητες που προσφέρουν τα συστήματα 3G.

Σημειώνεται ότι ο κύριος αντιπρόσωπος των δικτύων τρίτης γενιάς, το UMTS, υποστηρίζει μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, που έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας.

Οι βασικές απαιτήσεις που είχαν τεθεί για την ασύρματη διεπαφή τρίτης γενιάς ήταν:

1. Η υλοποίηση μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης
2. Η δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών σε μία σύνδεση
3. Η βελτιωμένη χωρητικότητα και κάλυψη σε σχέση με το GSM καθώς και
4. Η διατήρηση συμβατότητας με το σύστημα GSM.

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα 3ης γενιάς (3G) είναι η εξέλιξη των συστημάτων 2ης γενιάς για αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και σημαντικά αυξημένη ευελιξία παροχής μεγάλου αριθμού υπηρεσιών στον ασύρματο χρήστη (παραδοσιακές υπηρεσίες τηλεφωνίας και τηλε-ειδοποίησης, διαδραστικά πολυμέσα (interactive multimedia), υψηλής ποιότητας τηλεδιάσκεψη (teleconference) και πρόσβαση στο Internet). Παρά τον αρχικό στόχο της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) για ένα ενιαίο παγκόσμιο πρότυπο για τα συστήματα 3ης γενιάς, έχουν υποβληθεί

προτάσεις στηριζόμενες σε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA) ή διαίρεσης κώδικα (CDMA).

Η πλειοψηφία πάντως στηρίζεται σε τεχνολογία CDMA ευρείας ζώνης (WCDMA). Το άνω όριο των περίπου 100 kbits/sec για τα συστήματα 2G περιλαμβάνει τις βελτιώσεις του GSM στο EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) και στο GPRS (GSM Packet Radio System).

Η λειτουργία των συστημάτων 3ης γενιάς τοποθετείται στα μέσα του 2001 σε περιορισμένες αγορές. Τα συστήματα 3G αύξησαν το ρυθμό παροχής πληροφορίας σε περίπου 2Mbits/sec σε τοπικές περιοχές με περιορισμένη κινητικότητα. Προτάσεις για ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Loop-WLL) και για σταθερά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης (Broadband Fixed Wireless Access) περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό των συστημάτων 3G.

Η τέταρτη γενιά (4G) θα ακολουθήσει με ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στο ρυθμό παροχής πληροφορίας και μεγαλύτερη κινητικότητα (δυνατότητα μεγαλύτερης ταχύτητας κίνησης του συνδρομητή).

Ο βασικός στόχος των συστημάτων 3G είναι η παροχή ενός μεγάλου αριθμού υπηρεσιών στο χρήστη χρησιμοποιώντας την αρχή του συστήματος συντεταγμένων (coordinate system). Με βάση αυτή την αρχή, οι υπηρεσίες παρέχονται με ενσύρματο, επίγειο ασύρματο ή δορυφορικό μέσο ανάλογα με την περίπτωση.

Ο χρήστης είναι δυνατό να μην γνωρίζει τη συγκεκριμένη τεχνολογία που χρησιμοποιεί. Στην πλειοψηφία τους τα προτεινόμενα 3G συστήματα δεν θα επιτύχουν αυτή τη μορφή επικοινωνίας αφήνοντάς την για τα συστήματα 4ης γενιάς.

Η κάλυψη σε όλα τα σημεία της γης είναι επιθυμητή, ενώ είναι αποδεκτό ότι οι μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων δεν θα είναι διαθέσιμες παντού και πιθανόν δεν θα είναι διαθέσιμες στις μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης του συνδρομητή. Σε αυτές τις ταχύτητες ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας θα περιορίζεται στα 384 kbits/sec, ενώ για μικρότερες ταχύτητες να είναι 2 Mbits/sec.

Παγκόσμια μεταγωγή χωρίς προβλήματα (seamless roaming) ήταν ένας άλλος στόχος των συστημάτων 3G. Εξαιτίας του περιορισμένου διαθέσιμου εύρους συχνοτήτων για τα συστήματα 3G είναι αναγκαία η όσο το δυνατόν αποδοτικότερη χρήση του.

Τα κυψελωτά συστήματα 3ης γενιάς χαρακτηρίζονται από απόδοση εύρους ζώνης (spectrum efficiency) μέχρι 0.5 bps/Hz/cell, λαμβάνοντας υπόψη παρεμβολές από άλλους χρήστες και την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (frequency reuse). Αν και αυτή η απόδοση είναι ικανοποιητική για παραδοσιακές υπηρεσίες, σημαντικές βελτιώσεις είναι αναγκαίες για την παροχή υπηρεσιών υψηλών ρυθμών μετάδοσης πληροφορίας σε μεγάλο αριθμό χρηστών.

Τεχνολογίες όπως οι προσαρμοστικές κατευθυντικές κεραιές (adaptive directional antennas), η ακύρωση παρεμβολών (interference cancellation) και η διαδοχική μετάδοση (relay transmission) μπορούν να βοηθήσουν προς αυτή την κατεύθυνση. Με την υπάρχουσα τεχνολογία ο στόχος της παροχής οποιασδήποτε τεχνολογίας σε οποιοδήποτε χρήστη κάθε στιγμή σε

οποιοδήποτε σημείο στη γη μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε μικρό βαθμό, καθώς είναι αναγκαίες σημαντικές βελτιώσεις στις τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων και σχεδιασμού δικτύων.

Παρά το γεγονός ότι έχουν το πλεονέκτημα της υποστήριξης του πρωτοκόλλου IP και της κινητότητας, τα δίκτυα τρίτης γενιάς έχουν το μειονέκτημα της ύπαρξης διαφορετικών προτύπων. Το μειονέκτημα αυτό περιορίζει την εύκολη περιαγωγή μεταξύ δικτύων βασισμένων σε διαφορετικά πρότυπα, και αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την κινητικότητα των χρηστών.

Επιπλέον, τα δίκτυα τρίτης γενιάς παρέχουν (στην καλύτερη περίπτωση) ταχύτητες ως 2 Mbps. Αν και οι ταχύτητες αυτές είναι αρκετές για τις παραδοσιακές εφαρμογές, θα πρέπει να βελτιωθούν προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εφαρμογών κινητής τηλεφωνίας των επόμενων δεκαετιών.

Όπως σε όλους τους τομείς της τεχνολογίας, η αναζήτηση για καλύτερα και αποδοτικότερα συστήματα δεν σταματά ποτέ. Μόλις φτάσει η εποχή για την εγκατάσταση ενός συστήματος, η έρευνα για την επόμενη γενιά του είναι συνήθως ήδη σε εξέλιξη. Συνεπώς, η εγκατάσταση των δικτύων τρίτης γενιάς συνοδεύτηκε από την έναρξη της έρευνας για την επόμενη γενιά των ασύρματων συστημάτων κινητής τηλεφωνίας.

Το πρότυπο 3G κατηγοριοποιείται στους εξής δύο τύπους: 3GPP και 3GPP2, οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

1.2.3.1 3GPP

Το πρότυπο αυτό παρέχει μετόπισθεν συμβατότητα με το GSM και το IS-136/PDC. Το πρότυπο 3GPP περιλαμβάνει το WCDMA, το TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) και το EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution). Το W-CDMA καλείται ονομάζεται επίσης UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Το W-CDMA χρησιμοποιεί τα δύο πρότυπα FDD και TDD. Η τεχνική έχει προς τα πίσω συμβατότητα με το GSM και το εύρος ζώνης του καναλιού είναι στα 5GHz. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων μπορεί να φτάσει τα 2 Mbps. Η φασματική του απόδοση είναι έξι φορές μεγαλύτερη από ότι του συστήματος GSM. Το TD-SCDMA είναι ένα δημοφιλές πρότυπο συμβατό με το GSM. Έχει εύρος ζώνης 1.6MHz και χρησιμοποιεί το πρότυπο TDD. Ο ρυθμός μετάδοσης (bitrate) του καναλιού είναι μέχρι τα 2.227Mbps

1.2.3.2 3GPP2

Αυτή η τεχνολογία 3G είναι συμβατή με το πρότυπο 2G CDMA, δηλαδή το IS-95 και το 2.5G IS-95B. Το πρότυπο CDMA-2000 χρησιμοποιεί τις μεθόδους FDD και TDD. Η συχνότητα καθοδικής ζεύξης μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας είτε άμεση διασπορά ή πολλαπλών φερόντων σημάτων και η συχνότητα ανοδικής ζεύξης υποστηρίζει τον ταυτόχρονο συνδυασμό πολλαπλών φερόντων σημάτων και την άμεση διασπορά αυτών. Το 3G-CDMA2000 1xRTT CDMA υποδηλώνει ένα μοναδικό κανάλι στα 1,25MHz. Ο ρυθμός των δεδομένων είναι έως και 2 Mbps. Ο Πίνακας 2 περιγράφει επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά των τριών πρώτων γενιών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

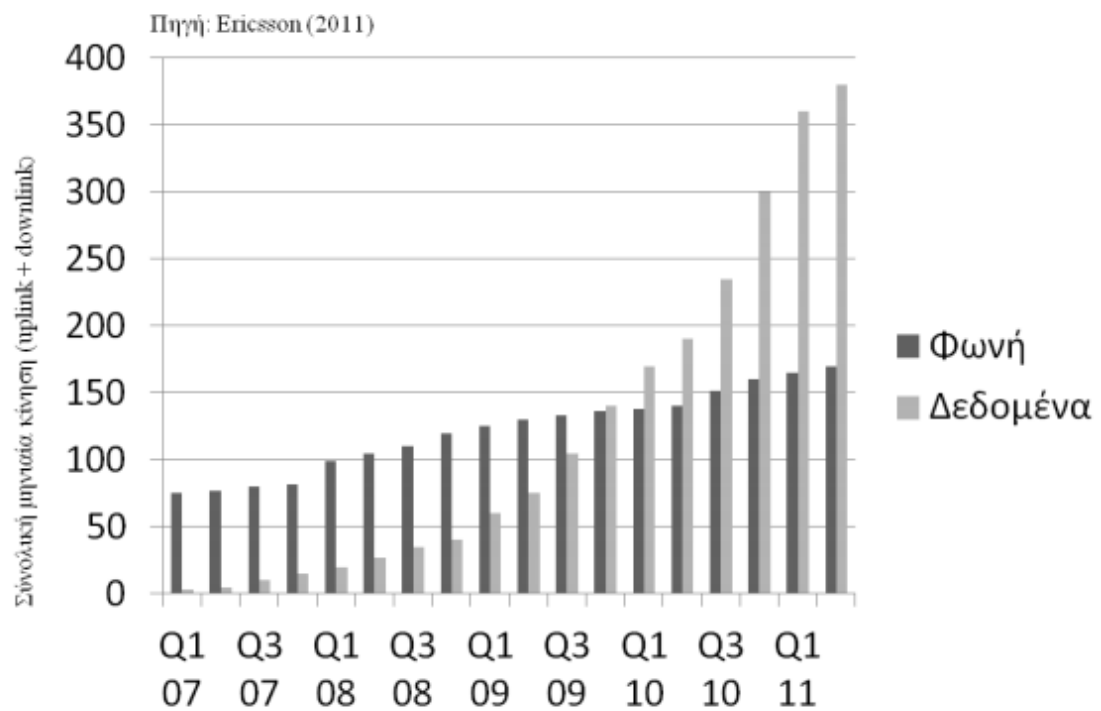
Πίνακας 1 : Τα χαρακτηριστικά των γενιών κινητής τηλεφωνίας

Τεχνολογία	1G	2G	3G
Εμφανίστηκε	1970	1980	1990
Εφαρμόστηκε	1981	1991	2001
Υπηρεσίες	Αναλογικές υπηρεσίες φωνής	Ψηφιακές υπηρεσίες φωνής, μηνύματα (SMS)	Μεγαλύτερη χωρητικότητα, ρυθμός δεδομένων έως 2Mbps
Πρότυπα	AMPS, ETACS, NMT κλπ.	TDMA, CDMA, GSM	WCDMA, CDMA-2000
Ρυθμός Δεδομένων	NA	14.4kbps	2Mbps
Πολυπλεξία	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA
Δίκτυο	PSTN	PSTN	Πακέτα Δικτύου

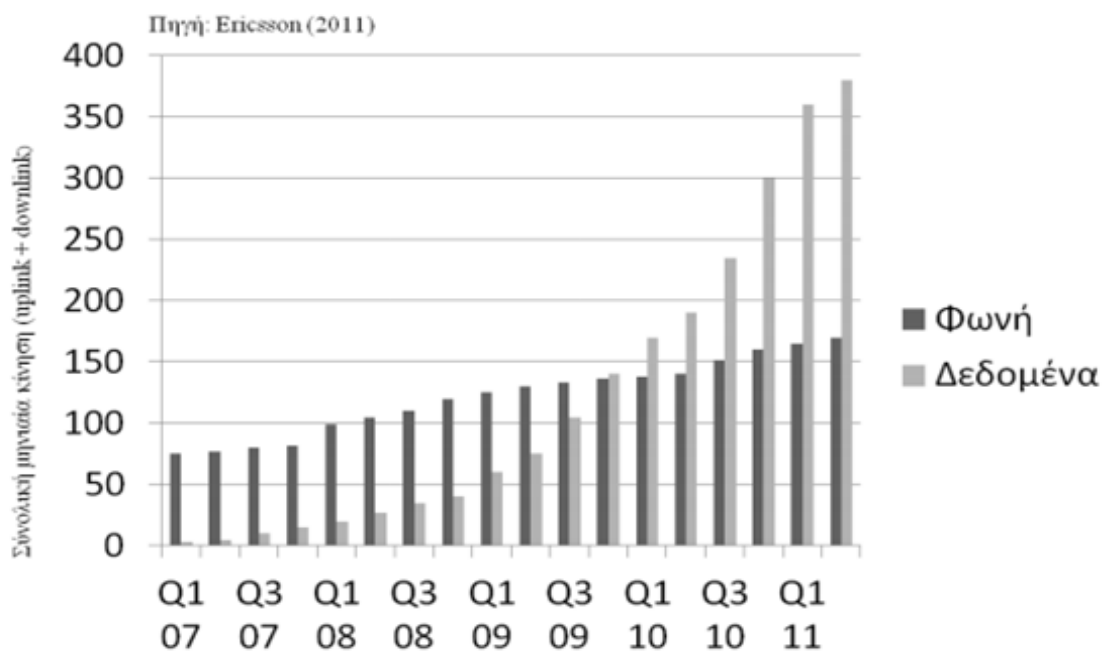
1.3 Η ανάγκη για το LTE

Για πολλά χρόνια, οι φωνητικές κλήσεις κυριάρχησαν την κίνηση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η ανάπτυξη των υπηρεσιών δεδομένων στα κινητά ήταν αρχικά αργή, αλλά με την πάροδο του χρόνου και μέχρι το 2010 η χρήση τους άρχισε να αυξάνεται δραματικά. Για να φανεί αυτό, η Εικόνα 3 δείχνει τις μετρήσεις από την Ericsson, της συνολικής κίνησης από τα δίκτυα σε όλο τον κόσμο, σε petabytes ανά μήνα. Ο αριθμός αυτός καλύπτει την περίοδο Ιανουάριος 2007-Ιούλιος 2011, διάστημα κατά το οποίο το ποσό των δεδομένων κίνησης αυξήθηκε κατά ένα συντελεστή πάνω από 100. Αυτή η τάση αναμένεται να συνεχιστεί. Για παράδειγμα, η Εικόνα 4 δείχνει τις

προβλέψεις από την Analysys Mason της αύξησης της κίνησης στην κινητή κατά την περίοδο 2011- 2016



Εικόνα 4 : Analysis Mason 1

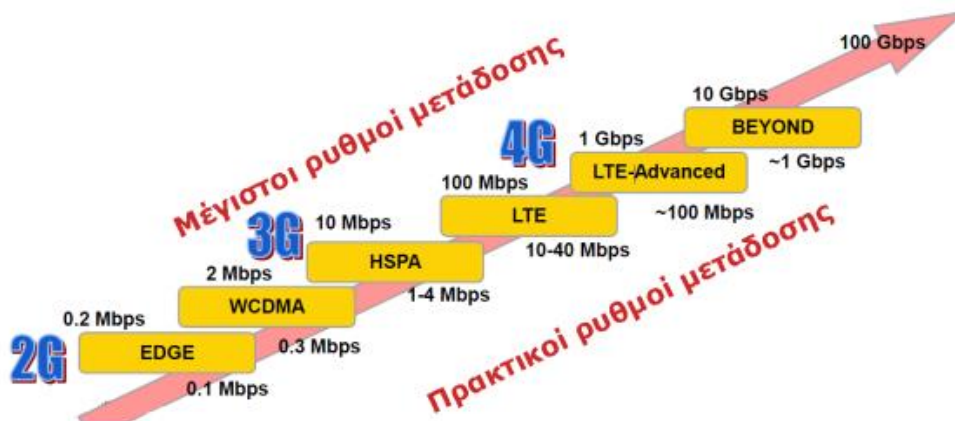


Εικόνα 5 : Analysis Mason 2

Εν μέρει, η αύξηση αυτή προήλθε από την αυξημένη διαθεσιμότητα των επικοινωνιακών τεχνολογιών 3.5G. Πιο σημαντικό όμως, ήταν η εισαγωγή του iPhone της Apple το 2007, ακολουθούμενο από συσκευές που βασίζονται στο λειτουργικό σύστημα Android της Google το 2008. Αυτά τα έξυπνα κινητά (smartphones) είναι πιο ελκυστικά και φιλικά στον χρήστη απ' ό,τι οι προκάτοχοί τους και έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίξουν τη δημιουργία εφαρμογών από τρίτους προγραμματιστές. Το αποτέλεσμα ήταν μια έκρηξη στη χρήση των κινητών εφαρμογών, η οποία αντικατοπτρίζεται στα διαγράμματα. Οι πάροχοι δικτύων κινητής τηλεφωνίας είχαν ήδη προσπαθήσει να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των υπηρεσιών δεδομένων κινητής με την εισαγωγή των συστημάτων χρέωσης στα οποία επιτρέπονται απεριόριστες λήψεις δεδομένων. Αυτό οδήγησε σε μια κατάσταση όπου ούτε οι χρήστες, ούτε οι προγραμματιστές είχαν την ανάγκη να περιορίσουν την κατανάλωση των δεδομένων τους. Ως εκ τούτου, τα δίκτυα 2G και 3G άρχισαν να παρουσιάζουν συμφόρηση από το 2010 και έπειτα, γεγονός το οποίο οδήγησε σε μια απαίτηση για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

1.4 Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία ανάπτυξη στην ασύρματη βιομηχανία. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών έχουν προκαλέσει ερευνητές και βιομηχανίες να καταλήξουν σε μια ολοκληρωμένη έκδοση της επερχόμενης τέταρτης γενιάς κινητών συστημάτων. Όπως δείχνει η ιστορία των κινητών επικοινωνιών, έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη τεχνολογιών σύμφωνα με ένα ενιαίο παγκόσμιο πρότυπο. Η πρώτη γενιά εκπλήρωσε τη βασική ανάγκη της κινητής φωνητικής τηλεφωνίας, ενώ η δεύτερη γενιά εισήγαγε της έννοιες της χωρητικότητας και της κάλυψης. Ακολουθεί η τρίτη γενιά, η οποία παρέχει δεδομένα σε υψηλότερες ταχύτητες και ανοίγει τις πύλες για την πραγματικά «Mobile Broadband» εμπειρία, η οποία θα πραγματοποιηθεί από τη τέταρτη γενιά. Τα δίκτυα 4G θα περιλαμβάνουν όλα τα συστήματα από διάφορα δίκτυα, τόσο δημόσια όσο και ιδιωτικά, από τα ευρυζωνικά δίκτυα των παρόχων στα ιδιωτικά και ad-hoc δίκτυα. Παράλληλα, τα 4G συστήματα θα λειτουργούν σε συνεργασία με τα 2G και 3G συστήματα, καθώς και με τα ψηφιακά ευρυζωνικά συστήματα πολυεκπομπής. Τέλος, τα συστήματα 4G θα είναι πλήρως βασισμένα σε IP, γεγονός το οποίο θα δίνει τη δυνατότητα για παροχή ευρέως φάσματος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών που μέχρι σήμερα υποστηρίζονταν μόνο από τα ενσύρματα δίκτυα.



Εικόνα 6 : Η εξέλιξη των κινητών δικτύων

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει με τον καλύτερο τρόπο την εξέλιξη των κινητών δικτύων, ξεκινώντας από την δεύτερη γενιά και καταλήγοντας στα μετά-4G κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Στην εικόνα, φαίνονται τόσο οι θεωρητικοί μέγιστοι όσο και οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης που πετυχαίνει κάθε τεχνολογία.

2 LTE ΚΑΙ LTE ADVANCED

2.1 Εισαγωγή στο LTE

Ο στόχος του LTE είναι η παροχή υψηλού ρυθμού δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και βελτιστοποιημένη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης πακέτων η οποία στηρίζει την ανάπτυξη ενός ευέλικτου εύρους ζώνης. Παράλληλα, η νέα αρχιτεκτονική του δικτύου έχει σχεδιαστεί με στόχο να υποστηρίζει την εναλλαγή πακέτων δεδομένων κίνησης με αδιάλειπτη κινητικότητα, την αυξημένη ποιότητα των υπηρεσιών και την ελάχιστη λανθάνουσα κατάσταση.

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος LTE που σχετίζονται με τη εναέρια διεπαφή (air interface) συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Το σύστημα αυτό υποστηρίζει ένα ευέλικτο εύρος ζώνης χάρη στο πρότυπο OFDMA και τα συστήματα πρόσβασης SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Εκτός από το FDD και το TDD, το ημι-αμφίδρομο FDD έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει UE (user equipments) χαμηλού κόστους. Στην ημι-αμφίδρομη λειτουργία FDD το UE δεν υποχρεούται να μεταδίδει και να λαμβάνει ταυτόχρονα. Αυτό αποφεύγει την ανάγκη για ένα δαπανηρό διπλέκτη (duplexer) στο UE. Το σύστημα είναι κατά κύριο λόγο βελτιστοποιημένο για χαμηλές ταχύτητες έως 15km/h. Ωστόσο, οι προδιαγραφές του συστήματος επιτρέπουν την υποστήριξη της κινητικότητας σε πάνω από 350 km/h με κάποια υποβάθμιση των επιδόσεων. Η πρόσβαση ανοδικής ζεύξης βασίζεται στον SC-FDMA που υπόσχεται αυξημένη κάλυψη ανοδικής ζεύξης λόγω του χαμηλού PAPR (Peak to Average Power Ratio) σε σχέση με τον OFDMA.

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά συστήματος LTE

Εύρος Ζώνης		1.25-20MHz
Πολυπλεξία		FDD, TDD, ημι-αμφίδρομη FDD
Κινητικότητα		350km/h
Πολλαπλή Πρόσβαση	Καθοδική ζεύξη	OFDMA
	Ανοδική ζεύξη	SC-FDMA
MIMO	Καθοδική ζεύξη	2x2, 4x2, 4x4
	Ανοδική ζεύξη	1x2, 1x4
Μέγιστος Ρυθμός Δε- δομένων στα 20MHz		173 και 326Mb/s για 2x2 και 4x4 MIMO αντί- στοιχα
		86Mb/s με 1x2 διαμόρφωση κεραίας
Διαμόρφωση		QPSK, 16-QAM και 64-QAM
Κωδικοποίηση Κανα- λιού		Turbo code
Άλλες Τεχνικές		Χρονοπρογραμματισμός ως προς το κανάλι, προσαρμογή ζεύξης, έλεγχος ισχύος, ICIC και υβριδική ARQ

Το σύστημα υποστηρίζει μέγιστο ρυθμό καθοδικής ζεύξης στα 326 Mb/s με 4 × 4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) και εύρος ζώνης στα 20MHz. Επειδή στην πρώτη έκδοση του προτύπου LTE δεν χρησιμοποιείται MIMO στην ανοδική ζεύξη, οι ταχύτητες ανοδικής ζεύξης περιορίζονται στα 86Mb/s σε εύρος ζώνης των 20MHz. Επιπλέον, με την βελτίωση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων, το σύστημα LTE παρέχει δύο έως τέσσερις φορές υψηλότερη κυβελωτή φασματική απόδοση σε σχέση με το σύστημα HSPA 6. Ανάλογες βελτιώσεις που παρατηρήθηκαν είναι στην απόδοση των cell edge διατηρώντας τις ίδιες θέσεις όπως έχουν αναπτυχθεί για HSPA. Σε ότι αφορά την καθυστέρηση, η διεπαφή και το δίκτυο του LTE παρέχουν δυνατότητες για καθυστέρηση λιγότερη των 10ms στη μετάδοση ενός πακέτου από το δίκτυο στο UE.

