

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



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

**Θέμα Διπλωματικής Εργασίας:**

**Τεχνο-οικονομική ανάλυση Network Function virtualization (NFV)  
τεχνικών σε κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς και εξής »**

**Φοιτήτρια: Σπανού Γ. Άννα Μαρία,**

**AM: 1041884**

**Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Ι. Μπούρας,**

**Πάτρα, Ιούλιος 2021**

## Ευχαριστίες

Αρχικά αισθάνομαι την ανάγκη να απευθύνω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών και υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, αξιότιμο κύριο Χρήστο Ι. Μπούρα, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα πλέον σύγχρονο θέμα, και για τις γνώσεις που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Διδάκτορα Αναστασία Α. Κόλλια που η διαρκής της παρουσία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας ήταν υπέρτατος αρωγός. Άξια αναφοράς θεωρώ πως είναι οι καθοριστικής σημασίας συμβουλές, η προθυμία και η άμεση ανταπόκριση της στις εκάστοτε απορίες μου.

Επιπλέον επιθυμώ να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου για τις γνώσεις που μου πρόσφεραν αλλά και για το ότι μέσα από τον τρόπο διδασκαλίας τους και την αγάπη τους για τον τομέα των υπολογιστών, έμαθα να δουλεύω και να προσπαθώ.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου για τη στήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και για την εμπιστοσύνη τους σε εμένα.

## Περίληψη

Τα τελευταία 10 χρόνια οι τεχνο-οικονομικές μελέτες έχουν αποκτήσει όλο και μεγαλύτερη σημασία στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η πρόβλεψη του κόστους και του πιθανού κέρδους κάθε επένδυσης στο χώρο καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική. Τα υπάρχοντα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους υλικού. Με την εισαγωγή κάθε νέας υπηρεσίας, είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί κατευθείαν νέος εξοπλισμός και να επαναδιαμορφωθεί το δίκτυο, γεγονός που αποτελεί μια χρονοβόρα και δαπανηρή διεργασία. Το Network Function Virtualization (NFV) εισήχθη ως τρόπος αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων. Οι συσκευές που γενικά χρησιμοποιούμε σε ένα δίκτυο ορίζονται και τελικά εφαρμόζονται με βάση την αρχιτεκτονική, με αποτέλεσμα το υλικό αλλά και το λογισμικό να πρέπει να ενσωματωθούν και να προσαρμοστούν σύμφωνα με τις ανάγκες σε μια σταθερή δομή. Σε αντίθεση το NFV παρέχει την δυνατότητα το απαραίτητο λογισμικό που χρειάζεται για την λειτουργία του δικτύου να εκτελείται σε κοινόχρηστο διακομιστή, δημιουργώντας μια ευκολία διαχείρισης.

Τα NFV δίνουν πλέον και μια δυνατότητα μείωσης του κόστους, αφού η εικονική υλοποίηση μειώνει την ανάγκη από διαφορετικούς πόρους και συστήματα μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος. Η χρήση του NFV επιφέρει καλύτερη απόδοση CAPEX και OPEX και το κόστος συντήρησης είναι οικονομικότερο. Στην περίπτωση μας εξετάστηκε το κόστος σεναρίων με παραδοσιακές και μη τεχνολογίες σε δίκτυα δίνοντας μια εικόνα στους οργανισμούς τηλεπικοινωνιών σε σχέση με την ανάπτυξη τους στην Ελλάδα εντάσσοντας και τεχνολογίες όπως τα NFV.

## **Executive Summary**

In the last 10 years, techno-economic studies have become increasingly important in the field of telecommunications. Predicting the cost and potential profit of any investment in the space is becoming increasingly important.

Existing telecommunications networks are made up of many different types of hardware. With the introduction of each new service, it is necessary to immediately install new equipment and redesign the network, which is a time consuming and costly process. Network Function Virtualization (NFV) was introduced as a way to address these issues. . The devices we generally use in a network are defined and ultimately implemented based on the architecture, with the result that both the hardware and the software have to be integrated and adapted to the needs in a stable structure.