2.2 Οι προδιαγραφές της 3GPP για το LTE

Η 3GPP παρήγαγε τις προδιαγραφές του LTE με τον ίδιο τρόπο όπως και για το UMTS και το GSM. Είναι οργανωμένα σε εκδόσεις, κάθε μία από τις οποίες περιέχει ένα σταθερό και σαφώς καθορισμένο σύνολο λειτουργιών. Η χρήση των εκδόσεων επιτρέπει στους κατασκευαστές την κατασκευή συσκευών που χρησιμοποιούν ορισμένα ή όλα τα χαρακτηριστικά των προηγούμενων εκδόσεων, ενώ η 3GPP συνεχίζει να προσθέτει νέα χαρακτηριστικά στο σύστημα σε νεότερες εκδόσεις. Σε κάθε έκδοση, οι προδιαγραφές

εξελίσσονται μέσα από μια σειρά διαφορετικών εκδόσεων. Νέες λειτουργίες μπορούν να προστεθούν σε νεότερες εκδόσεις, μέχρι την ημερομηνία κατά την οποία η έκδοση θα σταματήσει να εξελίσσεται. Μετέπειτα, οι μόνες αλλαγές που μπορούν να γίνουν αφορούν την τελειοποίηση των τεχνικών λεπτομερειών, δηλαδή διορθώσεις και διευκρινίσεις.

Ο Πίνακας 4 παραθέτει τις εκδόσεις που χρησιμοποίησε η 3GPP από την εισαγωγή του UMTS, μαζί με τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της κάθε έκδοσης. Αξίζει να ση-μειωθεί ότι το σύστημα αρίθμησης άλλαξε μετά το Release 99, έτσι ώστε οι επόμενες εκδόσεις να αριθμούνται από το 4 έως το 11.

Πίνακας 3 : Εκδόσεις προδιαγραφών της 3GPP για το UMTS και το LTE.

Έκδοση	Ημερομηνία διακοπής περαιτέρω ανάπτυξης	Νέα Χαρακτηριστικά
R99	Μάρτιος 2000	WCDMA
R4	Μάρτιος 2001	TD-SCDMA
R5	Ιούνιος 2002	HSDPA, υποσύστημα πολυ-μέσων IP
R6	Μάρτιος 2005	HSUPA
R7	Δεκέμβριος 2007	Βελτιώσεις του HSUPA
R8	Δεκέμβριος 2008	LTE, SAE
R9	Δεκέμβριος 2009	Βελτιώσεις του LTE και του SAE
R10	Μάρτιος 2011	LTE-Advanced
R11	Σεπτέμβριος 2012	Βελτιώσεις του LTE-Advanced

Το LTE εισήχθη για πρώτη φορά στην 8η έκδοση, η οποία παγιώθηκε τον Δεκέμβριο του 2008. Αυτή η έκδοση περιέχει τα περισσότερα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του LTE. Μολαταύτα, για τον καθορισμό του Release 8 η 3GPP παραλείπει μερικά από τα λιγότερο σημαντικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά συμπεριλήφθηκαν τελικά στο Release 9. Το Release 10 περιλαμβάνει τις επιπλέον δυνατότητες που απαιτούνται για το LTE-Advanced. Η 3GPP συνέχισε επίσης να προσθέσει νέα χαρακτηριστικά για το UMTS σε όλα τα Releases 8 έως 11. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου που συνεχίζουν να χρησιμοποιούν το UMTS να παραμένουν ανταγωνιστικοί, ενώ ακόμη και άλλοι φορείς κινούνται πάνω σε LTE. Οι προδιαγραφές επίσης είναι οργανωμένες σε αρκετές σειρές, κάθε μία από τις οποίες καλύπτει ένα συγκεκριμένο συστατικό του συστήματος. Ο [38, 53] Πίνακας 4 συνοψίζει τα περιεχόμενα των σειρών 21 έως 37, τα οποία περιέχουν όλες τις προδιαγραφές για το LTE και το UMTS, καθώς και τις προδιαγραφές που είναι κοινές σε LTE, UMTS και GSM. Μέσα σε αυτές τις σειρές, η κατανομή μεταξύ των δια-φόρων συστημάτων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό. Η σειρά 36 είναι αφιερωμένη στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και τη λήψη σε LTE και αποτελεί σημαντική πηγή πληροφοριών. Στην άλλη σειρά,

κάποιες προδιαγραφές ισχύουν για τις UMTS και μόνο, άλλες για να LTE μόνο και κάποιες και για τα δύο, έτσι είναι δύσκολο να διαπιστωθεί ποιες προδιαγραφές είναι οι σχετικές. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, θα αναφερθούν όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν.

Ένα παράδειγμα αριθμού προδιαγραφών είναι το TS 23.401 v 8.13.0. Το TS ξεχωρίζει για την τεχνική προδιαγραφή (technical support), το 23 είναι ο αριθμός σειράς και το 401 είναι ο αριθμός των προδιαγραφών εντός της εν λόγω σειράς, το 8 είναι ο αριθμός έκδοσης, το 13 είναι ο αριθμός της τεχνικής έκδοσης εντός αυτής της έκδοσης και το τελικό 0 είναι ένας συντακτικός αριθμός έκδοσης που κατά καιρούς αυξάνεται για τις όποιες μη τεχνικές αλλαγές. Η 3GPP παράγει επίσης τεχνικές εκθέσεις, που συμβολίζονται με TR (technical reports), οι οποίες είναι καθαρά ενημερωτικού χαρακτήρα και έχουν τριψήφιους αριθμούς προδιαγραφών αρχίζοντας με ένα 8 ή 9.

Τέλος, κάθε προδιαγραφή ανήκει σε μία από τις επόμενες τρεις κατηγορίες. Προδιαγραφές τύπου Stage 1 (Στάδιο 1) ορίζουν την υπηρεσία από την πλευρά του χρήστη και βρίσκονται αποκλειστικά στη σειρά 22. Οι προδιαγραφές τύπου Stage 2 ορίζουν την αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου και τη λειτουργία του συστήματος, και βρίσκονται κυρίως (αλλά όχι αποκλειστικά) στη σειρά 23. Οι προδιαγραφές Stage 3 καθορίζουν όλες τις λειτουργικές λεπτομέρειες. Οι προδιαγραφές Stage 2 είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την επίτευξη υψηλού επιπέδου κατανόηση του συστήματος. Οι πιο χρήσιμες για το LTE είναι τα TS 23.401 και τα TS 36.300, οι οποίες καλύπτουν αντίστοιχα, τον εξελιγμένο πυρήνα των πακέτων και την εναέρια διεπαφή. Υπάρχει ωστόσο, μια σημαντική διευκρίνιση: οι προδιαγραφές αυτές αντικαταστάθηκαν αργότερα και δεν μπορεί να γίνει επίκληση τους για την πλήρη ακρίβεια. Αντιθέτως, οι λεπτομέρειες θα πρέπει να ελεγχθούν εάν είναι απαραίτητο στις σχετικές προδιαγραφές του Stage 3.

Οι επιμέρους προδιαγραφές μπορούν να μεταφορτωθούν από τις προδιαγραφές στην αριθμημένη ιστοσελίδα της 3GPP ή από το FTP διακομιστή του. Ο δικτυακός τόπος 3GPP έχει επίσης περιλήψεις από τα χαρακτηριστικά που καλύπτονται σε κάθε έκδοση.

Πίνακας 4 : Οι προδιαγραφές του 3GPP για τις σειρές που χρησιμοποιούν το UMTS και το LTE.

Σειρά	Σκοπός
21	Απαιτήσεις υψηλού επιπέδου
22	Στάδιο 1 των προδιαγραφών της υπηρεσίας
23	Στάδιο 1 των προδιαγραφών και της αρχιτεκτονικής της υπηρεσίας
24	Πρωτόκολλα μη πρόσβασης στρώματος
25	WCDMA και TD-SCDMA εναέριας διεπαφής και δίκτυο ασύρματης πρόσβασης
26	Κωδικοποιητές
27	Εξοπλισμός τερματικού δεδομένων
28	Παράλληλη ελεύθερη λειτουργία των κωδικοποιητών ομιλίας
29	Πρωτόκολλα για τον πυρήνα του δικτύου
30	Διαχείριση του προγράμματος
21	UTCC και USIM
32	Λειτουργίες, διαχείριση, συντήρηση, τροφοδότηση και φόρτιση
33	Ασφάλεια
34	Έλεγχος προδιαγραφών του UE
35	Αλγόριθμοι ασφάλειας
36	LTE εναέριας διεπαφής και δίκτυο ασύρματης πρόσβασης
37	Πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης

2.3 Η εξέλιξη στο 4G

Τα χαρακτηριστικά διεπαφής για το Mobile WiMAX και το UMB είναι πολύ παρόμοια με εκείνα του LTE δίδονται στον Πίνακα 3. Και τα τρία συστήματα υποστηρίζουν ευέλικτο εύρος ζώνης, FDD/TDD, OFDMA στην καθοδική ζεύξη και συστήματα MIMO. Υπάρχουν όμως μερικές διαφορές, για παράδειγμα στην ανοδική ζεύξη το LTE βασίζεται στην SC-FDMA σε σχέση με την OFDMA στο Mobile WiMAX και στο UMB. Η απόδοση των τριών συστημάτων, ως εκ τούτου αναμένεται να είναι εφάμιλλη με μικρές διαφορές. Παρόμοια με την πρωτοβουλία IMT-2000, η ITU-R Working Party 5D έχει δηλώσει τις απαιτήσεις για τα IMT-advanced συστήματα. Μεταξύ άλλων, οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν μέσες ταχύτητες δεδομένων καθοδικής ζεύξης 100 Mbit/s στο ευρείας περιοχής δίκτυο και μέχρι 1 Gbit/s για τοπική πρόσβαση ή για σενάρια χαμηλής κινητικότητας. Επίσης κατά το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοεπικοινωνιών 2007 (WRC-2007), προσδιορίστηκε ένα νέο φάσμα για τα συστήματα IMT στα 428MHz, τα οποία περιλαμβάνουν επίσης ένα φάσμα στα 136MHz το οποίο διατίθεται σε παγκόσμια βάση. Τόσο η 3GPP όσο και η IEEE 802LMSC αναπτύσσουν ενεργά δικά τους πρότυπα προς υποβολή στην IMT-advanced. Ο στόχος τόσο του LTE-Advanced (v8.0.0, 2012) όσο και του IEEE 802.16m (IEEE, 2007) είναι να

ενισχύσουν περαιτέρω τη φασματική απόδοση και την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων του συστήματος, ενώ υποστηρίζουν συμβατότητα προς τα πίσω με τις αντίστοιχες προηγούμενες κυκλοφορίες τους. Ως μέρος των εξελίξεων του LTE-Advanced και του IEEE 802.16, συζητιούνται αρκετές βελτιώσεις συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης για μεγαλύτερο εύρος ζώνης από 20 MHz και ανώτερης τάξης MIMO έτσι ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις του IMT-advanced.

2.4 Εισαγωγή στο LTE-ADVANCED

Ο σχεδιασμός του LTE πραγματοποιήθηκε ως μια πρωτοβουλία της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ITU βοήθησε να οδηγήσει την ανάπτυξη των τεχνολογιών 3G, δημοσιεύοντας μια σειρά από απαιτήσεις για ένα σύστημα κινητής επικοινωνίας 3G, με το IMT2000. Τα 3G συστήματα που σημειώθηκαν νωρίτερα είναι σήμερα αποδεκτά από την ITU ως ανταποκρινόμενα στις απαιτήσεις για το IMT-2000.

Η ITU ξεκίνησε μια παρόμοια διαδικασία το 2008, δημοσιεύοντας μια σειρά από προϋποθέσεις για μια τέταρτη γενιά (4G) συστημάτων επικοινωνίας με το όνομα IMT-advanced όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις αυτές, ο ρυθμός δεδομένων ενός συμβατού συστήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 600Mbps στην κάτω ζεύξη και 270Mbps στην άνω ζεύξη, σε ένα εύρος ζώνης στα 40MHz. Μπορούμε να δούμε αμέσως ότι τα στοιχεία αυτά υπερβαίνουν τις δυνατότητες του LTE

2.4.1 Οι απαιτήσεις του LTE-ADVANCED

Καθοδηγούμενη από τις απαιτήσεις της ITU για το IMT-advanced, η 3GPP άρχισε να μελετά πώς να ενισχύσει τις δυνατότητες του LTE. Το κύριο συμπέρασμα από τη μελέτη ήταν οι προδιαγραφές για ένα σύστημα που είναι γνωστό ως LTE-Advanced, στην οποία οι κύριες απαιτήσεις είχαν ως εξής.

Το LTE-Advanced ήταν υποχρεωμένο να παραδώσει ένα μέγιστο ρυθμό δεδομένων στα 1000Mbps στην καθοδική ζεύξη και 500Mbps στην ανοδική ζεύξη. Στην πράξη, το σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί τελικά να παραδώσει μέγιστους ρυθμούς δεδομένων των 3.000 και 1.500Mbps αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ένα συνολικό εύρος ζώνης των 100MHz που γίνεται από πέντε ξεχωριστές συνιστώσες των 20MHz έκαστο. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία αυτά είναι ανέφικτα σε οποιοδήποτε ρεαλιστικό σενάριο.

Οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν επίσης στόχους για την αποδοτικότητα του φάσματος σε ορισμένα σενάρια δοκιμών. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα στοιχεία για WCDMA συνεπάγεται μια φασματική απόδοση 4,5 έως 7 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του Release 6 WCDMA στην καθοδική ζεύξη και 3,5 έως 6 φορές μεγαλύτερη στην ανοδική ζεύξη. Τέλος, το LTE-Advanced έχει σχεδιαστεί για να είναι συμβατό με το LTE, υπό την έννοια ότι ένα LTE κινητό μπορεί να επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης που λειτουργεί με LTE-Advanced και αντίστροφα.

Το LTE-Advanced είναι η εξελικτική πορεία από το LTE Release 8. Τέτοια συστήματα παρέχουν πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα τηλεπικοινωνιακών

υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων των προηγμένων υπηρεσιών κινητής, που υποστηρίζονται από κινητά και σταθερά δίκτυα, τα οποία βασίζονται όλο και περισσότερο σε πακέτα μεταγωγής. Όπως αναφέρθηκε το LTE Release 8 δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις του IMT-Advanced και απαιτείται τεχνολογία πέρα του Release 8 ως εκ τούτου, το LTE-Advanced έχει σχεδιαστεί για να ανταποκριθεί και να υπερβεί αυτές τις απαιτήσεις του IMT-Advanced, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 6. Αυτές οι απαιτήσεις ικανοποιούνται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων της συνάθροισης των φερόντων σημάτων, της DL χωρικής πολυπλεξίας χρησιμοποιώντας 8-MIMO, τη μετάδοση και λήψη με DL COMP και τη UL χωρική πολυπλεξία χρησιμοποιώντας 4-MIMO.

Εκτός από την βελτίωση στην φασματική απόδοση, είναι επίσης στοχευμένη η μείωση της λανθάνουσας κατάστασης. Οι στόχοι είναι να μειωθεί ο χρόνος μετάβασης από την κατάσταση αδράνειας στην συνδεδεμένη κατάσταση από 100ms που είναι στο LTE σε λιγότερο από 50ms στο LTE-Advanced. Ομοίως, η μετάβαση από ανενεργή στην ενεργό κατάσταση θα πρέπει να μειωθεί από τα 50ms που είναι στο LTE σε λιγότερο από 10ms στο LTE-Advanced.

Επίσης μπορεί να επιτευχθεί ενίσχυση της κάλυψης και της χωρητικότητας χρησιμοποιώντας ένα ετερογενές δίκτυο, το οποίο είναι μια συλλογή κόμβων χαμηλής ισχύος η οποία διανέμεται σε ένα μακροκυψελλωτό ομοιογενές δίκτυο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κόμβων χαμηλής ισχύος, συμπεριλαμβανομένων τις μικροκυψέλλες, τις pico κυψέλες, τις femto κυψέλες και τους μεταγωγείς. Αυτοί οι κόμβοι χαμηλής χρησιμοποιούνται σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των hot spots, τα σπίτια, τις επιχειρήσεις, και τις τοποθεσίες με χαμηλή γεωμετρία έτσι ώστε να βελτιωθεί η συνολική χωρητικότητα και η κάλυψη του συστήματος.

Πίνακας 5 : Στόχοι LTE-Advanced πλήρως συμφορισμένου buffer.

Περιβάλλον	Στόχοι καθοδικής ζεύξης του LTE-Advanced		Στόχοι ανοδικής ζεύξης του LTE-Advanced	
	Τομέας (b/s/Hz)	Όριο κυψέλης (b/s/Hz)	Τομέας (b/s/Hz)	Όριο κυψέλης (b/s/Hz)
Εσωτερικοί χώροι				
Μικροκυψέλλες	3	0.1	2.25	0.07
Βασική αστική κάλυψη	2.6	0.075	1.80	0.05
Υψηλή Ταχύτητα	2.2	0.06	1.4	0.03
Μέγιστη φασματική απόδοση		15		6.75

2.4.2 Συστήματα 4^{ης} Γενιάς (4G)

Μετά την υποβολή και αξιολόγηση των προτάσεων, η ITU ανακοίνωσε τον Οκτώβριο του 2010 ότι τα δύο συστήματα πληρούν τις απαιτήσεις του IMT-advanced. Ένα σύστημα ήταν το LTE-Advanced, ενώ το άλλο ήταν μια

βελτιωμένη έκδοση του WiMAX στο πλαίσιο της IEEE 802.16m προδιαγραφής, γνωστό ως mobile WiMAX 2.0.

Η Qualcomm είχε αρχικά ως στόχο την ανάπτυξη ενός διαδόχου 4G για το CDMA2000 με την ονομασία UMB. Ωστόσο, το σύστημα αυτό δεν διέθετε δύο από τα πλεονεκτήματα που είχε ο προκάτοχός του. Πρώτον, δεν ήταν συμβατό με το CDMA2000, με τον τρόπο που είχε το CDMA2000 με το IS-95. Και δεύτερον, δεν ήταν πλέον το μόνο σύστημα που θα μπορούσε να λειτουργήσει στα στενά εύρη ζώνης που κυριαρχούν στη Βόρεια Αμερική, λόγω της εύκαμπτης υποστήριξης του εύρους ζώνης του LTE. Χωρίς να έχουν κανένα επιτακτικό λόγο για να το πράξουν, κανένας πάροχος δικτύου δεν ανακοίνωσε ποτέ ότι σχεδιάζει να υιοθετήσει την τεχνολογία και το σχέδιο εγκαταλείφθηκε το 2008. Αντ' αυτού, οι περισσότεροι πάροχοι που χρησιμοποιούσαν το CDMA2000 αποφάσισαν να στραφούν στο LTE.

Αυτό οδήγησε σε μία κατάσταση όπου υπήρχαν δύο εναπομείναντες τεχνολογίες για κινητές επικοινωνίες 4G, το LTE και το WiMAX. Από αυτές, το LTE έχει μακράν την μεγαλύτερη υποστήριξη μεταξύ των παρόχων δικτύων και των κατασκευαστών εξοπλισμού και είναι πιθανό να είναι κυρίαρχη τεχνολογία της κινητής επικοινωνίας στον κόσμο για τα επόμενα χρόνια.

2.5 Η έννοια του 4G

Αρχικά, η ITU προόριζε πως ο όρος 4G θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για συστήματα που πληρούν τις απαιτήσεις του IMT-Advanced. Το σύστημα LTE όμως δεν χρησιμοποίησε mobile WiMAX 1.0 (IEEE 802.16e). Εξαιτίας αυτού, η επιστημονική κοινότητα ήρθε να περιγράψει αυτά τα συστήματα ως 3.9G. Αυτές οι εκτιμήσεις ωστόσο, δεν σταμάτησαν την κοινότητα του μάρκετινγκ να περιγράφει το LTE και το mobile WiMAX 1.0 σαν τεχνολογίες 4G. Παρά το γεγονός ότι η περιγραφή αυτή δεν ήταν δικαιολογημένη από την άποψη των επιδόσεων, στην πραγματικότητα όμως υπήρξε κάποια λογική σε αυτό καθώς υπάρχει σαφής τεχνική μετάβαση στη μετάβαση από το UMTS στο LTE, η οποία δεν υπάρχει στην κίνηση από το LTE να LTE-Advanced.

Μετά από λίγο καιρό αποδέχτηκε η ITU την περιγραφή αυτή. Για την ακρίβεια τον Δεκέμβριο του 2010, η ITU έδωσε την άδεια της για τη χρήση του 4G στο να περιγράψει το LTE και το mobile WiMAX 1.0, αλλά και σε κάθε άλλη τεχνολογία η οποία θα έχει σημαντικά καλύτερη απόδοση από τα προηγούμενα συστήματα 3G. Δεν έχουν καθορίσει τι εννοούν ακριβώς λέγοντας «σημαντικά καλύτερη», αλλά εμείς απλά πρέπει να γνωρίζουμε ότι το LTE είναι ένα 4G σύστημα κινητής επικοινωνίας.

2.6 Η εξέλιξη από το UMTS στο LTE.

Μετά την έκδοση 99, το 3GPP μετά από ένα χρόνο σταμάτησε την ονοματοδοσία εκδόσεων και επέλεξε ένα νέο σχήμα που ξεκίνησε με την έκδοση 4. Η έκδοση 4 παρουσίασε την 1.28 Mcps περιορισμένης ζώνης έκδοση του W-CDMA γνωστή ως Time Domain Synchronous Code Division

Multiple Access (TD-SCDMA). Μετά από αυτό ήταν η έκδοση 5 στην οποία το High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) εισήγαγε τις packet-based υπηρεσίες δεδομένων στο UMTS με τον ίδιο τρόπο που το GPRS έκανε για το GSM στην έκδοση 97.

Πίνακας 6 : Εκδόσεις 99,4,5,6,7,8

Release	Functional freeze	Main UMTS feature of release
Rel-99	March 2000	Basic 3.84 Mcps W-CDMA (FDD & TDD)
Rel-4	March 2001	1.28 Mcps TDD (aka TD-SCDMA)
Rel-5	June 2002	HSDPA
Rel-6	March 2005	HSUPA (E-DCH)
Rel-7	December 2007	HSPA+ (64QAM downlink, MIMO, 16QAM uplink) LTE and SAE feasibility study
Rel-8	December 2008	LTE work item – OFDMA/SC-FDMA air interface SAE work item – new IP core network Further HSPA improvements

Η ολοκλήρωση των πακέτων δεδομένων για το UMTS επιτεύχθηκε στην έκδοση 6 με την προσθήκη του High Speed Uplink Packet Access (HSUPA), αν και ο επίσημος όρος για αυτή την τεχνολογία είναι Enhanced Dedicated Channel (E-DCH). Το HSDPA και HSUPA είναι πλέον γνωστά ως High Speed Packet Access (HSPA).

Η έκδοση 7 περιείχε την πρώτη εργασία πάνω στο LTE/SAE με την ολοκλήρωση των μελετών σκοπιμότητας και τις περαιτέρω βελτιώσεις που έγιναν στο HSPA όπως η κατερχόμενη σύνδεση MIMO, 64QAM στην κατερχόμενη σύνδεση και 16QAM στην ανερχόμενη σύνδεση.

Η έκδοση 8 συνεχίζει να εξελίσσεται με την προσθήκη μικρότερων χαρακτηριστικών όπως το dual cell HSDPA και 64QAM με MIMO. Η κύρια εργασία της έκδοσης 8 ωστόσο είναι η προδιαγραφή των LTE και SAE.

Η εργασία πέρα από την έκδοση 8 είναι υπό εξέλιξη με την οποία το LTE θα ενισχυθεί με την έκδοση 10 και προωθείται ως LTE-Advanced, μια υποψήφια τεχνολογία για την διεθνή ένωση τηλεπικοινωνιών (ITU) το πρόγραμμα IMT-Advanced, γνωστό ως 4G.

2.7 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).

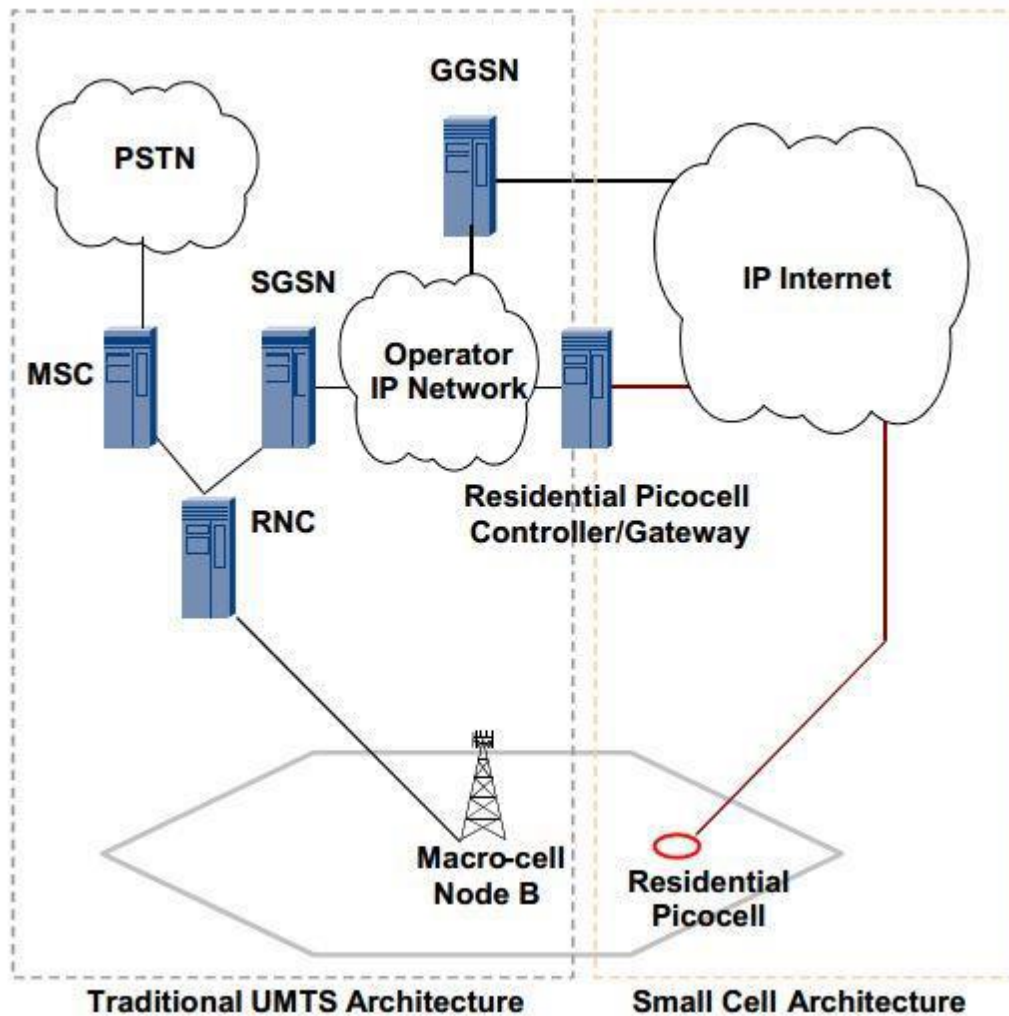
4. Home Subscriber Server (HSS): Είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές του δικτύου.

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 εξασφαλιστούν, 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 στην εικόνα 5 που ακολουθεί.



Εικόνα 7 : Αντιπαράβολή των Αρχιτεκτονικών Macrocell-Picocell

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,

ενώσω 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 4ης 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 5ης γενιάς, δηλαδή πολύ μικρό latency, υ-ψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, δυναμική δέσμευση και διάθεση πόρων, πρέπει να πραγματοποιήσουμε δραστικές αλλαγές στα cellular δίκτυα τόσο στις υποδομές όσο και στην αρχιτεκτονική τους .

3 ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5^{ης} ΓΕΝΙΑΣ

3.1 Γενική εισαγωγή

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 5ης γενιάς cellular δίκτυα. Τα δίκτυα 5ης 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 5ης 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 πηγαίνει 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 5ης γενιάς με δυνατότητες όπως flexibility, programmability, μειωμένα κεφαλαιακά και λειτουργικά κόστη, καθώς και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα 8 : Τα τρία «κύματα» των μελλοντικά συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο 5G

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 υπόψιν 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 μπάνας 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 4ης 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.

3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και νέες τεχνολογίες

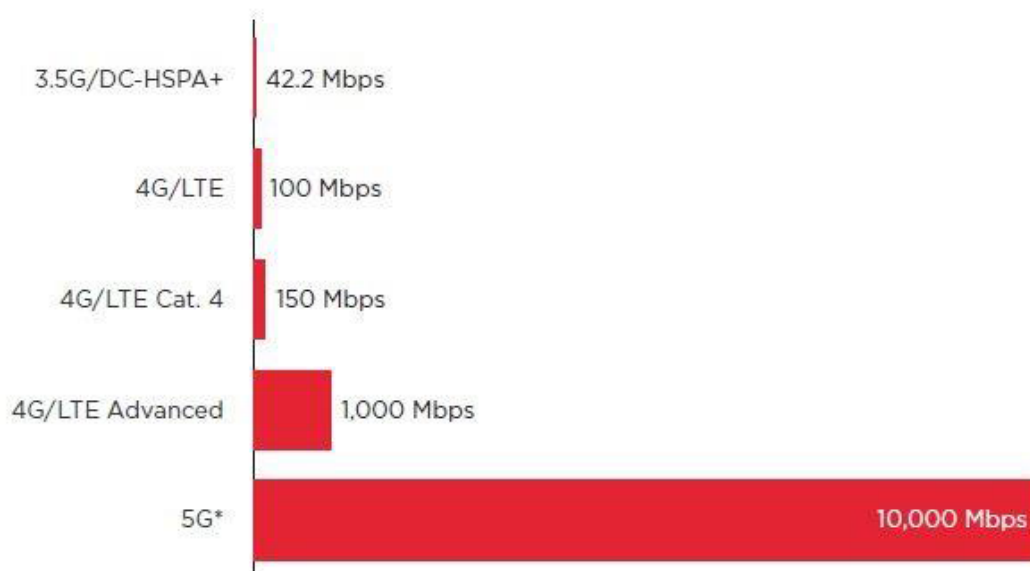
Το 5GPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) είναι ένας οργανισμός ο οποίος αποτελεί μια συντονισμένη ευρωπαϊκή προσπάθεια της ICT βιομηχανίας για να συνεισφέρει στην έρευνα για τη νέα εποχή των ICT υποδομών, προκειμένου να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην

παγκόσμια αγορά [27]. Σύμφωνα λοιπόν με το 5GPPP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς οι στόχοι των δικτύων 5ης 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/km².

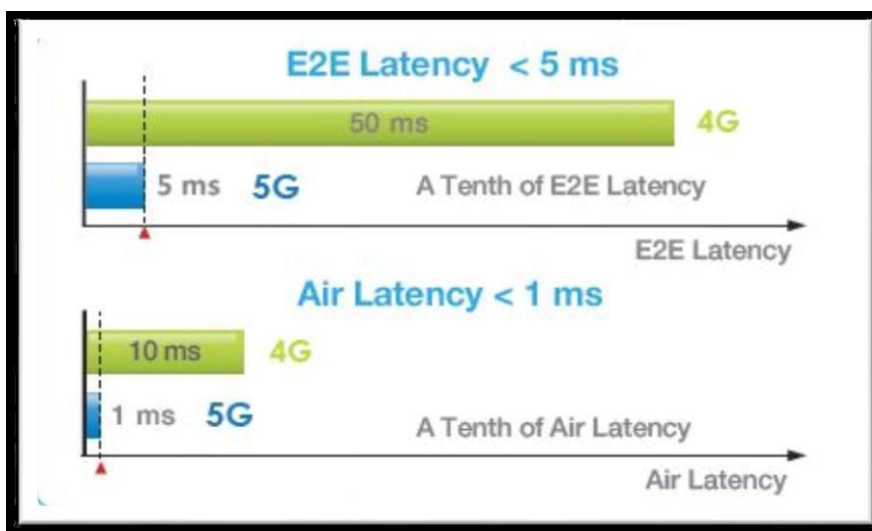
Μεγάλη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο. Υπολογίζεται ότι θα έχουμε 1.000.000 συνδεδεμένα τερματικά ανά km².

Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, πιάνοντας ταχύτητες από 1-10 Gb/s. Στην εικόνα 7, παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των προηγούμενων τεχνολογιών σε σχέση με το 5G.



Εικόνα 9 : Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps

- 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 στην εικόνα 8.

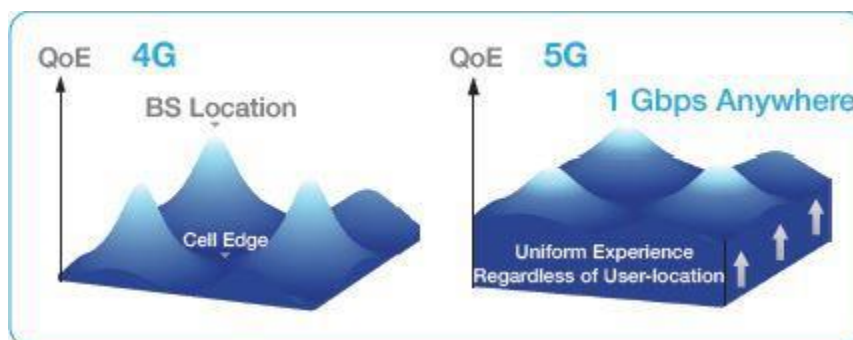


Εικόνα 10 : Σύγκριση του latency μεταξύ του δικτύου 4G και της πρόβλεψης για το 5G

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 5ης 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 στην εικόνα 9. 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.



Εικόνα 11 : Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη

Multi-tenancy: Τα δίκτυα 5ης 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 5ης 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.

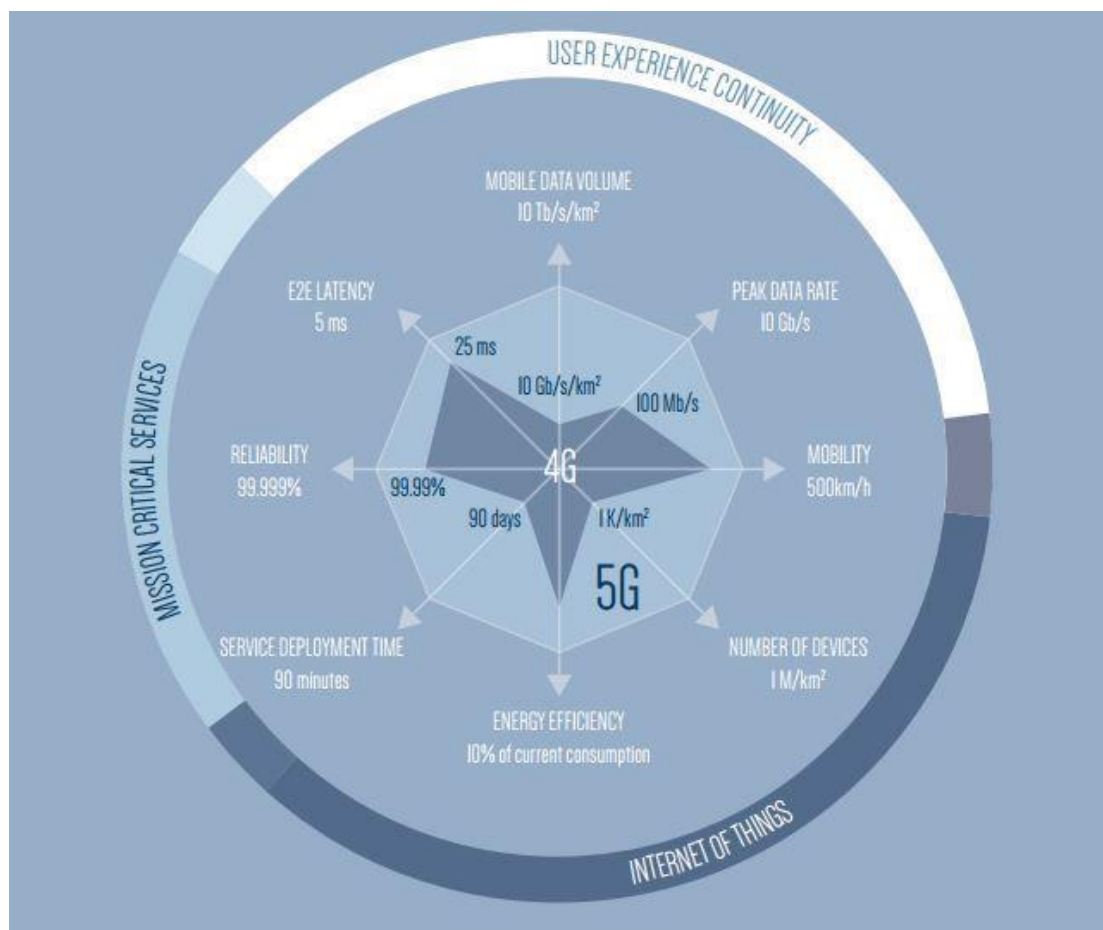
□ **Resource management:** Στα δίκτυα 5ης γενιάς είναι απαραίτητη η δυναμική δέσμευση πόρων (εύρος ζώνης, μνήμη, επεξεργαστική ισχύ) αναλόγως την υπηρεσία (π.χ. network, data κλπ.) και αναλόγως την περίπτωση κάθε φορά (π.χ. σε περίπτωση αυξημένης κίνησης), έτσι ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα και έλεγχο για τον βέλτιστο διαμορισμό 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 κεφαλαιακό 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 5ης 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 5ης 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].

Στην εικόνα 10, παρατίθεται ένα radar chart που απεικονίζει τις θεωρητικές δυνατότητες του 5G εν συγκρίσει με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G.



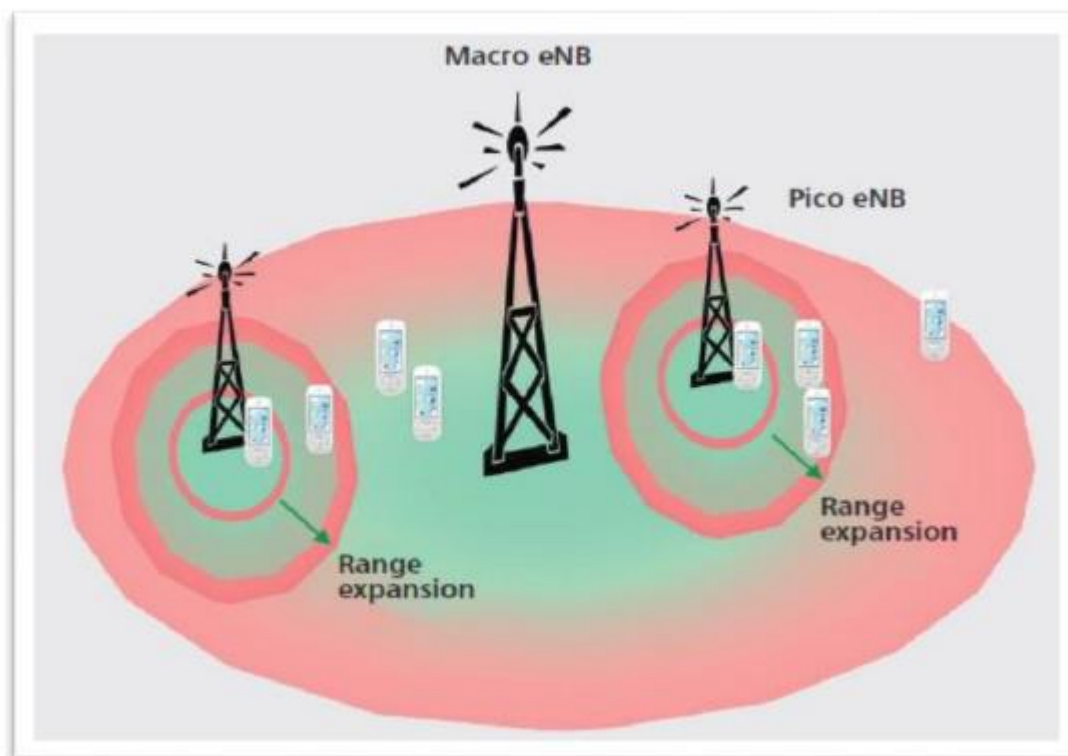
Εικόνα 12 : Radar Chart των θεωρητικών δυνατοτήτων του 5G

3.3 Το πρόβλημα του φάσματος

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 5ης 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. Στην εικόνα 11 που ακολουθεί, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επεκτείνουμε την κάλυψη ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification. Κατά την χωρική πύκνωση (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 πύκνωση χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τα 500 Mhz ως τις υπερχαμηλές συχνότητες (30-300Mhz) [16].



Εικόνα 13 : Επέκταση της κάλυψης ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification

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 προαπαιτούμενο 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 πύκνωσης 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 κλασσική 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 CO₂ 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.

3.4 Οργανισμός ETSI – 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].

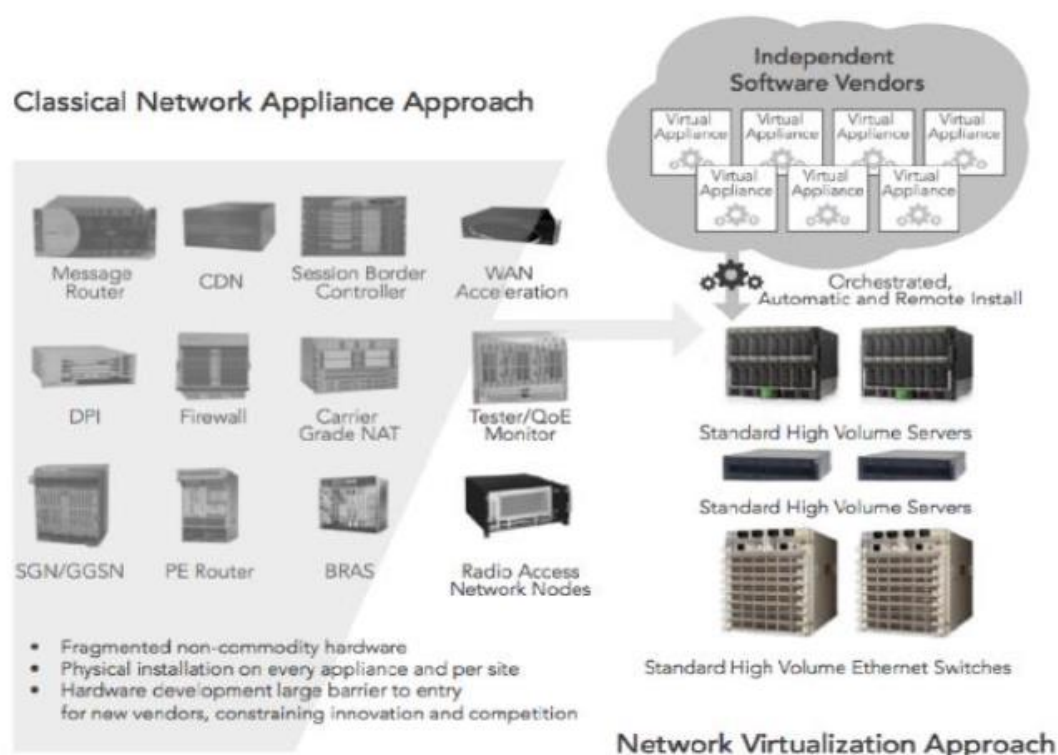
Τα δίκτυα, εξελίσσονται προς ένα πολύ δυναμικό και ευέλικτο περιβάλλον που θα αποτελούνται από εικονικούς πόρους (virtual resources), οι οποίοι θα μπορούν να δημιουργούνται στιγμιαία και να παρέχονται κατ' απαίτηση του πελάτη προκειμένου να αναπτύξει τις υπηρεσίες του ή κατ' απαίτηση του παρόχου προκειμένου 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 5ης 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]:

3.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

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.



Εικόνα 14 : Παραδείγματα Network Functions Virtualization

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]:

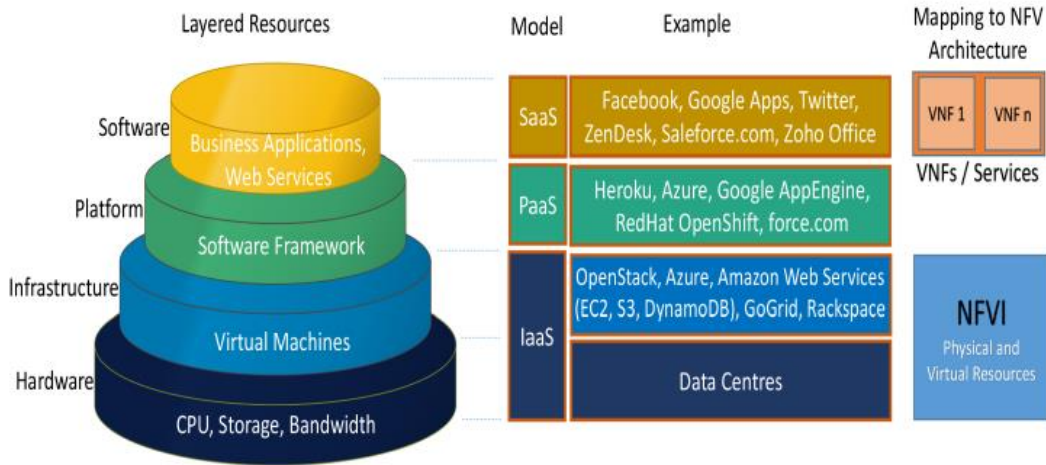
- Αποσύνδεση του Software με το Hardware: Εφόσον τα στοιχεία του δικτύου πλέον δεν θα αποτελούνται από μία σύνθεση ειδικού hardware και software, η υλοποίηση και η εξέλιξη του καθενός θα είναι ανεξάρτητη από του άλλου. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη διαφορετικών χρονοδιαγραμμάτων για την εγκατάσταση και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

3.4.2 Αρχιτεκτονική – Οφέλη

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 στην εικόνα 13 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].



Εικόνα 15 : Μοντέλο Υπηρεσιών Cloud Computing και αντιστοιχισή τους στην Αρχιτεκτονική του NFV

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.

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 5ης 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 5ης 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.

3.5 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 υπάρχοντων 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].

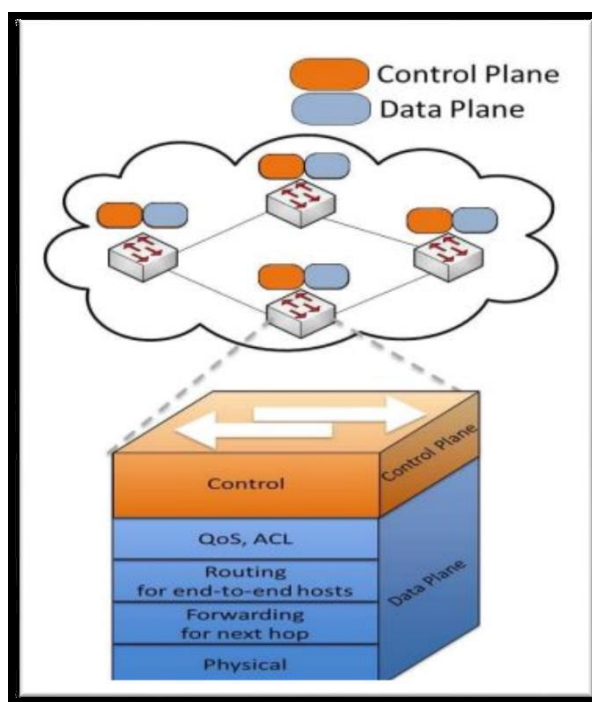
Σε ένα SDN δίκτυο για παράδειγμα, οι αποφάσεις που αφορούν διαχείριση των διαθέσιμων πόρων ή την αλληλεπίδραση με τα switches του επιπέδου προώθησης πακέτων λαμβάνονται από τον SDN-controller, ο οποίος αποτελεί τον εγκέφαλο του δικτύου και επικοινωνεί με τα switches μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow. Οι 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].

3.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών στα δίκτυα 5ης 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 στην εικόνα 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].



Εικόνα 16 : Control και Data Plane χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας SDN

Ένα νέο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας SDN είναι το γεγονός ότι η νοημοσύνη του δικτύου βρίσκεται λογικά κεντροποιημένη 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 κεντροποιημένη 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.

3.5.2 Οφέλη

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 αποσυμφορεί 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 5ης 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.

3.6 Cloud Computing

Τα δίκτυα 5ης 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 5GPP, 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 5ης 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 5ης γενιάς [14].

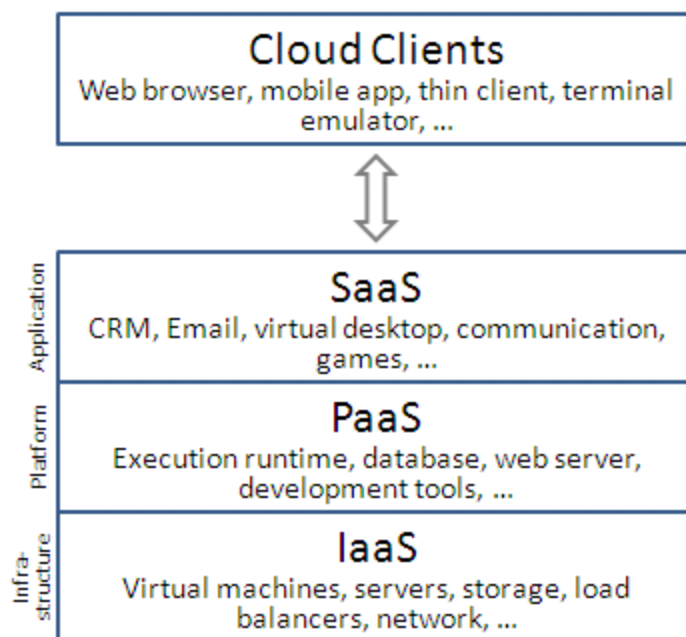
Το Cloud Computing, συχνά αναφέρεται ως ένα μέσο που προσφέρει μηχανισμούς στους παρόχους με τους οποίους μπορούν να δίνουν πρόσβαση στους χρήστες σε έναν απεριόριστο αριθμό εικονικών πόρων. Δύο χαρακτηριστικά του Cloud που αφορούν το επιχειρηματικό μοντέλο, είναι ο μηχανισμός κοστολόγησης, όπου οι χρεώσεις 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.