NFVs use shared hardware in order to run any programs – software that are necessary for the network, making it easy to manage. NFVs now offer a cost-cutting capability as virtualization reduces the need for different resources and systems while reducing costs. Using NVF brings better CAPEX and OPEX performance and maintenance costs are cheaper. In our case, the cost of scenarios with traditional and non-technologies in 5G networks was examined, giving an idea to the telecommunication organizations in relation to their development in Greece, including technologies such as NFV

# Πίνακας περιεχομένων

Ε

Π

Υ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

Τ

Ε

Π

Κ

Α

	2
	2
2.4.1 Πρώτη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας.....	18
2.4.2 Δεύτερη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας .....	19
2.4.3 Τρίτη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας.....	20
2.4.4 Τέταρτη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας .....	21
3.3.1 Το Δίκτυο 5G στην Ελλάδα.....	32
3.4.1 Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα (Ultra-Dense Networks).....	33
3.4.2 Software Defined Networking (SDN) .....	33
3.4.3 Network Function Virtualization (NFV) .....	34
3.4.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO) .....	35
3.4.5 Device-to-Device (D2D).....	35
3.4.6 Cognitive Radio (CR) .....	36
3.4.7 Internet Of The Things (IoT) .....	36
3.4.8 Cloud computing.....	36
3.4.9 Milimeter Wave (MMWave) .....	37
4.1.1 Υποδομή NFV (NFV Infrastructure, NFVI).....	40



# Κατάλογος Σχημάτων

Ε

Θ

Κ

ά

ε

Ένα 4. Λειτουργίες δικτύου βασισμένες σε υλικό (αριστερά) και σε εικονικοποιημένες

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε

ε.....

ε

ε

ε

ε

ε

ε

## Λίστα Πινάκων

II

Ω

VI

VI

κ

κ

φ

φ

φ

φ

φ

Κ

Μ

Φ

Ξ

Θ

Τ

Χ

Ρ

Υ

Φ

Π.....