Εικόνα 17 : Τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του Cloud Computing

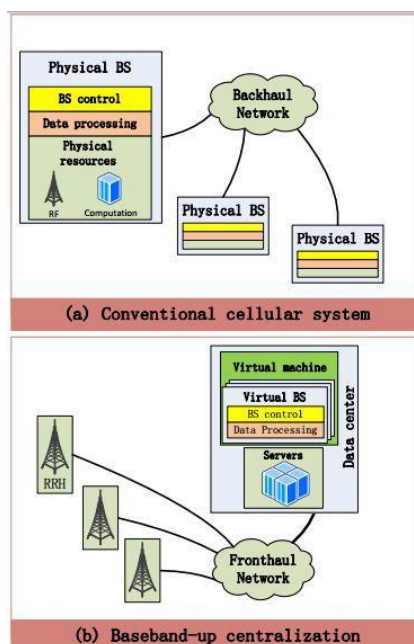
Τα τρία επίπεδα που αναφέραμε απεικονίζονται στην εικόνα 15. Όπως παρατηρούμε στην εικόνα, στο χαμηλότερο επίπεδο βρίσκονται οι πόροι που αφορούν το hardware (π.χ. επεξεργαστική ισχύ, αποθηκευτικός χώρος, δικτυακές συσκευές) καθώς και μηχανισμοί που ονομάζονται Virtualization Hypervisors, οι οποίοι παρέχουν 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.

3.6.1 Cloud-RAN : Radio Access μέσω Cloud – Οφέλη

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 κεντρικοποιημένα 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.

Με τη χρήση του Cloud-RAN, οι υπολογιστικοί πόροι συγκεντρώνονται από τις διάσπαρτες περιοχές που είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί βάσης και κεντρικοποιούνται 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. Στην εικόνα 16, απεικονίζεται η παραδοσιακή αρχιτεκτονική ασύρματης πρόσβασης των cellular δικτύων εν συγκρίσει με την κεντρικοποιημένη επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης που περιγράψαμε.



Εικόνα 18 : Σύγκριση μεταξύ της παραδοσιακής σχεδίασης των cellular δικτύων και με κεντρικοποιημένη επεξεργασία σημάτων βασικής ζώνης

Τα οφέλη της κεντρικοποιημένης 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 κεντρικοποιημένης 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 κεντρικοποίησης, 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.

4 ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ

4.1 Γενική εισαγωγή – 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, κατανεμητές 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.

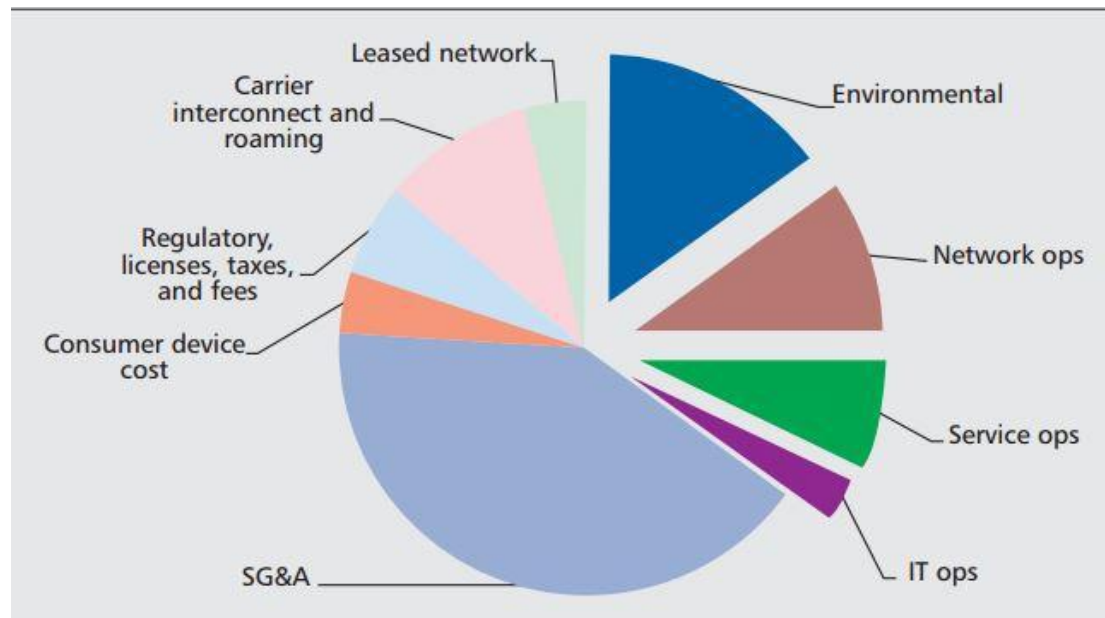
Κόστος για τη λειτουργία και συντήρηση των δικτυακών συσκευών: Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται έξοδα που έχουν να κάνουν με τη συντήρηση των δικτυακών συσκευών καθώς και με τη μισθοδοσία των υπαλλήλων που ασχολούνται με αυτή. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει όλες τις επαναλαμβανόμενες δαπάνες που είναι 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].

Στην εικόνα 17 που ακολουθεί, παραθέτουμε μια γραφική απεικόνιση των παραπάνω κατηγοριών και μια ποιοτική μέτρηση του μέρους του συνολικού λειτουργικού κόστους του δικτύου που καταλαμβάνουν.



Εικόνα 19 : Οι κατηγορίες λειτουργικού κόστους (OPEX) για έναν πάροχο υπηρεσιών

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.

4.2 Small Cells – Οικονομική ανάλυση

Στα προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση των τεχνολογιών που είναι υποψήφιας 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 km², 10 πεντάροφα 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:

Στην εικόνα 18 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 M€	2000 Mbps
8 femtocells per floor	400	0,40 M€	4000 Mbps
User oriented approach			
8 users per femtocell	1250	1,25 M€	12 500 Mbps
4 users per femtocell	2500	2,50 M€	25 000 Mbps

Εικόνα 20 : Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Femtocells

Στην εικόνα 19 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

Εικόνα 21 : Κεφαλαιακό κόστος και συνολική χωρητικότητα για τη χρήση Macrocells

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

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

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

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 στην εικόνα 20 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

Εικόνα 22 : Κατανάλωση ενέργειας για κάθε είδος σταθμού βάσης

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.

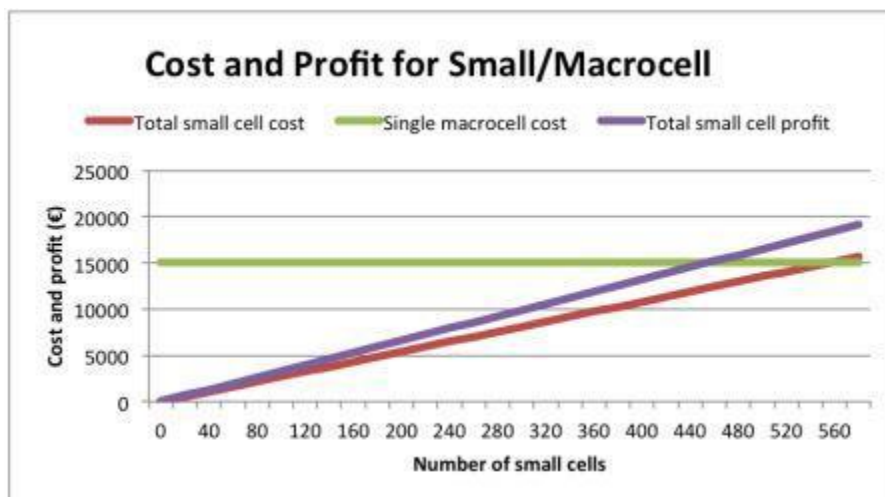
Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους OPEX για την εγκατάσταση των Small Cells πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν αρκετές διαφορές σε σχέση με τα Macrocells, αφού α) δεν υπάρχει κόστος για ενοικίαση χώρου, αφού ο εξοπλισμός τοποθετείται στο σπίτι του πελάτη, β) η κατανάλωση ενέργειας βαραίνει μόνο 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 της εικόνα 21, η οποία απεικονίζει το κόστος εγκατάστασης των Small Cells και το κέρδος που έχουμε σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells.

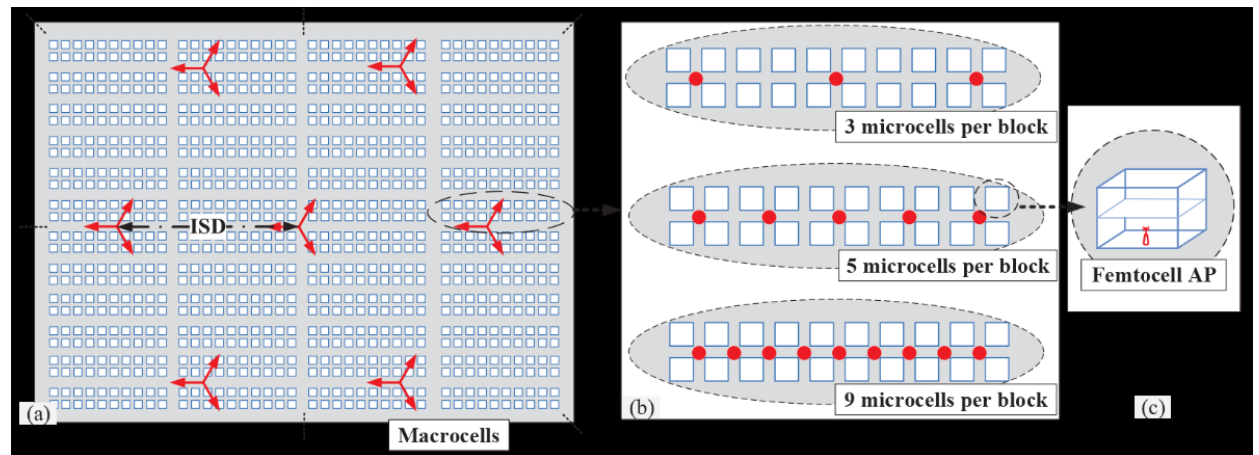


Εικόνα 23 : Σύγκριση κόστους εγκατάστασης των Small Cells και το κέρδος που έχουμε σε σχέση με την εγκατάσταση Macrocells

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.



Εικόνα 24 : Απεικόνιση του σεναρίου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση

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 στην εικόνα 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 στην εικόνα 23:

Deployment strategy	Area power consumption [kW/km ²]	Energy efficiency [bps/Hz/kW]	Energy efficiency @ W = 20 MHz	Total cost per Area [k€/km ²]	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/€

Εικόνα 25 : 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].

4.3 Cloud computing – οικονομική ανάλυση

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 5ης 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, καταμεμημένους 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).

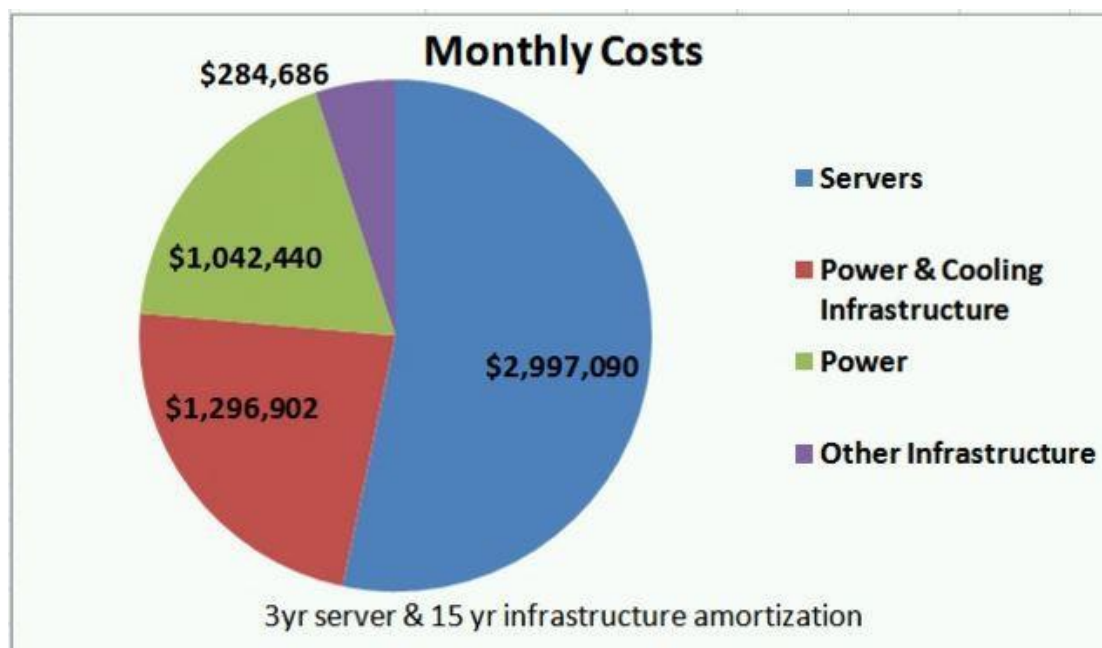
Προκειμένου να αξιολογηθεί το κόστος του Data Center στο οποίο τρέχουν οι Virtual Machines που προσφέρονται στους χρήστες, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το μοντέλο Hamilton [84], σύμφωνα με το οποίο το συνολικό κόστος κατανάλωσης ενέργειας δίνεται από τον τύπο $Cost_{full-energy}=(p*P_{raw}*PUE)$, όπου 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.

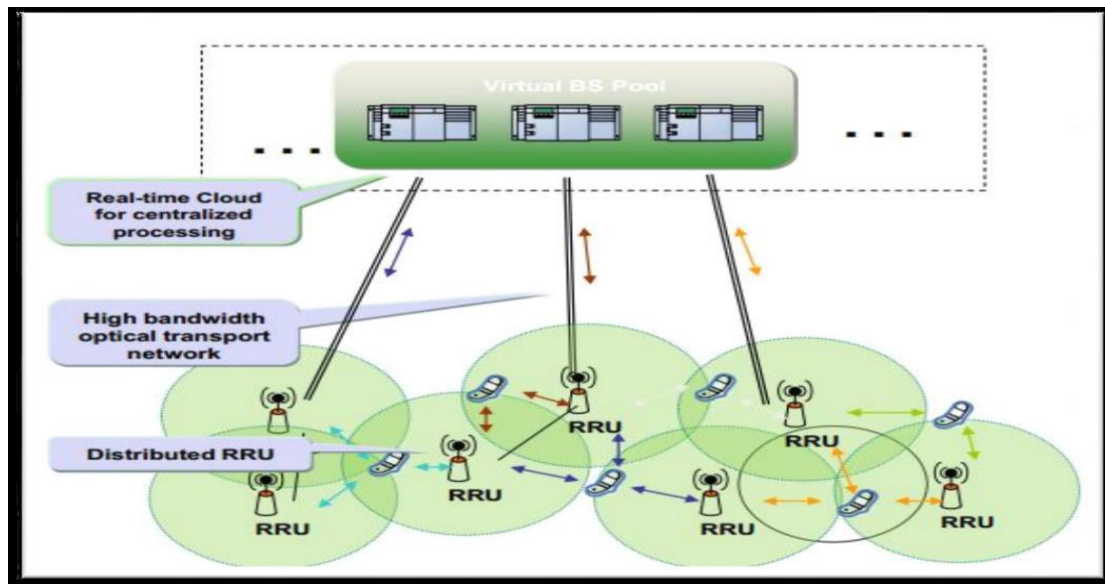
Με χρήση του παραπάνω οικονομικού μοντέλου, μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος για τη δημιουργία και τη συντήρηση ενός Data Center πάνω στο οποίο θα στηριχθεί το Cloud και προκειμένου να πάρουμε μια ποσοτική εκτίμηση του κόστους αυτού, μπορούμε να στηριχθούμε στο γράφημα του Σχήματος 28 το οποίο απεικονίζει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



Εικόνα 26 : 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, πραγματεύεται 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 πρότειναν την τυπική αρχιτεκτονική του Cloud-RAN, στην οποία υπάρχει ένας κεντροποιημένος χώρος όπου υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι προς χρήση, οι οποίοι μπορούν να υποστηρίξουν περίπου 10~1000 cells. Επιπλέον εκμεταλλεύονται τον κεντροποιημένο έλεγχο της επεξεργασίας των σημάτων, προκειμένου να υπάρχει συντονισμός μεταξύ των cells αλλά και η δυνατότητα δυναμικής δέσμευσης πόρων.



Εικόνα 27 : Κεντριοποιημένη 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 κεντριοποιημένη 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 κεραίες (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 5ης γενιάς, γεγονός που επιβεβαιώνεται 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.

4.4 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 5ης 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.

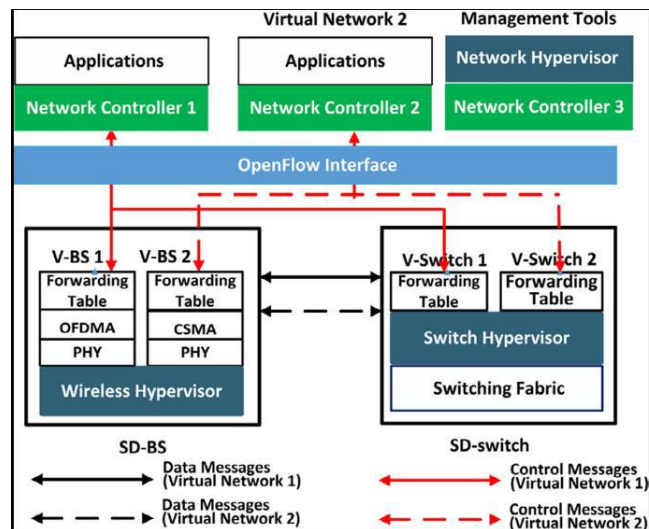
Τεχνολογίες όπως το Cloud Computing και το NFV, εξελίσσονται από απλές IT τεχνολογίες σε αναπόσπαστα κομμάτια του σχεδιασμού των δικτύων. Το Cloud Computing στα δίκτυα 5G, θα αποτελέσει το πλαίσιο μέσα στο οποίο οι χρήστες θα έχουν αδιάκοπη και εύκολη on-demand πρόσβαση σε ένα κοινόχρηστο χώρο δικτυακών 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 εκμεταλλεόμενη 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.

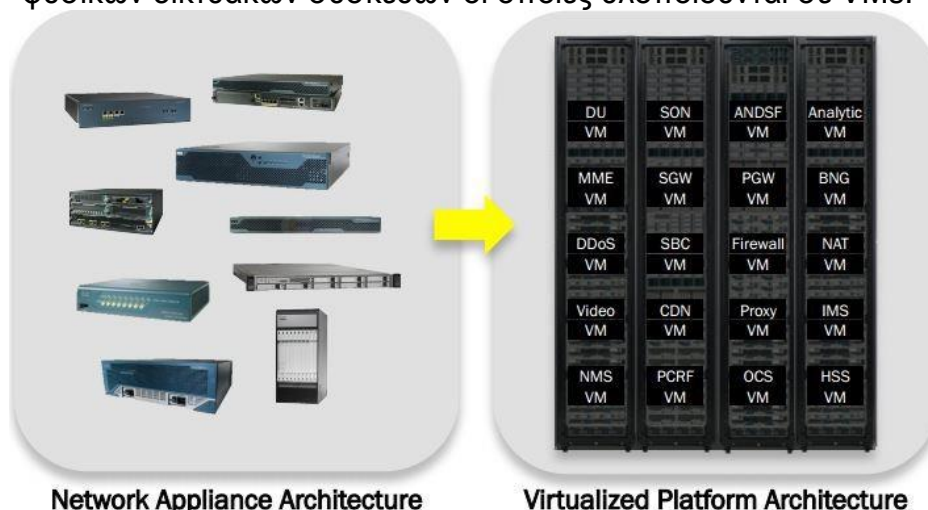
Με τη χρήση του Network Virtualization δίνεται η δυνατότητα υλοποίησης πολλαπλών Virtual Networks μεταξύ των οποίων δεν υπάρχουν παρεμβολές και τα οποία μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή. Αυτά τα Virtual Networks μπορούν να δημιουργούνται κατ' απαίτηση του χρήστη και να τους ανατίθενται δυναμικά δικτυακοί 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.



Εικόνα 28 : 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.



Εικόνα 29 : Hardware Δικτυακές συσκευές και η υλοποίησή τους σε Virtual Machines [79].

5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

5.1 Παρουσίαση του Παρόχου που θα μοντελοποιηθεί

Υποθέτουμε ότι είμαστε ο πάροχος Hellas5G. Ως υπόθεση εργασίας, δεχόμαστε ότι προφανώς αρχικά η Εταιρεία μας θα κατέχει πολύ μικρό Μερίδιο Αγοράς-τόσο εν συγκρίσει με τους 2 μεγαλύτερους παρόχους της χώρας (Cosmote,Vodafone). Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι η Εταιρεία μας θα ξεκινήσει έχοντας Μερίδιο Αγοράς 1%, το οποίο θα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό 1,5% ετησίως. Ως αποτέλεσμα της εν λόγω υπόθεσης, στο τέλος της δεκαετίας που εξετάζουμε, η Εταιρεία μας θα κατέχει Μερίδιο Αγοράς της τάξης του 14,5%

Η επένδυση στο πρότυπο 5G τοποθετείται στο έτος 2019, και η περίοδος που εξετάζουμε φτάνει σε βάθος δεκαετίας (2019-2029). Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζουμε το αναμενόμενο Μερίδιο Αγοράς της Εταιρείας μας σε βάθος δεκαετίας :

Πίνακας 7: Μερίδιο αγοράς σε βάθος δεκαετίας

Έτος	Μερίδιο αγοράς
2019	1.00%
2020	2.50%
2021	4.00%
2022	5.50%
2023	7.00%
2024	8.50%
2025	10.00%
2026	11.50%
2027	13%
2028	14.50%

5.2 Ζήτηση υπηρεσιών

Σύμφωνα με τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.) στο «Εγχειρίδιο Frascati», ως Καινοτομία ορίζεται η μετατροπή

μιας ιδέας σε εμπορεύσιμο προϊόν ή υπηρεσία, σε λειτουργική μέθοδο παραγωγής ή διανομής, ή ακόμα και σε μέθοδο παροχής κοινωνικής υπηρεσίας.

Ως Διάχυση μίας Καινοτομίας, αναφέρεται η διαδικασία κατά την οποία μία Καινοτομία «διαχέεται» μέσα από συγκεκριμένους διαύλους επικοινωνίας, κατά τη διάρκεια του χρόνου στα μέλη ενός κοινωνικού συστήματος. Κοινώς, η Διάχυση αντικατοπτρίζει το πώς οι καταναλωτές και η συμπεριφορά τους καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα καινοτόμα προϊόντα γίνονται αποδεκτά και η χρήση τους ευρεία.

5.2.1 Διαδικασία Διάδοσης μιας Καινοτομίας

Τα «Μοντέλα Διάχυσης» είναι μαθηματικές συναρτήσεις του χρόνου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της Διάχυσης των τηλεπικοινωνιακών προϊόντων και υπηρεσιών στις αγορές διαφόρων περιοχών. Η συνολική Διείσδυση και υιοθέτηση των καινοτομιών ακολουθεί συνήθως Σχήματα Διείσδυσης που προσεγγίζονται από S-shaped Καμπύλες (διαδικασία Συμμετρικής Ανάπτυξης). Οι καμπύλες S-curve συνήθως ξεκινούν από έναν μικρό αριθμό αγοραστών καινοτομιών, τους λεγόμενους Innovators, οι οποίοι είναι πρόθυμοι να δοκιμάσουν νέες ιδέες και προϊόντα και μπορούν να ρισκάρουν να αγοράσουν και να αντεπεξέλθουν οικονομικά. Αυτοί αποτελούν και τη λεγόμενη Κρίσιμη Μάζα (Critical Mass) των χρηστών, το μέγεθος της οποίας επηρεάζει και τη συνολική πορεία της Διείσδυσης. Καθώς περνά ο χρόνος πολλές εξωτερικές επιδράσεις, όπως τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης, ωθούν πολλούς ανθρώπους στην απόκτηση του προϊόντος, τους λεγόμενους Imitators. Σε αυτή τη φάση, έχουμε γρήγορη ανάπτυξη της αγοράς, δηλαδή αύξηση των αγοραστών. Τέλος, η αγορά «φτάνει στην Ωριμότητα» όταν έχει προσεγγιστεί ο μέγιστος αριθμός εκείνων που έχουν υιοθετήσει το προϊόν ή την υπηρεσία, μέσα στον πληθυσμό που εξετάζεται. Σε αυτήν την Ωριμη Φάση (Saturation Level), η «Καμπύλη» αγοράς αρχίζει να μειώνεται, δεν αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό όπως πριν, και φτάνει ασυμπτωτικά σε ένα Επίπεδο Κορεσμού. Έτσι, λοιπόν, τα περισσότερα Μοντέλα Διάδοσης χωρίζουν τα μέλη ενός κοινωνικού συστήματος στους Early Adopters και στους Later Adopters που υιοθετούν ένα προϊόν ή μια υπηρεσία που διαχέεται στην αγορά.

Πιο αναλυτικά θεωρούμε ως :

- Innovators : Αποτελούν το πρώτο 2,5% των αγοραστών. Συνήθως πρόκειται για άτομα με υψηλή μόρφωση και εισόδημα, και ως εκ τούτου εμπιστεύονται τις αγοραστικές τους ικανότητες, μπορούν να ανταπεξέλθουν οικονομικά και είναι πρόθυμοι να ρισκάρουν. Συνήθως αναζητούν πληροφορίες για νέα προϊόντα από τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης. Αποτελούν την Κρίσιμη Μάζα (Critical Mass), αφού ο αριθμός του επηρεάζει κατά ένα πολύ μεγάλο βαθμό τη συνολική πορεία του προϊόντος.
- Early Adopters : Αποτελούν το επόμενο 13,5% των αγοραστών. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν καταναλωτές που είναι περισσότερο «ενσωματωμένοι» στην κοινωνία από ότι οι Innovators. Είναι σχετικά

νέοι, και ανήκουν σε υψηλές κοινωνικές τάξεις. Συχνά έρχονται σε επαφή με ανθρώπους που ήδη έχουν αγοράσει από τους πρώτους ένα νέο προϊόν (Salespeople), και επηρεάζονται σημαντικά από αυτούς.

- **Early Majority** : Αποτελούν το 34% των αγοραστών που ακολουθεί. Στη συγκεκριμένη κατηγορία, οι καταναλωτές υιοθετούν μια καινοτομία αμέσως πριν το μέσο καταναλωτή. Επηρεάζονται πάρα πολύ από άλλους ανθρώπους που έχουν αγοράσει το προϊόν (π.χ. Early Adopters). Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η μεγαλύτερη ηλικία, το μεγαλύτερο μορφωτικό επίπεδο, και η καλύτερη κοινωνική και οικονομική κατάσταση από το μέσο καταναλωτή μιας κοινωνίας.
- **Late Majority** : Αποτελούν το επόμενο 34% των αγοραστών. Οι εν λόγω καταναλωτές καθυστερούν να αγοράσουν μια καινοτομία κυρίως επειδή είναι διστακτικοί. Λειτουργούν συνήθως βασισμένοι σε απόψεις ανθρώπων που γνωρίζουν καλά.
- **Laggards** : Αποτελούν το τελευταίο 16% των αγοραστών. Οι συγκεκριμένοι καταναλωτές είναι ιδιαίτερα διστακτικοί για τα νέα προϊόντα, και είναι αποκομμένοι από την κοινωνία. Γι' αυτόν τον λόγο, δεν ενδιαφέρον ιδιαίτερα τους ειδικούς του μάρκετινγκ.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια ενδεικτική γραφική παράσταση, στην οποία απεικονίζεται μια S-Καμπύλη για τη γενικά αποδεκτή πορεία μιας Καινοτομίας στην αγορά [47]:



Εικόνα 30: Διάδοση καινοτομίας στο χρόνο

Με βάση την παραπάνω εικόνα, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα [48]:

- ✓ Αρχικά, οι νέες τεχνολογίες εξελίσσονται με αργό ρυθμό
- ✓ Στη συνέχεια, οι τεχνολογικές εξελίξεις επιταχύνονται εκθετικά
- ✓ Τέλος, η τεχνολογική εξέλιξη παύει να επιταχύνεται, και σχεδόν σταματά

Οι πιο γνωστοί αντιπρόσωποι από τα Μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την Εκτίμηση Διάχυσης είναι οι εξής :

- Το μοντέλο Bass
- Η οικογένεια των Λογιστικών Μοντέλων (Logistic Family)

- Το μοντέλο Gompertz

Τα Λογιστικά Μοντέλα και παραλλαγές του Μοντέλου Gompertz παρέχουν S-καμπύλες που χρησιμοποιούνται από κοινού για Διάχυση Πρόβλεψης προϊόντων ή υπηρεσιών. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν και να προβλέψουν τη Ζήτηση και τη Διάδοση σε «συνολικό επίπεδο», δηλαδή στην απόκριση της μεμονωμένης αγοράς διαφόρων περιοχών, και όχι σε ατομικό επίπεδο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση περιγράφεται από τα «Choice-Based» Μοντέλα που εστιάζουν στην πιθανότητα οι άνθρωποι να υιοθετήσουν την καινοτομία της οποίας η συμπεριφορά της αγοράς καθοδηγείται από μεγιστοποίηση των προτιμήσεων, σύμφωνα με τη σύγχρονη Οικονομική Θεωρία. Οι S-καμπύλες προέρχονται από την εξής Διαφορική Εξίσωση :

$$\frac{dY(t)}{dt} = \delta * Y(t) * [S - Y(t)]$$

, όπου :

- ❖ Το $y(t)$ αντιστοιχεί στη Συνολική Διείσδυση μέχρι τη στιγμή χρονική στιγμή t
- ❖ Το S αντιστοιχεί στο Επίπεδο Κορεσμού(Saturation Level) του εκάστοτε προϊόντος ή υπηρεσίας
- ❖ Το δ είναι Σταθερά της Αναλογίας (Coefficient of Diffusion)

Η Διείσδυση ορίζεται ως το Ποσοστό του πληθυσμού που χρησιμοποιεί το εκάστοτε προϊόν ή την υπηρεσία που εξετάζεται. Τη χρονική στιγμή $t=0$, δηλαδή τη στιγμή εισαγωγής μιας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος, υπάρχει μια Κρίσιμη Μάζα-οι Ιnnovators-που αρχικά την υιοθετούν. Αυτός ο αριθμός επηρεάζει το Ρυθμό Διείσδυσης και το χρόνο που προσεγγίζεται ο Κορεσμός.[47]

5.2.2 Στοχαστικά Μοντέλα Ζήτησης

Στη βιβλιογραφία υπάρχει μια πληθώρα Μοντέλων Ζήτησης. Ωστόσο, στα πλαίσια της συγκεκριμένης Εργασίας, θα περιοριστούμε στα σημαντικότερα και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα από αυτά :

- Μοντέλα Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression Models)
- Μοντέλο Fisher-Pry (Fisher-Pry Model)
- Μοντέλο Bass (Bass Model)
- Μοντέλο Gompertz (Gompertz Model)
- Λογιστικά Μοντέλα (Logistic Models)
- Μοντέλα 3 ή περισσότερων Παραμέτρων (Tonic Model)

5.2.2.1 Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression Model)

Η μέθοδος της Γραμμικής Παλινδρόμησης ακολουθεί τον μαθηματικό τύπο : Πρόκειται για τον απλό τύπο μιας Γραμμικής Εξίσωσης. Έτσι, λοιπόν, το συγκεκριμένο Μοντέλο αποτελεί μια απλή μαθηματική τεχνική προσέγγισης των πραγματικών δεδομένων (Datafitting). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το εν λόγω Μοντέλο δεν ακολουθεί τη μορφή μιας S-καμπύλης[47].

5.2.2.2 Μοντέλο Fisher-Pry (Fisher-Pry Model)

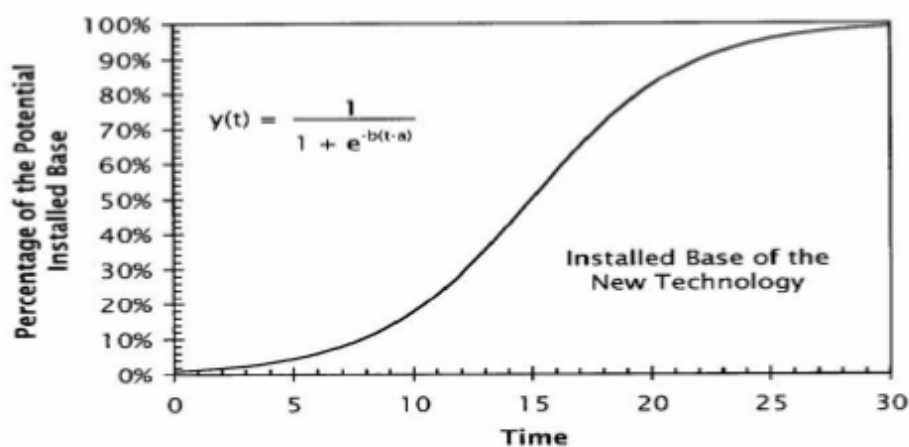
Πρόκειται για ένα Μοντέλο Υποκατάστασης Γενεών, που εφαρμόζεται συχνά για να προβλέψει το ποσοστό στο οποίο μια τεχνολογία θα αντικαταστήσει μια άλλη προηγούμενη (π.χ. 2G/3G). Το Μοντέλο Fisher Pry είναι συμμετρικό περίπου στο 50% του Σημείου Διείσδυσης, και ακολουθεί την εξής μαθηματική εξίσωση :

$$y(t) = \frac{1}{1 + e^{-b(t-a)}}$$

, όπου :

- :Y(t) Τμήμα της πιθανής αγοράς που εξυπηρετείται από τη νέα τεχνολογία στο χρόνο t
- : α Ο χρόνος μέσα στον οποίο η νέα τεχνολογία φθάνει στο 50% της συνολικής αγοράς
- : β Το ποσοστό υιοθέτησης της νέας τεχνολογίας

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η καμπύλη που ακολουθεί το μοντέλο Fisher-Pry στο χρόνο [47]:



Εικόνα 31 : Fisher-Pry στο χρόνο

5.2.2.3 Μοντέλο Bass (Bass Model)

Το μεθοδολογικό υποστήριγμα οποιουδήποτε Μοντέλου Διάδοσης του μάρκετινγκ είναι το Μοντέλο Bass. Το συγκεκριμένο Μοντέλο παρέχει επεξηγηματική θεωρία για τη Διάδοση ενός προϊόντος, περιλαμβάνοντας οικονομικούς, κοινωνικούς, διαπολιτισμικούς, πολιτικούς παράγοντες, η οποία όμως είναι κυρίως επηρεασμένη από 2 μέσα επικοινωνίας :

- Τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης
- Την Επιρροή μέσω της Επικοινωνίας μεταξύ των Ατόμων (Word-of-Mouth)

Ανάμεσα στις 2 ομάδες των αγοραστών μιας καινοτομίας, η ομάδα που επηρεάζεται από τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης είναι οι λεγόμενοι «Καινοτόμοι (Innovators)», ενώ η ομάδα που επηρεάζεται μόνο από το Word-of-Mouth είναι οι ονομαζόμενοι «Μιμητές (Imitators)». Σύμφωνα με το Μοντέλο Bass, οι πωλήσεις ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας σε μια περιοχή σε χρόνο t περιγράφονται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$S(t) = p * m + (q - p) * Y(t - 1) - q * \frac{[Y(t - 1)]^2}{m}$$

Ο γενικός τύπος του Μοντέλου Bass είναι ο εξής [45]:

$$S(t) = \frac{m * (p + q)^2}{p} * \frac{e^{-(p+q)t}}{\left(\frac{q}{p} * e^{-(p+q)t} + 1\right)^2}$$

, όπου :

- m (Market Potential) : Η Δυναμική της Αγοράς, δηλαδή ο μέγιστος αριθμών των ατόμων που πρόκειται να υιοθετήσουν το εν λόγω προϊόν ή την υπηρεσία
- p : Συντελεστής Καινοτομίας (Coefficient of Innovation)-Εξωτερική Επιρροή
- q : Συντελεστής Μίμησης/Αντιγραφής (Coefficient of Imitation)-Εσωτερική Επιρροή
- $S(t)$: Αθροιστικές Πωλήσεις μέχρι τη χρονική στιγμή t

5.2.2.4 Μοντέλο Gompertz (Gompertz Model)

Ο Gompertz, το 1825, εισήγαγε την ομώνυμη συνάρτηση σαν Μοντέλο που εκφράζει τη χρονική εξέλιξη της ανθρώπινης θνησιμότητας. Η καμπύλη που δίνει η κατανομή αυτή είναι μια Ασύμμετρη Σιγμοειδής Καμπύλη, με ιδιότητες που είναι χρήσιμες για την αναπαράσταση και πρόβλεψη του φαινομένου της

Διάδοσης. Συγκεκριμένα, το εν λόγω Μοντέλο εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1975 στη διάδοση νέων προϊόντων από τον Lakhani (1975) και αργότερα από τον Sahal (1977, 1981), ο οποίος το χρησιμοποίησε σαν βάση για την απόδειξη διαφόρων υποθέσεων σχετικά με τη Διάδοση Καινοτομιών.

Υπάρχουν 2 Μορφές του συγκεκριμένου Μοντέλου στη σύγχρονη βιβλιογραφία :

Το Μοντέλο Gompertz I, με μαθηματική εξίσωση : $Y(t) = S * e^{-e^{-a-b*t}}$

Το Μοντέλο Gompertz II, με μαθηματική εξίσωση : $Y(t) = S * e^{-a*e^{-b*t}}$

, όπου :

a : Παράμετρος που σχετίζεται με τη χρονική στιγμή που η διάδοση προσεγγίζει το 37% του ανώτατου επιπέδου

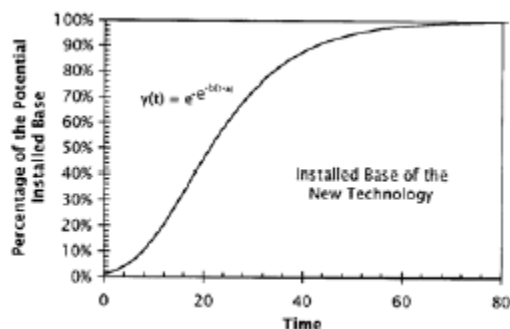
b : Παράμετρος που καθορίζει την Ταχύτητα Διάδοσης ή το πόσο γρήγορα προχωρά η διαδικασία υιοθέτησης ()

S : Το Επίπεδο Κορεσμού στην αγορά (Saturation Level)

Y(t) : Το Επίπεδο Διάχυσης που υπολογίζεται τη χρονική στιγμή t

Το Μοντέλο Gompertz περιγράφεται από συναρτήσεις που αυξάνονται μονότονα ανάμεσα στο 0 (μηδέν) και στο S. Επιπλέον, το παρόν Μοντέλο είναι Ασύμμετρο με προκαθορισμένο Σημείο Κάμψης που παρατηρείται όταν $Y(t)=S/e$. Δηλαδή, αυτό προσεγγίζεται όταν το Y(t) φτάνει στο 37% του ανώτατου επιπέδου. Η συνάρτηση Gompertz II παίρνει τιμές από ασυμπτωτικά 0, μέχρι την τιμή S, όσο το εύρος τιμών του t είναι από -00 έως +00 . Οι παράμετροι a και b προσδιορίζουν την Τοποθεσία και το Σχήμα της γραφικής παράστασης αντίστοιχα. Ο Μέγιστος Ρυθμός Αύξησης $(k*b)/e$ προσεγγίζεται όταν $Y(t)=k/e$, οπότε και το Y(t) προσεγγίζει τη ανώτερη τιμή του.

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η καμπύλη που ακολουθεί το Μοντέλο Gompertz στο χρόνο :



Εικόνα 32 : Μοντέλο Gompertz

5.2.2.5 Λογιστικό Μοντέλο (Logistic Model)

Το Λογιστικό Μοντέλο εισήχθη τελείως εμπειρικά από τον Verhulst το 1838 για να περιγράψει την αύξηση του μεγέθους ενός πληθυσμού. Το 1920 το εν λόγω Μοντέλο επανήλθε στο προσκήνιο από τους Pearl και Reed, οι οποίοι το επαναχρησιμοποίησαν για την περιγραφή της πληθυσμιακής αύξησης, εκτιμώντας ταυτόχρονα τις παραμέτρους του με τη χρήση Μη-Γραμμικής Παλινδρόμησης (Non-Linear Regression). Επίσης, η Λογιστική Καμπύλη χρησιμοποιήθηκε στις Κοινωνικές Επιστήμες, στην Επιδημιολογία και στη Χημεία, όπου η αύξηση της συγκέντρωσης μιας χημικής ουσίας καθώς διασπάται σε μία αυτοκαταλυτική αντίδραση περιγράφεται από τη Λογιστική Εξίσωση (Seber, 1989).

Ο Mansfield (1961, 1968) εισήγαγε την Σιγμοειδή Καμπύλη για την Πρόβλεψη της Διάδοσης Καινοτομιών, συνδέοντας στη συνέχεια το Ρυθμό Μεταβολής των Αποδεκτών με οικονομικούς παράγοντες-όπως η Αποδοτικότητα του νέου προϊόντος, η Δυνατότητα και η Ταχύτητα Επέκτασης της επιχείρησης-στην προσπάθειά του να περιγράψει τη Διάδοση μιας Καινοτομίας σ' ένα κλάδο επιχειρήσεων. Αξιοσημείωτη είναι η προσφορά του Blackman (1972) στην αναλυτική παρουσίαση και καθιέρωση του εν λόγω Μοντέλου. Λίγο πριν, οι Fisher και Pry (1971), χρησιμοποίησαν τη Λογιστική Καμπύλη στην αντικατάσταση ενός προϊόντος από ένα άλλο. Στη συνέχεια, ακολούθησε ένα πλήθος εργασιών που χρησιμοποίησαν το Λογιστικό Μοντέλο σαν μέσο περιγραφής της Διάδοσης (Mar Molinero-1980, Stoneman-1983, Harvey-1984, Karsenas-1992).

Σύμφωνα με το Λογιστικό Μοντέλο, το εκτιμώμενο Επίπεδο Διάδοσης ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας δίνεται από τον εξής τύπο :

$$Y(t) = \frac{S}{1 + e^{f(t)}}$$

, όπου :

- $Y(t)$: Το Εκτιμώμενο Επίπεδο Διάδοσης
- S : Το Επίπεδο Κορεσμού (Saturation Level)

$f(t) = -a - b \cdot t(m, k)$, όπου :

- a : Διαμορφώνει τη Θέση της Καμπύλης
- b : Διαμορφώνει τη Μορφή της Καμπύλης
- $t(m, k)$: Είναι μία Μη-Γραμμική Συνάρτηση του χρόνου (εκτός από το Γραμμικό Λογιστικό Μοντέλο, όπου είναι $t(m, k) = t$), και δίνεται από 1 από τις ακόλουθες μεθόδους :

- ✓ Linear Logistic Model : $t(m, k) = t$
- ✓ Box-Cox Logistic Model : $t(m, k) = \frac{[(1+t)^m - 1]}{m}, k = 0$

- ✓ Flog Logistic Model : $Y(t) = \{[(1 + kt)^{\frac{1}{k}} - 1] / m$

- ✓ Tonic Logistic Model : $Y(t) = S / (1 + e^{a+b+t})^c$

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις για το Λογιστικό Μοντέλο [47]:

- Οι παράμετροι των Λογιστικών Μοντέλων καθορίζουν τη Θέση και το Σχήμα των Καμπυλών τους
- Το Linear Logistic Model περιγράφεται από συναρτήσεις που αυξάνονται μονότονα ανάμεσα στο 0 και στο S , και απεικονίζεται γραφικά από μια Συμμετρική S-καμπύλη η οποία παρουσιάζει ένα Σημείο Κάμψης όταν $Y(t) = S/2$
- Η Καμπύλη Logistic προσεγγίζει το Μέγιστο Ρυθμό Ανάπτυξης $Sb/4$ όταν $Y(t) = S/2$. Αυτό το σημείο είναι το μισό του Επιπέδου Κορεσμού του $Y(t)$. Επομένως, η Καμπύλη του Λογιστικού Μοντέλου είναι Κυκλικά Συμμετρική γύρω από το Σημείο Κάμψης.
- Παρατηρείται ότι στο Συμμετρικό Linear Logistic Model το Σημείο Κάμψης είναι προκαθορισμένο. Για αυτό το λόγο, αναπτύχθηκε το Flog Logistic Model (Flexible Logistic Model), όπου το Σημείο Καμπής καθορίζεται από τα δεδομένα. Μάλιστα, τα δεδομένα καθορίζουν και το Βαθμό της Συμμετρίας.
- Οι μαθηματικές ιδιότητες του Σημείου Κάμψης, όπου έχουμε το Μέγιστο Ρυθμό Διάδοσης, και η Συμμετρία του Μοντέλου Διάδοσης, είναι κρίσιμα για τη χρησιμότητά του τόσο ως Περιγραφική Μέθοδος όσο και ως Μέθοδος Πρόβλεψης (Forecasting Method)
- Εάν στη διαδικασία Διάδοσης η ανάπτυξη είναι αρχικά αργή, και σχετικά γρήγορη κατά τη διάρκεια των φάσεων Ωρίμανσης, τότε το Λογιστικό Μοντέλο είναι μια καλή Μέθοδος Πρόβλεψης Κάμψης
- Για $f(t) = -b(t - a)$, προκύπτει το Μοντέλο Fisher-Pry (Fisher-Pry Model)

5.2.3 Πρόβλεψη

Η Πρόβλεψη (το λεγόμενο «Forecasting») είναι πολύ σημαντική, προκειμένου να προβλεφθεί όσο το δυνατόν πιο έγκυρα η πορεία μιας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος στο χρόνο. Με τη λέξη πορεία εννοείται η Διάχυση του αντίστοιχου προϊόντος στην αγορά, δηλαδή κατά κύριο λόγο οι πωλήσεις του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Πρόβλεψη πρέπει να στηρίζεται σε έγκυρα δεδομένα, προκειμένου τα αποτελέσματα που θα εξάγει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αλήθεια. Έτσι, λοιπόν, με βάση τρέχοντα δεδομένα από τις πωλήσεις και με τη χρήση κατάλληλων Μοντέλων Ζήτησης (όπως αυτά αναλύθηκαν νωρίτερα), δίνεται η δυνατότητα στους ειδικούς να εξάγουν συμπεράσματα για την εξέλιξη των πωλήσεων μιας τεχνολογίας ή ενός οποιουδήποτε άλλου προϊόντος μέσα στα επόμενα χρόνια.

Ωστόσο, πάντα πρέπει οι αρμόδιοι να λαμβάνουν υπόψη τους εξωτερικούς παράγοντες που ενδεχομένως να επηρεάζουν τη μετέπειτα πορεία του προϊόντος. Για παράδειγμα, εάν πρόκειται να κυκλοφορήσει σύντομα στην αγορά η επόμενη γενιά μιας προϋπάρχουσας τεχνολογίας (π.χ. 3G μετά από τη 2G), τότε λογικό είναι η παλαιότερη τεχνολογία να μην έχει την ίδια ανοδική πορεία που θα είχε αν κυκλοφορούσε μόνο εκείνη στην αγορά.

Συνεπώς, όσο περισσότερα στοιχεία υπάρχουν στη διάθεση των εκάστοτε αρμοδίων για την Πρόβλεψη, τόσο καλύτερες εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν για το μέλλον[47].

Οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την Πρόβλεψη της πορείας ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας στο μέλλον είναι οι ακόλουθες [47]:

- ✚ Ανάλυση Τάσης (Trend Analysis) : Στην Ανάλυση Τάσης χρησιμοποιούμε Μαθηματικές και Στατιστικές Τεχνικές προκειμένου να επεκτείνουμε τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα στο μέλλον
- ✚ Διαμόρφωση (Modeling) : Η Τεχνική αυτή χρησιμοποιείται προκειμένου να αναπαραστήσει απλά τη Δομή και τη Δυναμική κάποιου μέρους του «πραγματικού» κόσμου

5.2.3.1 Πρόβλεψη Ζήτησης του 5G στην Ελλάδα

Στην παρούσα παράγραφο προχωράμε σε μία προσπάθεια Πρόβλεψης Ζήτησης του 5G στην Ελλάδα, σε βάθος δεκαετίας, με την Τεχνική

Πρόβλεψης «Ανάλυση Τάσης». Από τα Στοχαστικά Μοντέλα Ζήτησης που αναλύθηκαν παραπάνω, εξετάζονται τα εξής :

- ο Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression Model)
- ο Μοντέλο Fisher Pry (Fisher-Pry Model)
- ο Μοντέλο Gompertz I(Gompertz Model I)
- ο Μοντέλο Gompertz II(Gompertz Model II)
- ο Γραμμικό Λογιστικό Μοντέλο (Linear Logistic Model)
- ο Λογιστικό Μοντέλο Tonic (Tonic Logistic Model)

Όπως γνωρίζουμε, προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα με τη χρήση των Μοντέλων Ζήτησης, είναι απαραίτητη η συλλογή πραγματικών δεδομένων. Μια καλή στρατηγική για την εξαγωγή Προβλέψεων Ζήτησης υπηρεσιών μίας γενιάς κινητών επικοινωνιών, είναι η παρακολούθηση των Ποσοστών Διείσδυσης της ακριβώς προηγούμενης από αυτή γενιάς στον πληθυσμό. Για το λόγο αυτό, συλλέχθηκαν τα Ποσοστά Διείσδυσης του 4G στην Ελλάδα από το 2012 (όταν και ξεκίνησε η παροχή τους) έως το 2018, προκειμένου να τα εφαρμόσουμε ως δεδομένα στις εξισώσεις των Μοντέλων Ζήτησης. Τα εν λόγω Ποσοστά Διείσδυσης είναι τα εξής [49], [50], [51], [52], [53], [54]:

Έτος	Ποσοστό διείσδυσης 4G στην Ελλάδα
2012	0,2%
2013	20%
2014	35%
2015	45%
2016	57%
2017	57,8%
2018	60%

Εικόνα 33 : Ποσοστό διείσδυσης 4G στην Ελλάδα

Η στρατηγική εφαρμογής δεδομένων που αφορούν την προηγούμενη γενιά χρησιμοποιείται ως εναλλακτική λύση σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν, δεν γνωρίζουμε, ή δεν επαρκούν τα δεδομένα που αφορούν στην τεχνολογία που μας ενδιαφέρει . Αναμένουμε ότι η νέα τεχνολογία θα έχει ανάλογα, ίσως και μεγαλύτερα Ποσοστά Διείσδυσης από την προκάτοχό της.

Χρησιμοποιώντας το Πρόγραμμα Datafit 9, στο οποίο δίνονται ως δεδομένα :

- Το Ποσοστό Διείσδυσης του 3G στην Ισπανία στην εκάστοτε χρονιά
- Το Μοντέλο Ζήτησης που επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε (Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης, Μοντέλο Fisher Pry, Μοντέλο Gompertz I, Μοντέλο Gompertz II, Γραμμικό Λογιστικό Μοντέλο, Λογιστικό Μοντέλο Tonic)

, προσδιορίζουμε :

- Τις άγνωστες παραμέτρους του κάθε Μοντέλου Ζήτησης (Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης, Μοντέλο Fisher Pry, Μοντέλο Gompertz I,

Μοντέλο Gompertz II, Γραμμικό Λογιστικό Μοντέλο, Λογιστικό Μοντέλο Tonic)

- Τις γραφικές παραστάσεις σε κοινό σύστημα αξόνων με τα σημεία των πραγματικών δεδομένων

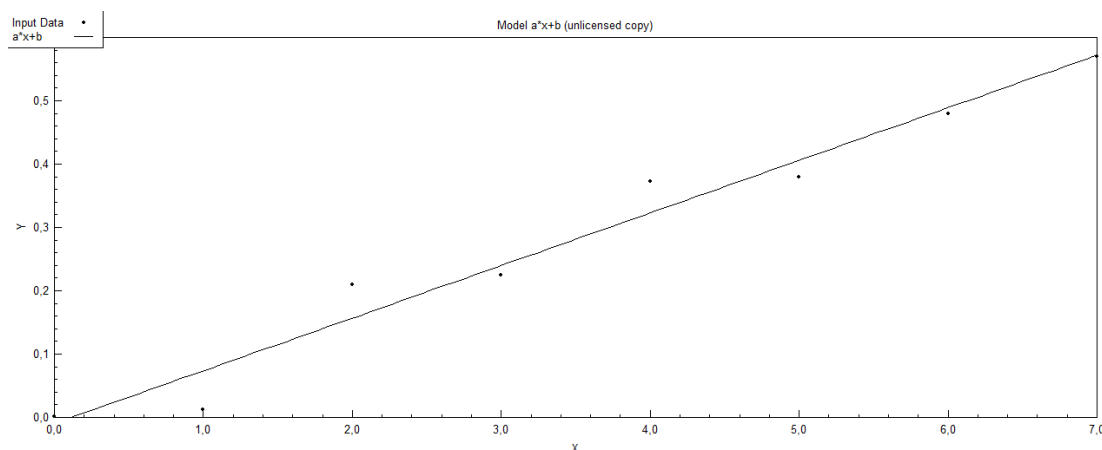
Πιο συγκεκριμένα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα :

5.2.3.1.1 Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression Model)

Μαθηματική Εξίσωση : $Y(t) = ax + b$

Παράμετρος	Τιμή	Σφάλμα
a	8.723764239	6.3532452
b	9.609420498	2.6776463

Εικόνα 34 : Εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης



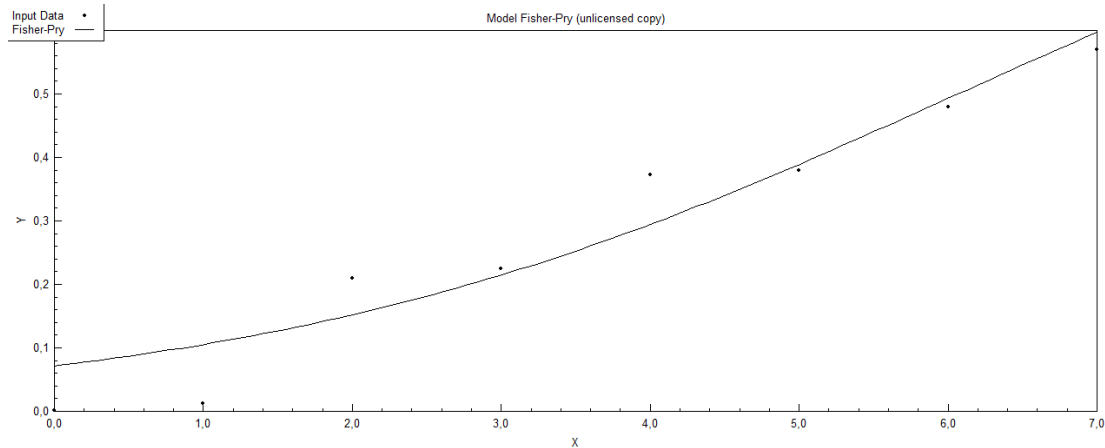
Εικόνα 35 : Data Fitting του Μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης

5.2.3.1.2 Μοντέλο Fisher-Pry (Fisher-Pry Model)

Μαθηματική Εξίσωση : $Y(t) = \frac{1}{1+e^{(-b)*(t-a)}}$

Παράμετρος	Τιμή	Σφάλμα
a	5,79802522407785	0,29189852014042
b	0,722508813856599	0,048658229531405

Εικόνα 36 : Εκτίμηση Παραμέτρων του Μοντέλου Fisher-Pry



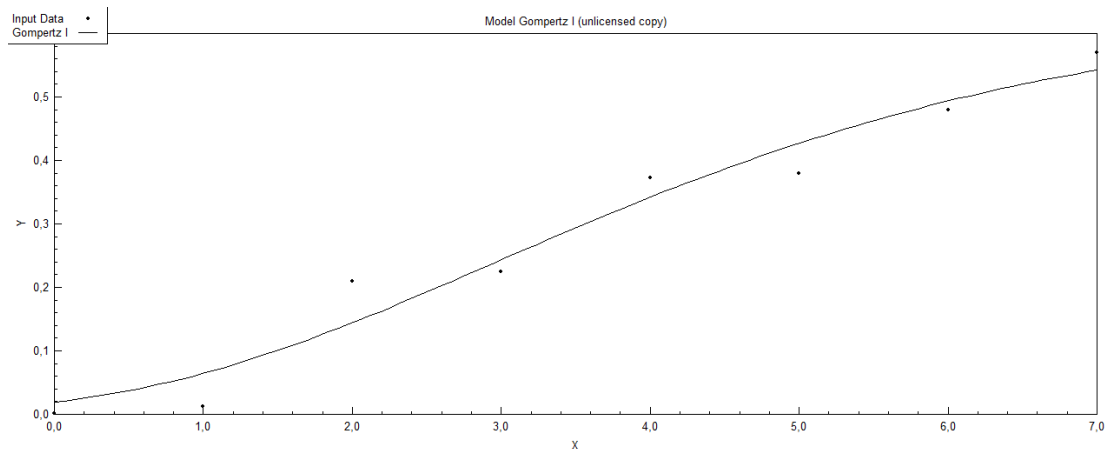
Εικόνα 37 : Data Fitting του Μοντέλου Fisher-Pry

5.2.3.1.3 Μοντέλο Gompertz I (Gompertz I Model)

Μαθηματική Εξίσωση : $Y(t) = S * e^{-e^{-a-(b*t)}}$

Παράμετρος	Τιμές	Σφάλμα
a	-1.7305444337734	0,439768889582618
b	0,538701149794345	0,220703364949967
S	0,716383025367736	0,190703364949967

Εικόνα 38 : Εκτίμηση Παραμέτρων του Μοντέλου Gompertz I



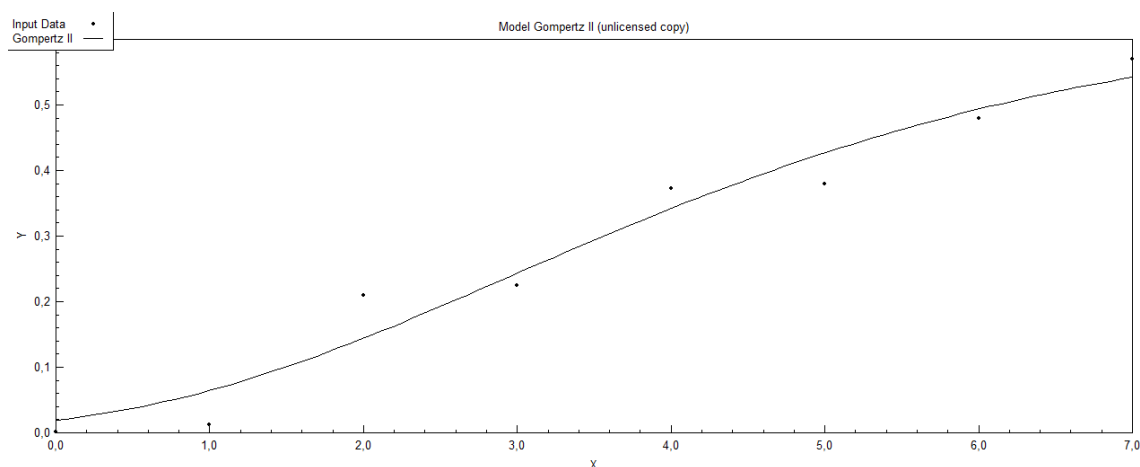
Εικόνα 39 : Data Fitting του Μοντέλου Gompertz I

5.2.3.1.4 Μοντέλο Gompertz II(Gompertz II Model)

Μαθηματική Εξίσωση : $Y(t) = S * e^{-a * e^{-b * t}}$

Παράμετρος	Τιμές	Σφάλμα
a	3.87434535335	1.134334234
b	0.52534534	0.2134534534
S	0.723245345	0.1953453434

Εικόνα 40 : Εκτίμηση Παραμέτρων του Μοντέλου Gompertz II

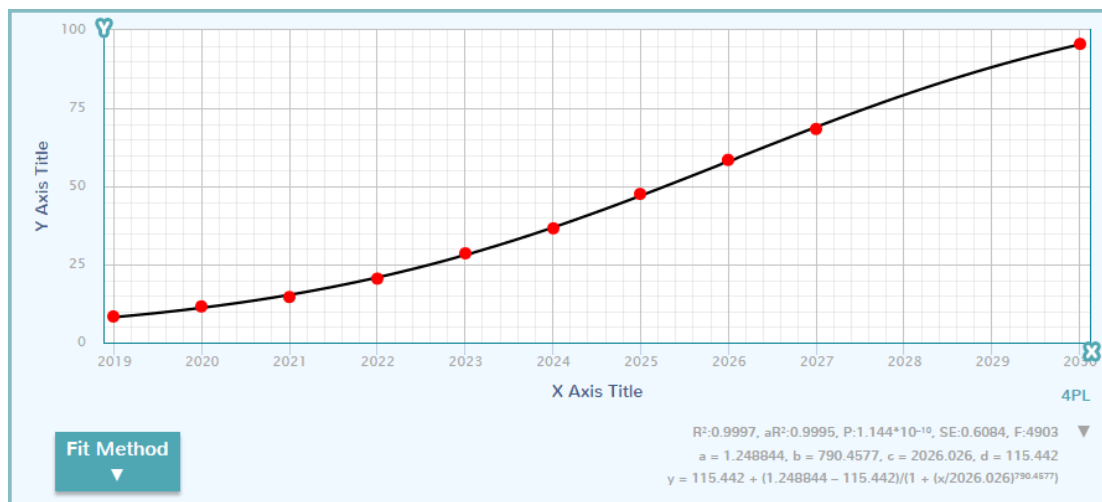


Εικόνα 41 : Data Fitting του Μοντέλου Gompertz II

5.2.3.1.5 Σιγμοειδής Καμπύλη Διείσδυσης του 5G στην Ελλάδα

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε (τόσο μέσω των γραφικών παραστάσεων, όσο και μέσω των αριθμητικών τιμών των σφαλμάτων) ότι η καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών δεδομένων γίνεται από το Μοντέλο Fisher-Pry. Ως εκ τούτου, το Μοντέλο Fisher-Pry επιλέγεται ώστε να κατασκευαστεί η S-Curve (Σιγμοειδής Καμπύλη) η οποία θα αναπαραστήσει την Διείσδυση του 5G στην Ελλάδα. Το εν λόγω αποτέλεσμα επιβεβαιώνεται και θεωρητικά, καθώς πρόκειται για ένα Μοντέλο Υποκατάστασης Γενεών, το οποίο εφαρμόζεται συχνά για να προβλέψει το ποσοστό στο οποίο μια τεχνολογία θα αντικαταστήσει μια άλλη προηγούμενη.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MyCurveFit, κατασκευάζεται η παρακάτω S-Curve για το Μοντέλο Fisher-Pry :



Εικόνα 42 : Αναμενόμενη Διείσδυση 5G στην Ελλάδα

Σύμφωνα με το Μοντέλο Πρόβλεψης Ζήτησης που επιλέχθηκε, η Ζήτηση του 5G μέσα στη δεκαετία 2019-2027, αναμένεται να διαμορφωθεί ως εξής :

X Axis Title	Y Axis Title
2019	8.35
2020	11.5642
2021	14.5651
2022	20.4654
2023	28.5664
2024	36.5644
2025	47.5641
2026	58.4578
2027	68.3545
2030	95.5651

Εικόνα 43 : Αναμενόμενο ποσοστό διείσδυσης

Με βάση το αναμενόμενο Ποσοστό Διείσδυσης του 5G στην Ελλάδα που προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, και λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη το υποθετικό Μερίδιο Αγοράς της Εταιρείας, προκύπτει ότι η Πελατειακή Βάση της Εταιρείας μας τη δεκαετία 2019-2028 αναμένεται να διαμορφωθεί όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :

Πίνακας 8 : Πελατειακή Βάση της Εταιρείας τη δεκαετία 2019-2028

Έτος	Ποσοστό διείσδυσης 5G στην Ελλάδα	Πελάτες
2019	10.5148	3487
2020	15.2029	12435
2021	21.4794	25343
2022	29.2349	53432
2023	39.9032	87654
2024	50.489	134534
2025	59.3298	209876
2026	70.9034	265443
2027	77.3424	325345
2028	85.3243	409876

5.3 Αξιολόγηση επένδυσης

Για την Αξιολόγηση/Εκτίμηση Επενδύσεων χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα. Κατά κύριο λόγο, το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται περισσότερο στην πράξη είναι αυτό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV). Η πείρα έχει δείξει ότι πρόκειται για το πλέον θεωρητικά σωστό μοντέλο από όσα χρησιμοποιούνται εν γένει. Το μοντέλο του Εσωτερικού Επιτοκίου Απόδοσης/Προεξόφλησης (Internal Rate of Return-IRR) έπεται σε μικρή απόσταση, κυρίως σε όρους ακρίβειας και χρησιμότητας. Οι υπόλοιπες τεχνικές χαρακτηρίζονται από 1 ή περισσότερα μειονεκτήματα.[61]

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, για τους σκοπούς της παρούσας Εργασίας, η αξιολόγηση της επένδυσης που πραγματοποιεί ο πάροχος που μοντελοποιούμε πραγματοποιήθηκε με τις εξής Μεθόδους/Δείκτες Αξιολόγησης-Απόδοσης Επένδυσης :

- Μέθοδος Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV)
- Μέθοδος Εσωτερικού Επιτοκίου Απόδοσης/Προεξόφλησης (Internal Rate of Return-IRR)
- Μέθοδος Δείκτη Κερδοφορίας (Profitability Index-PI)

Προτού παρέχουμε τα τελικά αποτελέσματα των εν λόγω μεθόδων για την αξιολόγηση της επένδυσής μας, κρίνεται σκόπιμο αλλά και αναγκαίο να κάνουμε μια μικρή αναφορά στις εν λόγω μεθόδους-ώστε να καταστεί σαφές η φιλοσοφία και η χρησιμότητά τους.

5.3.1 Μέθοδος Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV)

Τα θέματα χρονικής αξίας των χρημάτων έχουν ισχύ και αξία και στην εκτίμηση των επενδυτικών αποφάσεων. Οι επενδυτικές αποφάσεις περιλαμβάνουν μια αρχική πληρωμή, η οποία ακολουθείται από μία ροή ταμειακών εισπράξεων και ταμειακών εξόδων σε μεταγενέστερες περιόδους. Η εξίσωση/σχέση χρονικής αξίας η οποία καλείται Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value-NPV) είναι το πλέον θεωρητικώς σωστό μοντέλο για την εκτίμηση του βαθμού ελκυστικότητας των ευκαιριών επενδύσεων. Το μοντέλο ορίζεται ως εξής [61]:

$$NPV = -I + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

, όπου :

I : Η Αρχική Ταμειακή Ροή που απαιτείται για την επένδυση

CF_t : Η Προβλεπόμενη Ταμειακή Ροή, μετά φόρων, που προκύπτει στο τέλος του χρόνου t (η διαφορά μεταξύ λειτουργικών ταμειακών εισπράξεων και ταμειακών πληρωμών)

r : Ο απαιτούμενος, προσαρμοσμένος ως προς τον Κίνδυνο, Ρυθμός Απόδοσης

n : Η Οικονομική Ζωή/Διάρκεια του Project σε χρόνια

Γενικά, ισχύει η εξής «παραδοχή/πολιτική» σχετικά με την αποδοχή ή όχι μιας επένδυσης/project βάσει της Μεθόδου NPV [61]:

$$\begin{cases} \text{Av } NPV > 0 \implies \text{Αποδοχή του Project} \\ \text{Av } NPV < 0 \implies \text{Απόρριψη του Project} \\ \text{Av } NPV = 0 \implies \text{Αδιάφορο ως προς το Project} \end{cases}$$

5.3.2 Μέθοδος Εσωτερικού Επιτοκίου Προεξόφλησης (Internal Rate of Return-IRR)

Το Εσωτερικό Επιτόκιο Προεξόφλησης μιας επένδυσης είναι το Επιτόκιο Προεξόφλησης το οποίο εξισώνει την Παρούσα Αξία των αναμενόμενων Καθαρών Ταμειακών Ροών με την Αρχική Δαπάνη για την επένδυση. Επί της ουσίας, είναι εκείνο το επιτόκιο για το οποίο ισχύει η σχέση [61]:

$$\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = I$$

Ενώ για τον υπολογισμό της NPV είναι γνωστές οι τιμές όλων των μεταβλητών που «εμπλέκονται» στον τύπο υπολογισμού της, για τον προσδιορισμό του IRR η προσέγγιση είναι η ακόλουθη :

Τίθεται

$$NPV = 0 \implies \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = I$$

Υπολογίζεται η τιμή του Επιτοκίου Προεξόφλησης r που κάνει τις υπολογιζόμενες Ταμειακές Ροές ίσες με την Αρχική Δαπάνη για την επένδυση

Γενικά, ισχύει η εξής «παραδοχή/πολιτική» σχετικά με την αποδοχή ή όχι μιας επένδυσης/project βάσει της Μεθόδου IRR [61]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Av } IRR > r \implies NPV > 0 \implies \text{Αποδοχή του Project} \\ \text{Av } IRR < r \implies NPV < 0 \implies \text{Απόρριψη του Project} \\ \text{Av } IRR = r \implies NPV = 0 \implies \text{Αδιάφορο ως προς το Project} \end{array} \right.$$

5.3.3 Μέθοδος Δείκτη Κερδοφορίας (Profitability Index-PI)

Ο Δείκτης Κερδοφορίας ορίζεται από την σχέση [61]:

$$PI = \frac{\text{Present Value of Cash Inflows}}{\text{Initial Investment}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{I} = \frac{NPV + I}{I} = \frac{NPV}{I} + 1$$

Γενικά, ισχύει η εξής «παραδοχή/πολιτική» σχετικά με την αποδοχή ή όχι μιας επένδυσης/project βάσει της Μεθόδου PI [61]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Av } PI > 1 \implies NPV > 0 \implies \text{Αποδοχή του Project} \\ \text{Av } PI < 1 \implies NPV < 0 \implies \text{Απόρριψη του Project} \\ \text{Av } PI = 1 \implies NPV = 0 \implies \text{Αδιάφορο ως προς το Project} \end{array} \right.$$

Ο Δείκτης Κερδοφορίας PI παρέχει ακριβώς την ίδια πληροφορία για την αποδοχή ή απόρριψη κάποιας επένδυσης με αυτήν του NPV. Ωστόσο, μπορούν να συμβούν επιπλοκές κατά την εκτίμηση επενδύσεων με βάση το μέγεθος PI, στις περιπτώσεις όπου η απόφαση λαμβάνεται μεταξύ αμοιβαία αποκλειόμενων projects. Αυτό σημαίνει ότι τυχόν επιλογή μιας επένδυσης, αυτόματα συνεπάγεται την απόρριψη κάποιας άλλης ανταγωνιστικής επένδυσης.

5.3.4 Αποτελέσματα Αξιολόγησης Επένδυσης

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, προχωράμε πλέον στην εξαγωγή των καθαρών οικονομικών αποτελεσμάτων που αφορούν στην επένδυσή μας, με απώτερο σκοπό να διαπιστώσουμε το κατά πόσο αυτή είναι συμφέρουσα ή όχι.

Αρχικά, παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα, ο οποίος απεικονίζει τα Έσοδα της Εταιρείας μας ανά έτος στη δεκαετία 2019-2028 (τα οποία προέρχονται από κάθε ένα από τα πακέτα που θα προσφέρει η Εταιρεία μας στο αγοραστικό κοινό κατά το ίδιο χρονικό διάστημα :

Πίνακας 9: Έσοδα/Έτος για κάθε Πακέτο της Hellas 5G τη δεκαετία 2019-2028

Πακέτο	Έσοδα 2019	Έσοδα 2020	Έσοδα 2021	Έσοδα 2022	Έσοδα 2023	Έσοδα 2024	Έσοδα 2025	Έσοδα 2026	Έσοδα 2027	Έσοδα 2028	Σύνολο εσόδων πακέτου
Hellas5G 1	147.096,00 €	530.884,80 €	1.199.534,40 €	2.260.569,60 €	3.801.038,40 €	5.846.126,40 €	8.334.230,40 €	11.128.924,80 €	14.066.481,60 €	17.005.982,40 €	64.320.868,80 €
Hellas5G 2	510.750,00 €	1.843.350,00 €	4.165.050,00 €	7.849.200,00 €	13.198.050,00 €	20.299.050,00 €	28.938.300,00 €	38.642.100,00 €	48.841.950,00 €	59.048.550,00 €	223.336.350,00 €
Hellas5G 3	286.020,00 €	1.032.276,00 €	2.332.428,00 €	4.395.552,00 €	7.390.908,00 €	11.367.468,00 €	16.205.448,00 €	21.639.576,00 €	27.351.492,00 €	33.067.188,00 €	125.068.356,00 €
Σύνολο	943.866,00 €	3.406.510,80 €	7.697.012,40 €	14.505.321,60 €	24.389.996,40 €	37.512.644,40 €	53.477.978,40 €	71.410.600,80 €	90.259.923,60 €	109.121.720,40 €	412.725.574,80 €

Πλέον, έχοντας στη διάθεσή μας τα Έσοδα της Εταιρείας μας από τα πακέτα που αυτή θα προσφέρει, και λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω παράγοντες :

Ο απαιτούμενος, προσαρμοσμένος ως προς τον Κίνδυνο, Ρυθμός Απόδοσης (Discount Rate) έστω ότι είναι ίσος με 5%.

Οι Αποσβέσεις των Αναβαθμίσεων του δικτύου καθώς και της Αγοράς Φάσματος αποσβένονται σε 10 χρόνια, με σταθερό Συντελεστή Απόσβεσης 10%.

Τα Κέρδη (Profits) της Εταιρείας υπολογίζονται από τα Έσοδα, τις Επενδύσεις, την Υποτίμηση της Αξίας (Depreciation) και τους Φόρους.

Ο Συντελεστής Φορολογίας (Taxes) στο 25%

Οι Εταιρείες θα φορολογούνται (με τον αντίστοιχο Συντελεστή Φορολογίας) μόνο όταν αποδεικνύεται από τους Ισολογισμούς τους η ύπαρξη Κέρδους, ενώ σε περίπτωση Ζημίας δεν θα υπάρχει πρόσθετη φορολογική επιβάρυνση.

Οι Ταμειακές Ροές μετά Φόρων (Free Cash Flows) υπολογίζονται από τα Έσοδα αν από αυτά αφαιρεθούν το Κόστος Συντήρησης (OPEX Cost) και οι Φόροι (Taxes).

Το Μέσο Κόστος Κεφαλαίου-WACC-της Επιχείρησής μας, το οποίο είναι ο Ρυθμός Απόδοσης με τον οποίο οι επενδυτές προθυμοποιούνται να

παρέχουν χρηματοδότηση για το Project σε σημερινές τιμές (και επί της ουσίας απεικονίζει τον Κίνδυνο του project), είναι ίσο με 13%.[61]

Οι Προβλεπόμενες Ταμειακές Ροές (Present Value of Free Cash Flows) είναι οι Αποπληθωρισμένες Ταμειακές Ροές μετά Φόρων.[61]

Το Ισοζύγιο Ταμειακών Ροών μετά Φόρων (Cash Balance), το οποίο είναι και το τελευταίο και σημαντικότερο αποτέλεσμα (καθώς καθορίζει την αποτελεσματικότητα της επένδυσης), είναι ο δείκτης που καθορίζει κατά πόσο η επένδυση είναι κερδοφόρα και σε ποιο βαθμό. Επί της ουσίας, το Ισοζύγιο Ταμειακών Ροών μετά Φόρων (Cash Balance) για το έτος t είναι η Συσσωρευτική Ταμειακή Ροή το έτος t . [61]

, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας στον οποίο βρίσκονται όλα τα οικονομικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για την Αξιολόγηση της Επένδυσής μας :

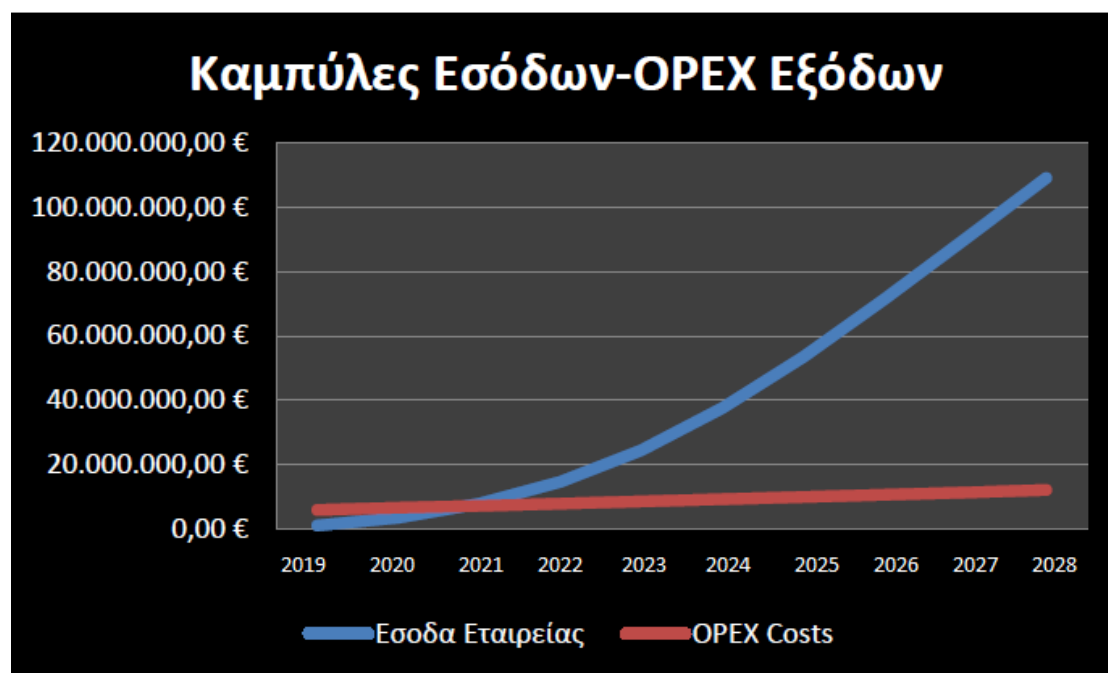
Πίνακας 10 : NPV-IRR-PI της Επένδυσης

NPV	PV of Expected Cash Flows	IRR	PI
52.642.251,95 €	88.935.251,95 €	26%	2,450,479,485

Τα δεδομένα, «μεταφράζονται» ως εξής :

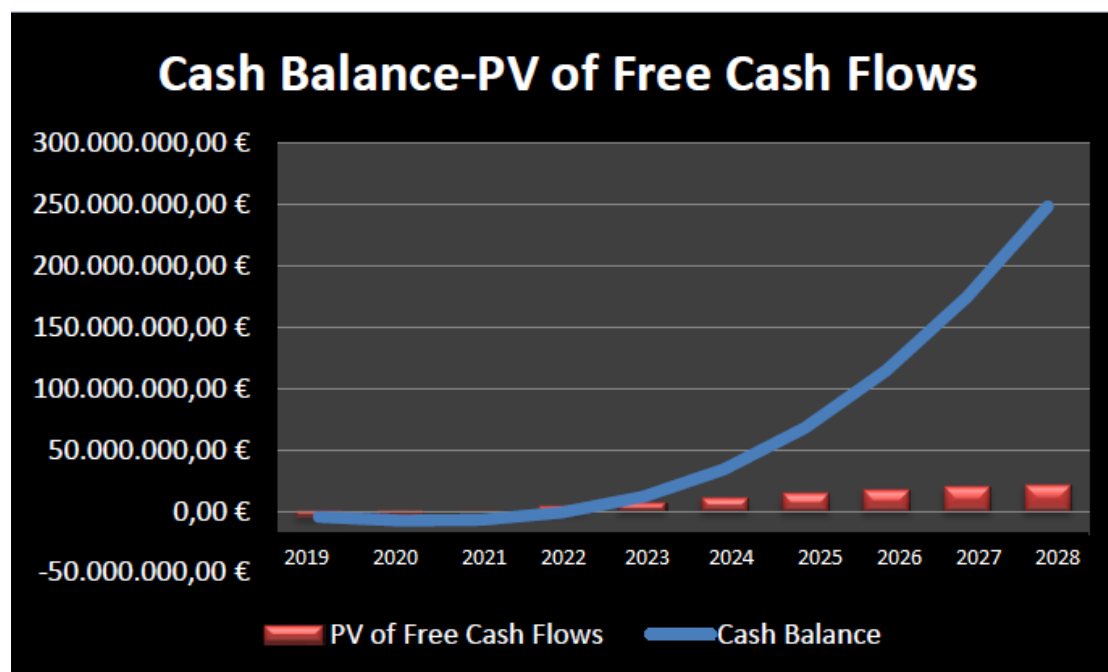
Με βάση τα όσα ειπώθηκαν αναλυτικά για τον κάθε ένα από τους Δείκτες Αξιολόγησης Επένδυσης NPV, IRR, PI, προκύπτει ότι η Επένδυσή μας στην Εταιρεία σε βάθος δεκαετίας είναι συμφέρουσα, καθώς με Προεξοφλητικό Επιτόκιο 13% οι Προβλεπόμενες Ταμειακές Ροές ανέρχονται σε 88.935.251,95 €-ποσό μεγαλύτερο από την Αρχική Επένδυση των 36.293.000 € που πραγματοποιήθηκε. Το προκύπτον NPV της εν λόγω επένδυσης υπολογίζεται σε 52.642.251,95 €, κάτι το οποίο υποδεικνύει ότι η ανάληψη της αναλυθείσας επένδυσης μπορεί να είναι συμφέρουσα. Στην ίδια κατεύθυνση «κινούνται» και τα αποτελέσματα των άλλων 2 Δεικτών Αξιολόγησης-IRR και PI- επιβεβαιώνοντας έτσι τα αποτελέσματα του Δείκτη Αξιολόγησης Επένδυσης NPV.

Τέλος, στα Σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται αρχικά οι Καμπύλες Εσόδων-Λειτουργικών Εξόδων (OPEX Costs) της Εταιρείας μας ανά έτος λειτουργίας :



Εικόνα 44 : Καμπύλες Εσόδων-OPEX Εξόδων ανα έτος λειτουργίας

, καθώς και η εξέλιξη της πορείας τόσο του Ισοζυγίου Ταμειακών Ροών μετά Φόρων (Cash Balance) της Εταιρείας μας όσο και των Προβλεπόμενων Ταμειακών Ροών (Present Value of Free Cash Flows) της κατά τη δεκαετία 2019-2028 :



Εικόνα 45 : Cash Balance-PV of Free Cash Flows ανά Έτος Λειτουργίας

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα παραπάνω 2 Σχήματα :

- ✚ Τα Έσοδα της Εταιρείας μας ξεπερνούν τα αντίστοιχα Λειτουργικά Έξοδα (OPEX Costs) κατά τον 3ο χρόνο λειτουργίας της
- ✚ Οι Προβλεπόμενες Ταμειακές Ροές (Present Value of Free Cash Flows) της Εταιρείας μας γίνονται θετικές κατά τον 3ο χρόνο λειτουργίας της
- ✚ Το Ισοζύγιο Ταμειακών Ροών μετά Φόρων (Cash Balance) της Εταιρείας μας γίνεται θετικό κατά τον 5ο χρόνο λειτουργίας της. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο όπου η σχετική καμπύλη τέμνει τον άξονα x'x είναι λίγο μετά τον 4ο χρόνο λειτουργίας της, και είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία επιτυγχάνεται Αποπληρωμή της Επένδυσης και Καθαρά Κέρδη (Περίοδος Αποπληρωμής-Payback Period).

6 ΑΡΘΡΑ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟ 5G

6.1 Γιατί θα αλλάξει τον κόσμο μας ;

Ταχύτερο από το 4G και με 1.000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα, θα σημάνει την οριστική μετάβαση στην ασύρματη δικτύωση των πάντων.

Από το 2007 και το δίκτυο EDGE που ήταν το πρώτο πραγματικά mobile δίκτυο (το GPRS ήταν ένα αστείο εξαρχής) μέχρι το 4G (δέκα φορές ταχύτερο από το 3G) που έχουν σχεδόν όλες οι συσκευές που πωλούνται σήμερα, η εξέλιξη της ταχύτητας ήταν καταϊγιστική. Στις μέρες μας, η αλλαγή δείχνει να έχει επιβραδύνει λίγο κυρίως επειδή το 4G καλύπτει τις ανάγκες του δικτυωμένου πλήθους.

Όπως, όμως, έγινε φανερό στο Mobile World Congress που πραγματοποιήθηκε πριν από λίγες μέρες, το δίκτυο πέμπτης γενιάς ήδη βρίσκεται στα σκαριά, θα έχει 1.000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από το 4G και θα είναι έτοιμο και λειτουργικό σε 5 χρόνια από σήμερα.

Πόσο ταχύτερο θα είναι το 5G από το 4G; Αυτό δεν έχει τόση σημασία καθώς οι απαιτήσεις των καιρών θα είναι για όλο και περισσότερες συσκευές, όχι μόνο κινητά και ταμπλέτες, αλλά αυτοκίνητα, μέσα συγκοινωνίας, μικροσυσκευές στο σπίτι και έξω, Internet of Things κ.ά. Έτσι οι προσπάθειες επικεντρώνονται στη χωρητικότητα με τον στόχο να είναι στις 7 τρισεκατομμύρια συσκευές, δηλαδή χίλιες για κάθε κάτοικο της Γης. Επιπλέον, το δίκτυο 5G θα καταναλώνει 90% λιγότερη ενέργεια με προφανές όφελος στο κόστος, στο περιβάλλον και τις εκπομπές άνθρακα.

Ως προς τις πρακτικές εφαρμογές, αυτές πάνε πολύ μακρύτερα από το να έχουμε απλώς τέλειο σήμα για το Spotify στο αυτοκίνητο. Θα συνδέσουν τους πάντες με τα πάντα και θα έχουμε, για παράδειγμα, προσωποποιημένες υπηρεσίες υγείας, καλύτερη διαχείριση των μετακινήσεων των ανθρώπων και της μεταφοράς των αγαθών, βελτιωμένη πρόσβαση στη γνώμη και τον πολιτισμό για όλους, ακόμα και ριζική αλλαγή των διαδικασιών των δημοσίων υπηρεσιών. Θα είναι παντού: στο σπίτι, στο αυτοκίνητο, το νοσοκομείο, τις ΔΕΚΟ και, φυσικά, στο κινητό μας, όποια μορφή και αν έχει πάρει στο μεταξύ.

Ποια θα είναι αυτή ακριβώς; Κανείς δεν ξέρει. Με τα κινητά μας να γίνονται όλο και πιο ισχυρά, με κάμερες και οθόνες HD, άπειρους αισθητήρες και

κεραίες και με εφαρμογές που δεν μπορούμε καν να φανταστούμε, το μέλλον αναμένεται πολύ ενδιαφέρον και εντελώς ασύρματο.

6.2 Συμμετοχή ΟΤΕ στις έρευνες

Σε τέσσερα ερευνητικά προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης με αντικείμενο το σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, υποδομών και υπηρεσιών 5ης γενιάς (5G), συμμετέχει ο Όμιλος ΟΤΕ. Σύμφωνα με σχετική ανακοίνωση του Ομίλου, ο ΟΤΕ συμμετέχει σε 4 από τα 19 ερευνητικά χρηματοδοτούμενα έργα του προγράμματος 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G-PPP), μέσω του οποίου η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί την έρευνα και ανάπτυξη υποδομών και τεχνολογιών 5G, με στόχο την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ευρωπαϊκής βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο.

«Με τη συμμετοχή του στα ερευνητικά προγράμματα, ο Όμιλος ΟΤΕ», επισημαίνεται σε σχετική ανακοίνωση, «αναμένεται να ενισχύσει την τεχνολογική του υπεροχή και να αναβαθμίσει τις υπηρεσίες που προσφέρει στους πελάτες του, καθώς αποκτά τεχνογνωσία σε θέματα 5G από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης της τεχνολογίας και συμμετέχει ενεργά στη διαμόρφωση μελλοντικών τεχνολογικών λύσεων, εμπορικών εφαρμογών και καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων».

Να σημειωθεί ότι τα δίκτυα 5G είναι το μέλλον των κινητών επικοινωνιών και εκτιμάται πως θα προσφέρουν στο συνδρομητή τεράστιες ταχύτητες mobile internet, μεγαλύτερες ακόμη και από 1Gbps, σταθερή ποιότητα υπηρεσιών ακόμα και εν κινήσει με υπερ-υψηλές ταχύτητες, και μεγαλύτερη αυτονομία.

Παράλληλα, θα υποστηρίξουν τη σύγκλιση δικτύων, υπηρεσιών και εξοπλισμού, καθώς και τεράστιες δυνατότητες διασύνδεσης συσκευών/συστημάτων/αισθητήρων στο Internet (Internet of Things), καθώς μία υποδομή θα καλύπτει τις αυξημένες απαιτήσεις σε τομείς όπως αυτοκίνηση, ενέργεια, τρόφιμα, «έξυπνες» πόλεις, διακυβέρνηση, ιατρική φροντίδα, κατασκευές και δημόσιες μεταφορές.

6.3 Η Samsung μπαίνει στον αστερισμό του 5G

Σε ταχύτητες 5G μπαίνει η Samsung, με την παρουσίαση μίας κεραίας συμπαγών διαστάσεων για τις ανάλογες υποδομές.

Η κεραία που παρουσίασε η Samsung είναι μικρότερη από το ένα χιλιοστό σε διαστάσεις και συνοδεύεται από έναν αντίστοιχου μεγέθους ενισχυτή, προκειμένου να γίνει σημαντικά μικρότερο το μέγεθος των συσκευών που συνδέονται με δίκτυα 5G. Η νέα τεχνολογία της Samsung θα χρησιμοποιεί το

φάσμα των 28 GHz, με ταχύτητες downloading που μπορούν να ξεπερνούν ακόμα και τα 12 Gbps.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Samsung θέλει να γίνει ένας από τους τρεις κορυφαίους κατασκευαστές στο θέμα του 5G και έχει δηλώσει την αφοσίωσή της στην προώθηση της εν λόγω τεχνολογίας ασύρματης δικτύωσης. Για την επέκταση της τεχνολογίας και τη διασφάλιση των υψηλών ταχυτήτων, η Samsung χρησιμοποιεί την τεχνολογία του επανομαζόμενου multi-cell handover, η οποία απαιτεί τη χρήση πολλαπλών σταθμών βάσης.

Η Samsung θέλει να είναι εφικτό ακόμα και σε κινούμενα οχήματα να μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένα με το δίκτυο 5G, στοιχείο που καθιστά απαραίτητη την εγκατάσταση πολλών σταθμών. Το 5G δεν είναι κάτι που θα δούμε να προσφέρεται ως υπηρεσία σύντομα, καθώς υπάρχουν ακόμα πολλές τεχνικές δυσκολίες, αλλά η Samsung πιστεύει ότι θα μπορέσει να ξεκινήσει να κάνει την εμφάνισή του από τα τέλη του 2017 ή τις αρχές του 2018.

6.4 Συνεργασία Ericsson και Telefonica για το 5G

Η Ericsson και ο παγκόσμιος πάροχος Telefonica υπέγραψαν μνημόνιο συμφωνίας για την ανάπτυξη 5G τεχνολογιών, προϊόντων και υπηρεσιών. Οι δύο εταιρείες θα υποστηρίζουν από κοινού υπάρχουσες και νέες καινοτομίες, προς την ενίσχυση της ανάπτυξης 5G τεχνολογιών, αλλά και του επιχειρηματικού περιβάλλοντος, στο οποίο αυτές μπορούν να εξελιχθούν. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στα προγράμματα 5G PPP και ETP Networld 2020, τα οποία προάγει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο το προγράμματος Horizon 2020.

Ένα παράδειγμα αυτής της συνεργασίας, που έχει ήδη ξεκινήσει, είναι η πρόσφατη δημιουργία του πρώτου εργαστηρίου υπεροχής 5G από την Telefonica [μέσω της μονάδας καινοτομίας, Telefonica I+D] και του Ιδρύματος Δικτύων IMDEA, στην Ισπανία. Το εργαστήριο 5TONIC στόχο έχει να δημιουργήσει ένα ανοικτό οικοσύστημα έρευνας και καινοτομίας. Η Ericsson είναι ο πρώτος κατασκευαστής που συμμετέχει στην πρωτοβουλία, στο πλαίσιο του προγράμματός της 5G για την Ευρώπη (5G for Europe).

Ο **Ulf Ewaldsson**, CTO, Ericsson, δήλωσε: “Η εξέλιξη του 5G πραγματοποιείται σταδιακά, με τη μετάβαση στη λειτουργία ολοκληρωμένων, εμπορικών συστημάτων 5G, να μην αναμένεται πριν το 2020. Προκειμένου να επιτύχουμε τις προσδοκώμενες δυνατότητες 5G, θα πρέπει να συνεχίσουμε να επενδύουμε σε από κοινού έρευνες και σε δοκιμές 5G τεχνολογιών. Είμαστε υπερήφανοι για τη συνεργασία μας με την Telefónica, ώστε να ηγηθούμε της καινοτομίας σε αυτόν τον τομέα”.

Ο **Enrique Blanco**, CTO, Telefónica Group, δήλωσε: “Η Telefónica συνεχίζει να ενισχύει τη θέση και δράση της, στην ανάπτυξη 5G τεχνολογιών, έναν τομέα όπου συνεισφέρουμε ενεργά σε διεθνή έργα, βιομηχανικές ενώσεις και φορέων τυποποίησης. Αντιμετωπίζουμε το λανσάρισμα του 5G, όχι ως μια μελλοντική ενέργεια, αλλά σαν ένα οικοσύστημα ανάπτυξης, που κρίνεται αναγκαίο να ξεκινήσει. Μέσω αυτής της συμφωνίας και σε συνδυασμό με πρωτοβουλίες, όπως το εργαστήριο 5TONIC στην Ισπανία, θα είμαστε σε θέση να πραγματοποιήσουμε δοκιμές και να ιεραρχήσουμε τις λειτουργίες και υπηρεσίες δικτύου, οι οποίες θα αποτελέσουν μέρος των 5G δικτύων, στο άμεσο μέλλον.”

Οι κοινές πρωτοβουλίες των δύο εταιρειών περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων έρευνα, συζητήσεις, επιτόπιες δοκιμές και επιδείξεις τεχνολογίας και εξοπλισμού, με στόχο την υποστήριξη αρχιτεκτονικής 5G δικτύων, επικοινωνιών, υπηρεσιών και εφαρμογών. Με αυτόν τον τρόπο η Ericsson και η Telefónica θα αναπτύξουν ένα κοινό πλάνο κατανόησης και δράσης, σε περιπτώσεις εφαρμογής, απαιτήσεων και σεναρίων λειτουργίας ασύρματων συστημάτων 5G και 5G δίκτυο κορμού, βάσει μιας εικονικής αρχιτεκτονικής δικτύου.

Η Ericsson κατέχει ηγετική θέση και αποτελεί κινητήρια δύναμη στην τυποποίηση του 5G, από την έρευνα και τις επιτόπιες δοκιμές πριν από την τυποποίηση έως τις εργασίες τυποποίησης από κοινού με παγκόσμιου βεληνεκούς φορείς τυποποίησης και ομάδες του κλάδου. Μέσω σημαντικών τεχνολογικών προόδων, όπως τα πρώτυπα ραδιοδικτύου 5G της Ericsson, τα οποία περιλαμβάνουν προηγμένο σχεδιασμό κεραίας, MIMO πολλαπλών χρηστών και μορφοποίησης δέσμης ακτινοβολίας, η Ericsson και οι πελάτες της, θα αποτελούν

βασικούς παράγοντες στη διαμόρφωση τεχνολογίας δικτύου κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς, έως τη διάθεσή τους στο κοινό.

6.5 Πέντε προκλήσεις στον δρόμο προς τα δίκτυα 5G

Σε τμήματα έρευνας και ανάπτυξης βρίσκονται σήμερα μια σειρά ασύρματων τεχνολογιών μετάδοσης δεδομένων που θα κάνουν πραγματικότητα τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς, κύριο συστατικό της δικτυωμένης κοινωνίας του, όχι και τόσο μακρινού, μέλλοντος. Οι απαιτήσεις που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τα δίκτυα 5G είναι εξαιρετικά υψηλές και συγκεκριμένα:

- 1.000 φορές μεγαλύτερος όγκος δεδομένων ανά περιοχή, καθώς οι διαχειριστές των δικτύων θα κληθούν να εξυπηρετούν πολύ περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα
- 10 έως και 100 φορές μεγαλύτερος αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών, όπως αυτοκίνητα, ψυγεία, οικιακές ηλεκτρικές συσκευές ακόμα και το σύστημα ύδρευσης, εξοπλισμένα με αισθητήρες που καταγράφουν την τρέχουσα κατάσταση της λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, η Ericsson συνεργάζεται με την Volvo στην Γερμανία και μαζί έχουν αναπτύξει το «έξυπνο αυτοκίνητο». Η Volvo θέλει να είναι σε θέση π.χ. να ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας του αυτοκινήτου δικής της κατασκευής ώστε να ειδοποιεί εγκαίρως τον ιδιοκτήτη για service εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Με αυτό τον τρόπο, οραματίζονται οι κατασκευαστές αυτοκινήτων, θα μπορούσαν να μειώσουν τον κίνδυνο ατυχημάτων από βλάβη στο όχημα, λειτουργώντας προληπτικά.
- Στα δίκτυα 5G θα κυκλοφορεί πολύ μεγαλύτερος όγκος δεδομένων απ'ότι σήμερα (2,6GB κίνηση σήμερα από βίντεο, σύμφωνα με το τρέχον Mobility Report της Ericsson). Η Ε.Ε. έχει θέσει την απαίτηση για 10 έως και 100 φορές μεγαλύτερη κίνηση στις ραδιοσυχνότητες.
- Προδιαγραφές έχουν τεθεί και για την αυτονομία των δικτυωμένων συσκευών: 10 φορές μεγαλύτερη αυτονομία για μια ενεργειακά λιποδίαιτη επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή (δηλαδή, νέες συσκευές με πολύ μεγαλύτερη αυτονομία, και δυνατότητα επικοινωνίας με μικρή κατανάλωση ενέργειας, σε αντίθεση με τις τρέχουσες τεχνολογίες σήμερα που στραγγίζουν την μπαταρία για να επικοινωνήσουν).
- Οι εφαρμογές που έρχονται εκτιμάται ότι θα απαιτούν πολύ μικρό latency, δηλαδή ο χρόνος αναμονής για απόκριση στην σύνδεση πρέπει να μειωθεί πέντε φορές, σύμφωνα με την Επιτροπή, για να τρέχουν απρόσκοπτα εφαρμογές όπως τα παιχνίδια ή η αναπαραγωγή βίντεο σε πραγματικό χρόνο.

Για να γίνουν όλα αυτά εφικτά, δίκτυα (British Telecom, Deutsche Telecom, France Telecom/Orange, Telecom Italia, Telefonica, Portugal Telecom) και εταιρείες κατασκευής εξοπλισμού και διαχείρισης δικτύων (Ericsson, Alcatel-Lucent, Nokia Siemens Networks, Thales Communications), αλλά και

εταιρείες ανάπτυξης λογισμικού (SAP) και κατασκευαστές αυτοκινήτων (BMW) συμμετέχουν στην προσπάθεια ανάπτυξης των ευρωπαϊκών δικτύων 5G.

Έχεις καλό σήμα; Μπορώ να περάσω;

Μια από τις τεχνολογίες που τελεί υπό ανάπτυξη είναι η λεγόμενο επικοινωνία Multi-Hop, που επιτρέπει σε μια συσκευή να επικοινωνεί με το δίκτυο, αξιοποιώντας την (καλύτερη) σύνδεση μιας άλλης συσκευής, η οποία π.χ. βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης. Το μοντέλο θυμίζει τον τρόπο αναδιανομής bit του BitTorrent αλλά η διαφορά εδώ είναι ότι, για να γίνει το... χοπ από συσκευή σε συσκευή, τίποτα δεν είναι κρυφό -για να χρησιμοποιηθεί ως κόμβος μια συσκευή απαιτείται να γνωρίζει τι θέλει να την χρησιμοποιήσει.

Όπως θα ακούσετε την Hana Maurer Sibley (επικεφαλής της Ericsson σε ό,τι αφορά το Mobile Broadband), να λέει στο βίντεο που ακολουθεί, σήμερα επειδή ένας χρήστης μπορεί να δει ταινία από την Netflix δεν σημαίνει ότι ένας άλλος μπορεί να το κάνει μέσω αυτού -κάθε χρήστης πρέπει να ανοίξει την δική του σύνοδο επικοινωνίας με το δίκτυο. Η επικοινωνία Multi-hop δεν είναι έτοιμη ακόμα.

Ταλαντεύεται η γέφυρα, εκκενώστε άμεσα το τούνελ

Κάτι ακόμα που δεν υπάρχει σήμερα και απαιτείται για να γίνει πραγματικότητα το 5G αφορά στις δικτυωμένες υποδομές, όπως είναι οι συναγερμοί, το δίκτυο ηλεκτροδότησης, οι γέφυρες και τα τούνελ. Το σκεπτικό είναι ότι, ίσως, θα θέλαμε όλα αυτά να είναι δικτυωμένα ώστε να γνωρίζουμε ανά πάσα στιγμή την κατάστασή τους. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία με το δίκτυο -και αυτό είναι κάτι που δεν έχει ακόμα επιτευχθεί.

Το LTE επιτρέπει την επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή, με το 5G όμως η επικοινωνία αυτή θα βελτιωθεί και θα αναπτυχθούν πολλές νέες εφαρμογές. *Οτιδήποτε έχει ηλεκτρισμό θα μπορεί να μιλήσει στο δίκτυο*, λένε οι οραματιστές της δικτυωμένης κοινωνίας και υπολογίζεται ότι, την εποχή του 5G -η οποία παρεμπιπτόντως δεν είναι πολύ μακριά, αφού ξεκινάει το 2020-50 δισεκατομμύρια μηχανές θα μιλάνε με το δίκτυο.

Το κυκλοφοριακό πρόβλημα και η έξυπνη δρομολόγηση

Εκτός από το multi-hop και την εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία που θα εξυπηρετεί τις δικτυωμένες υποδομές, το 5G θα πρέπει να επιτρέψει την επικοινωνία μέσω και μεταξύ των αυτοκινήτων.

Το αυτοκίνητό μας θα πρέπει να μπορεί να επικοινωνήσει με τα αυτοκίνητα που προηγούνται ή ακολουθούν ή ακόμα και με ένα όχημα που κινείται δύο χιλιόμετρα μπροστά. Ακόμα κι αν οδηγός δεν χρειάζεται αυτή την επικοινωνία,

το όχημα μπορεί να αξιοποιεί μια πληροφορία, όπως για παράδειγμα την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα προπορευόμενα οχήματα. Προς το παρόν, η επικοινωνία από όχημα σε όχημα ή μέσω οχημάτων δεν είναι εφικτή.

Φάσμα υπάρχει, αλλά η εμβέλεια είναι μικρή, κεραίες παντού;

Τέλος, μια άλλη πρόκληση για τα δίκτυα 5G είναι η χρήση των εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων για την υποστήριξη των επικοινωνιών με μεγαλύτερη ταχύτητα, κάτι που απαιτεί εγκαταστάσεις με μεγάλη πυκνότητα, αφού η εμβέλειά τους είναι μικρή («αν στεκόμουν εδώ, δεν θα με ακούγατε εκεί πίσω»).

«Το φάσμα συχνοτήτων υπάρχει, αλλά προς το παρόν, δεν ξέρουμε πως να το αξιοποιήσουμε», μας είπε η Sibley. Τα δίκτυα που αξιοποιούν τις εξαιρετικά υψηλές συχνότητες δεν έχουν μεγάλη εμβέλεια, κι αυτό είναι κάτι που θα πρέπει να επιλυθεί με την εγκατάσταση προηγμένου εξοπλισμού, σε μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Υπό διαμόρφωση τα στάνταρτ για το 5G

Εκτός από αυτά, είναι γεγονός πως δεν έχουμε ακόμα καταλήξει σε όλα τα απαραίτητα βιομηχανικά στάνταρτ για το 5G ([περισσότερα αναμένονται από τον οργανισμό 3GPP](#)). Εκτός από την προτυποποίηση, απαραίτητος είναι επίσης ο εκσυγχρονισμός και η βελτίωση των υφιστάμενων δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όχι μόνο για να στηρίξουν το 5G αλλά και για να συνεχίσουν να ανταποκρίνονται στις μελλοντικές ανάγκες.

- Ο στόχος που έχει τεθεί είναι το 2020 να είναι εμπορικά διαθέσιμα τα πρώτα δίκτυα πέμπτης γενιάς, που θα συνυπάρχουν με το 4G, το 3G ακόμα και το 2G, όπως άλλωστε συνέβαινε και με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Πόσο θα κοστίσει το 5G;

Η προσπάθεια που γίνεται στην Ε.Ε. είναι μεγάλη και το κόστος του 5G φαίνεται πως θα είναι υψηλό. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επενδύσει πολλά εκατομμύρια ευρώ για τα ασύρματα δίκτυα του μέλλοντος -από το 2007 έως το 2013 οι επενδύσεις της Ε.Ε. ξεπερνούσαν τα 700 εκατομμύρια ευρώ στα δίκτυα του μέλλοντος, τα μισά από τα οποία αφορούν στην ασύρματη δικτύωση, και συνέβαλαν ήδη στην ανάπτυξη του 4G. Πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων για το 5G τρέχουν αυτή την περίοδο στην Ε.Ε. -το METIS (χρηματοδότηση 16 εκατ. ευρώ από την Ε.Ε., που συμπληρώνονται από ιδιωτικές επενδύσεις σε σύνολο 27 εκατ. ευρώ), το 5GNow, iJoin, TROPIC, Mobile Cloud Networking, Combo, Moto και PhyLaws είναι μερικά από αυτά.

6.6 Τελευταίες εξελίξεις

Ξεκίνησε στην Αθήνα το πανευρωπαϊκό συνέδριο για το 5G

Θα εξετάσει τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της τεχνολογίας

Την εναρκτήρια ομιλία στο πανευρωπαϊκό συνέδριο για τα δίκτυα και τις τηλεπικοινωνίες αναμένεται να δώσει αύριο η ευρωβουλευτής Εύα Καϊλή. Το συνέδριο που διοργανώνεται στην Αθήνα, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα του χώρου, συγκεντρώνοντας αξιωματούχους των ευρωπαϊκών οργάνων, εκπροσώπους επιχειρήσεων και ακαδημαϊκούς.

Η Ενιαία Ψηφιακή Αγορά αναμένεται να προσθέσει πάνω από 400 δις. το χρόνο στην ευρωπαϊκή οικονομία δημιουργώντας χιλιάδες θέσεις εργασίας. Η Ελλάδα οφείλει να βρίσκεται στο κέντρο των εξελίξεων για να επωφεληθεί, επισημαίνει η ευρωβουλευτής Εύα Καϊλή, με αφορμή το αυριανό πανευρωπαϊκό συνέδριο για τα δίκτυα και τις τηλεπικοινωνίες που πραγματοποιείται στην Αθήνα.

Φέτος, το συνέδριο θα εξετάσει τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της τεχνολογίας 5G σε μια σειρά από τομείς εφαρμογής της. Η ευρωβουλευτής στην εναρκτήρια ομιλία της που έχει δημοσιοποιηθεί από τους διοργανωτές θα τονίσει την σημασία του 5G για τη Ενιαία Ψηφιακή Αγορά και για το "Internet of Things", τονίζοντας τα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη που μπορεί να προσφέρει. Όπως έχει ήδη δηλώσει στο παρελθόν: Η Εύα Καϊλή τονίζει, άλλωστε, με κάθε ευκαιρία την ανάγκη πρόβλεψης για τις χώρες που λόγω εθνικών θεμάτων χρειάζονται παραπάνω χρόνο προσαρμογής, ώστε να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα των νέων τεχνολογιών.

Στο συνέδριο που ξεκίνησε τις εργασίες από σήμερα οι ομιλητές αναφέρθηκαν στις επιπτώσεις που θα έχουν οι τελευταίες εξελίξεις γύρω από την ανάπτυξη συστημάτων τηλεπικοινωνιών και υπηρεσιών 5G για πιο γρήγορη, αποτελεσματικότερη, ασφαλέστερη και σταθερή διαδραστικότητα κατά τη χρήση του Internet.

Εξελίξεις, που όπως τόνισαν αφορούν όχι μόνο την ακαδημαϊκή κοινότητα, αλλά, κυρίως, τους επενδυτές και επαγγελματίες που ενδιαφέρονται, αφενός μεν να ενημερωθούν από την πηγή της έρευνας για τις τάσεις της αγοράς των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αφετέρου δε να γνωρίσουν νέες σχετικές εφαρμογές στην ψηφιακή οικονομία (π.χ. για έξυπνες πόλεις, νέα συστήματα βιομηχανικής παραγωγής, έξυπνα συστήματα ενέργειας, κ.λπ.)

Η συγκεκριμένη θεματική, βρίσκεται στον πυρήνα των στόχων της ΕΕ για την ανάπτυξη της καινοτομίας και των θέσεων εργασίας και την επανατοποθέτησή της ως παγκόσμιο ηγέτη της έρευνας.

Στο χώρο του συνεδρίου διεξάγεται και έκθεση, όπου θα παρέχεται πλούσιο ενημερωτικό υλικό από τους εκθέτες.

Το γεγονός ότι το πανευρωπαϊκό συνέδριο EuCNC2016 επέστρεψε στην Ελλάδα (με άλλες μορφές διοργάνωσης, φιλοξενήθηκε αντίστοιχα το 1998 στη Ρόδο, το 2002 στη Θεσσαλονίκη και το 2006 στη Μύκονο) έχει πολλαπλή σημασία. Αφενός, διότι πρόκειται για τον κορυφαίο επιστημονικό θεσμό της

ΕΕ στο συγκεκριμένο τομέα, αφετέρου, διότι αναδεικνύεται η δυναμική των ελληνικών πανεπιστημίων και εταιριών στο να παραμένουν ανταγωνιστικά και στην πρώτη γραμμή της έρευνας.

Στην Ελλάδα, το συνέδριο υποδέχονται το Πανεπιστήμιο Πειραιώς με τη συνδρομή του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το EUCNC2016 είναι ένα συνέδριο - θεσμός που φέτος κλείνει 25 χρόνια και υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και σημαντικούς φορείς, ιδιωτικούς και δημόσιους, εγχώριους και διεθνείς.

6.7 Η Ericsson παρουσιάζει το μέλλον του 5G

150 εκατομμύρια 5G συνδρομές κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2021 προβλέπει η εταιρεία.

Κυκλοφόρησε την Τετάρτη η τελευταία έκδοση του Mobility Report της Ericsson, η οποία παρέχει στοιχεία για το μέλλον των 5G δικτύων, συμπεριλαμβανομένης της πρόβλεψης των 150 εκατομμυρίων 5G συνδρομών κινητής τηλεφωνίας, μέχρι το 2021. Νότια Κορέα, Ιαπωνία, Κίνα και ΗΠΑ, προβλέπεται να ηγούνται των συνδρομών του πρώτου και πιο γρήγορου 5G δικτύου. Το 5G θα συνδέσει νέους τύπους συσκευών, επιτρέποντας νέες περιπτώσεις χρήσεως, που σχετίζονται με το Internet of Things (IoT), η μετάβαση θα συμβάλει στην ανάπτυξη νέων βιομηχανιών και κάθετων αγορών, προς τον ICT μετασχηματισμό.

Η έκθεση, μια ολοκληρωμένη ενημέρωση για τις τάσεις στην κινητή τηλεφωνία, αποκαλύπτει μια σημαντική αύξηση στην παρακολούθηση βίντεο από κινητές συσκευές, η οποία οδηγεί σε περίπου έξι φορές υψηλότερο όγκο μεταφοράς δεδομένων, ανά smartphone στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη (2015 έως 2021). Η κινητικότητα δεδομένων στη Βόρεια Αμερική ανά ενεργό smartphone θα αυξηθεί από 3,8 έως 22 GB το μήνα έως το 2021, ενώ στη Δυτική Ευρώπη η αύξηση αναμένεται από 2 έως 18 GB το μήνα.

Με 20 νέες συνδρομές κινητής τηλεφωνίας να ενεργοποιούνται κάθε δευτερόλεπτο, η παγκόσμια αύξηση των συνδρομών κινητής τηλεφωνίας αποτελεί ακόμα μία σαφής ένδειξη της αύξησης της μεταφοράς δεδομένων. Αυτήν τη στιγμή, ο αριθμός των συνδρομών κινητής τηλεφωνίας ισούται με

τον αριθμό ανθρώπων στον πλανήτη. Το 2016, θα φτάσουμε τις 4 δις συνδρομές, μόνο στα smartphone.

Άλλα σημαντικά σημεία από το τελευταίο Mobility Report της Ericsson περιλαμβάνουν:

Το βίντεο κυριαρχεί στην κυκλοφορία δεδομένων: Η παγκόσμια διακίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να αυξηθεί δέκα φορές έως το 2021 και το βίντεο αναμένεται να αντιπροσωπεύει το 70% του συνόλου της κινητής κινητικότητας δεδομένων στο ίδιο έτος. Σε πολλά κοινωνικά δίκτυα σήμερα, λογαριασμοί του YouTube αντιστοιχούν σε ποσοστό έως 70% του συνόλου της κίνησης/παρακολούθησης βίντεο, ενώ το μερίδιο της κυκλοφορίας βίντεο του Netflix μπορεί να φτάσει και το 20% σε αγορές στις οποίες είναι διαθέσιμο.

Η Κίνα θα ξεπεράσει τις ΗΠΑ ως η μεγαλύτερη αγορά LTE, παγκοσμίως: Μέχρι το τέλος του 2015, η Κίνα θα έχει 350 εκατομμύρια LTE συνδρομές-σχεδόν το 35% του συνόλου των LTE συνδρομών, παγκοσμίως. Η αγορά αναμένεται να έχει 1,2 δισεκατομμύρια LTE συνδρομές, μέχρι το 2021.

Η Αφρική γίνεται όλο και πιο συνδεδεμένη ήπειρος: Πριν από πέντε χρόνια (2010), υπήρχαν 500 εκατομμύρια συνδρομές κινητής τηλεφωνίας σε όλη την Αφρική, μέχρι το τέλος του 2015, ο αριθμός αυτός θα διπλασιαστεί σε 1 δισ.. Η αύξηση της συνδεσιμότητας βελτιώνει την προοπτική χρηματοπιστωτικής ένταξης των 70% των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, που δεν εξυπηρετούνται διατραπεζικά και πλέον αρχίζουν να παίρνουν μορφή, σε ολόκληρη την Αφρική.

Το ICT ενισχύει την οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα: Το ICT θα επιτρέψει την εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας και εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (GHG) σε όλους τους άλλους τομείς της βιομηχανίας. Η συνολική μείωση των εκπομπών θα μπορούσε να φτάσει έως και 10 γιγατόνους των εκπομπών CO₂e, που αντιπροσωπεύουν περίπου το 15% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μέχρι το 2030-περισσότερο από το τρέχον αποτύπωμα άνθρακα των ΗΠΑ και της ΕΕ, συνολικά.

Όπως αναφέρεται σε σχετική ανακοίνωση, νέο παράρτημα της έκθεσης αποτελούν τα Mobile Business Trends. Το παράρτημα περιγράφει οκτώ

τάσεις, που λεπτομερώς περιγράφουν πώς οι επιτυχημένοι πάροχοι κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούν διαφορετικούς τρόπους για τη δημιουργία εσόδων, από την έκρηξη που παρουσιάζεται στην κατανάλωση δεδομένων και στην αυξανόμενη ζήτηση για υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής αναλύσαμε τα χαρακτηριστικά, τις απαιτήσεις και τα ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη των cellular δικτύων 5ης 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 5ης 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.

Πραγματοποιήσαμε επίσης μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη και τις τεχνολογίες των δικτύων 3G-4G, ενώ τέλος κάναμε μια θεωρητική και πρακτική μοντελοποίηση για έναν θεωρητικό πάροχο. Αναλύσαμε μέσω διαγραμμάτων κάποια στοχαστικά μοντέλα ζήτησης βασισμένοι στα ποσοστά διείσδυσης του 5G για τη δεκαετία 2019-2020.

Ακόμη παρουσιάσαμε μια αξιολόγηση της επένδυσης και βρήκαμε την καθαρά παρούσα αξία για το θεωρητικό μας μοντέλο (εταιρεία). Κλείνοντας παραθέσαμε τα σημαντικότερα άρθρα που παρουσιάζουν τις τελευταίες εξελίξεις των δικτύων 5G.

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 5ης γενιάς.

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

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

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [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.
- 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.
- [3] Χρήστος Ι. Μπούρας, Πανεπιστημιακές σημειώσεις , μάθημα: Ευρυζωνικές Τεχνολογίες, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.
- [4] J. Hoadley, and P. Maveddat. Enabling Small Cell Deployment with HetNet. IEEE Wireless Communications (Volume:19, Issue:2), pages 4-5, April 2012.
- [5] 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>
- [6] H. Claussen, Alcatel-Lucent. Future Cellular Networks. April 2012 http://www.ictbefemto.eu/fileadmin/documents/publications/WCNC_2012_Workshop_Paris/Claussen_-_Future_Cellular_Networks_-_WCNC12_HetNet_Keynote.pdf
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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>
- [10] GSMA Intelligence. Understanding 5G: Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile, December 2014. <https://gsmaintelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download>
- [11] 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.
- [12] F. Boccardi, R. W. Heath Jr, A. Lozano, T. L. Marzetta, P. Popovski. Five Disruptive Technology Directions for 5G. IEEE Communications Magazine, February 2014.
- A. Azcorra, and U. Carlos. NetWorld 2020 ETP, Network and Service Virtualization White Paper, 2014.
- [13] D. Trossen, and D. Soldani. NetWorld 2020 ETP, What is 5G (Really) About? White Paper, 2014.
- [14] E. Calvanese Strinati. NetWorld 2020 ETP, Next Generation of Wireless Networks White Paper, 2014.
- 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.
- [15] 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
- [16] 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.
- 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.
- B. Weinhardt, A. Anandasivam, B. Blau, N. Borissov, T. Meinel, W. Michalk, J. Stößer. Cloud Computing – A Classification, Business Models, and Research Directions. Business & Information Systems Engineering 1(5): 391-399, 2009.
- [17] J. DiGiglio, D. Ricci. High Performance, Open Standard Virtualization with NFV and SDN. http://www.windriver.com/whitepapers/ovp/ovp_whitepaper.pdf
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Hata_model_for_urban_areas
- [22] Rui. L. Aguiar. NetWorld 2020 ETP, Mobility/Connectivity and Networking Layer White Paper, 2014
- [23] <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>
- [24] <http://www.fiercewireless.com/tech/special-reports/whats-so-great-about-lte-advanced-lots-actually>
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced
- [26] <http://gvpublication.com/news/08.02.11.spain.html>
- [27] <http://deltapartnersblog.com/archives/149>
- [28] «Μοντέλα διείσδυσης σε ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης», Διπλωματική Εργασία Μιχαήλ Δημητρίου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πολυτεχνικής Σχολής Πανεπιστημίου Πατρών
- [29] <http://www.bluewavemag.com>
- [30] Σημειώσεις για το μάθημα «Τεχνοοικονομική Ανάλυση Δικτύων», Βαρουτάς Δημήτριος-Κατσιάνης Δημήτριος-Δέδε Γεωργία-Μιχαλακέλης Χρήστος, Αθήνα, Ιανουάριος 2007
- [31] Διάλεξη «Varoutas_Demand_Lesson_2» του μαθήματος «Τεχνοοικονομική Ανάλυση Δικτύων», Βαρουτάς Δημήτριος
- [32] <http://www.sfnblog.com/2010/05/10/sfn-report-japan-leads-with-3g-penetration>
- [33] <http://www.dailywireless.org/2008/09/03/us-3g-penetration-bigger-than-europe/>
- [34] <http://digital-stats.blogspot.gr/2010/01/3g-penetration-rates-by-market-q2-2009.html>
- [35] <http://digital-stats.blogspot.gr/2011/02/3g-penetration-by-market-q3-2010.html>
- [36] <http://digital-stats.blogspot.gr/2012/05/3g-penetration-by-market-q4-2011.html>

- [37] Operators need to improve their content and application offerings to increase low 3G penetration in Western Europe, Yanli Suo-Saunders, March 2006
- [38] Dimensioning of LTE Network : Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface, Abdul Basit, Syed Espoo, February 2009
- [39] <http://www.movistar.es/particulares/oferta-combinada/fusion/>
- [40] <http://www.vodafone.es/particulares/es/descubre-vodafone/ahorra-con-vodafone/movil-contrato/>
- [41] http://movil.orange.es/tarifas/?pst=0&utm_source=orange&utm_medium=home&utm_term=cabecera+submenu+movil
- [42] <http://www.yoigo.com/tarifas/contrato/index.php>
- [43] Διάλεξη «Katsianis_Lesson6_OAM_Cost_Modelling and drivers» του μαθήματος «Τεχνοοικονομική Ανάλυση Δικτύων», Κατσιάνης Δημήτριος
- [44] Σημειώσεις για το μάθημα «Τεχνοοικονομική Ανάλυση Δικτύων» «Μεθοδολογίες για την Ανάπτυξη Τεχνικοοικονομικών Μοντέλων», Θωμάς Σφηκόπουλος, Δημήτρης Κατσιάνης, Δημήτρης Βαρουτάς, Αθήνα, Οκτώβριος 2006
- [45] <http://www.inflation.eu/inflation-rates/spain/historic-inflation/cpi-inflation-spain-2013.aspx>
- [46] http://www.indexmundi.com/spain/economy_profile.html
- [47] <http://www.strongabogados.com/corporate-taxes.php>
- [48] 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.
- [49] J. Hamilton. Cost of Power in Large-Scale Data Centers. <http://perspectives.mvdirona.com/2008/11/cost-of-power-in-large-scale-data-centers/>
- [50] Clark Chen, China Mobile Research Institute. C-RAN: The Road Towards Green Radio Access Network. August 2012.
- [51] Alcatel-Lucent Strategic White Paper. Why Service Providers Need An NFV Platform. https://networkbuilders.intel.com/docs/NP2013113597EN_NFV_Platform_StraWhitePaper.pdf

- [52] Intel, NEC. NEC Virtualized EPC Innovation Powered by Multi Core Intel Architecture Processors.
https://networkbuilders.intel.com/docs/communications_nec_virtualized_epc_paper.pdf
- [53] 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.
- [54] 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>
- [55] 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.
- [56] 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>
- [57] <http://www.orange.com/en/news/2015/mars/5G-towards-the-mobile-Internet-of-the-future>
- [58] 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
- [59] 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
- [60] 95. E. Hossain and M. Hasan. 5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine (Volume:18, Issue:3), June 2015.