ά

α

α

α



## **Ακρωνύμια**

Πρώτη γενιά (First Generation) κινητής τηλεπικοινωνίας

Δεύτερη γενιά (Second Generation) κινητής τηλεπικοινωνίας

**D**

**G**

~~Τέταρτη γενιά (Fourth Generation) κινητής τηλεπικοινωνίας~~

Πέμπτη γενιά (Fifth Generation) κινητής τηλεπικοινωνίας

**API:** Application Programming Interface

**BT:** British Telecom

**CAPEX:** Capital Expenses

**CR:** Cognitive Radio

**D2D:** Device-to-Device

**ETSI:** European Telecommunications Standards Institute

**EETT:** Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων

**FDMA:** Frequency-division multiple access

**Gbps:** Gigabits per second

**GPS:** Global Positioning System

**GSM:** Groupe Special Mobile

**IETF:** Internet Engineering Task Force

**IoT:** Internet of Things

**IP:** Internet Protocol

**LTE:** Long Term Evolution

**M2Mi:** Machine-to-Machine Intelligence

**MABS:** Mobile Apps Build Service

**MANO:** Management and orchestration

**METIS:** Mobile and wireless communications Enablers for the Twentytwenty  
Information Society

**MIMO:** Multiple-Input and Multiple-Output

**MMS:** Multimedia Messaging Service

**NCP:** National Contact Points

**NFV:** Network Function Virtualization

**NFVI:** Network Functions Virtualization Infrastructure

**NMT:** Nordic Mobile Telephone

**NS:** Network Simulator

**NSA:** Non-Stand Alone

**NTT:** Nippon Telegraph and Telephone

**OPEX:** Operating Expenses

**OSS:** Operations Support System

**QoS:** Quality of Service

**PED:** Price Elasticity of Demand

**RAN:** Radio Access Network

**RAT:** Radio Access Technology

**PBS:** Public Broadcasting Service

**RFIC:** Radio Frequency Integrated Circuit

**ROI:** Return On Investment

**SA:** Stand Alone

**SDN:** Software Defined Networking

**SIM:** Subscriber Identity Module

**SMS:** Short Message Service

**UDN:** Ultra Dense Networks

**VM:** Virtual Machine

**VIM:** Virtualized Infrastructure Manager

**VNFs:** Virtual Network Functions

**VSR:** Virtualized Service Router

**WiFi:** Wireless Fidelity

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία 10 χρόνια οι οικονομοτεχνικές μελέτες έχουν αποκτήσει όλο και μεγαλύτερη σημασία στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η πρόβλεψη του κόστους και του πιθανού κέρδους κάθε επένδυσης στο χώρο καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική. Ο ανταγωνισμός και η μεγάλη κινητικότητα που επικρατεί στην αγορά των τηλεπικοινωνιών λόγω της ταχείας τεχνολογικής εξέλιξης, ακολουθείται και από την εκθετική ανάπτυξη των κινητών συσκευών που συνδέονται με το δίκτυο και το Internet

Σήμερα αρκετές μελέτες αναδεικνύουν στρατηγικές εξοικονόμησης κόστους με βάση την κοινή χρήση δικτύου, φάσματος, την περιαγωγή και την ανάπτυξη της τεχνολογίας femtocell, η οποία χρησιμοποιείται για την παροχή υψηλής ποιότητας κάλυψης δικτύου σε εσωτερικούς χώρους όπως το σπίτι ή το γραφείο. Διάφορες μελέτες περιπτώσεων έχουν βασιστεί σε ποικίλες στρατηγικές για να μπορέσουν να αναπτύξουν νέους τύπους υπηρεσιών και εσόδων.

Τα υπάρχοντα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους υλικού. Με την εισαγωγή κάθε νέας υπηρεσίας, είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί κατευθείαν νέος εξοπλισμός και να επαναδιαμορφωθεί το δίκτυο, γεγονός που αποτελεί μια χρονοβόρα και δαπανηρή διεργασία. Το Network Function Virtualization (NFV) εισήχθη ως τρόπος αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων. Οι συσκευές που γενικά χρησιμοποιούμε σε ένα δίκτυο ορίζονται και τελικά εφαρμόζονται με βάση την αρχιτεκτονική, με αποτέλεσμα το υλικό αλλά και το λογισμικό να πρέπει να ενσωματωθούν και να προσαρμοστούν με τις ανάγκες σε μια σταθερή δομή.

Σε αντίθεση το NFV παρέχει δυνατότητες στο λογισμικό που έχει υλοποιηθεί από διάφορους προμηθευτές να εκτελείται σε ένα κοινόχρηστο υλικό. Η διαδικασία αυτή δίνει μια τεράστια ευκολία διαχείρισης. Στο NFV, η υλοποίηση των λειτουργιών ενός δικτύου έχει να κάνει με τον τρόπο που τελικά θα εφαρμοστούν σε ένα εικονικοποιημένο δίκτυο (VNF). Το VNF στόχο έχει την εκτέλεση λειτουργιών

δικτύου όπως τη δρομολόγηση, το τείχος προστασίας, κ.α. Ένας συνδυασμός από VNF συνήθως απαιτείται για την υλοποίηση ενός πλήρως Virtual δικτύου. Τα NFV δίνουν πλέον και μια δυνατότητα μείωσης του κόστους αφού η εικονική υλοποίηση μειώνει την ανάγκη από διαφορετικούς πόρους και συστήματα μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος.

Οι πάροχοι υπηρεσιών δικτύου, απαιτείται να επενδύσουν λογισμικό και υλικό και μάλιστα συνεχόμενα στο χρόνο αφού προκύπτουν νέες αναβαθμίσεις και τεχνολογίες. Στις νέες αυτές εγκαταστάσεις λογισμικού περιλαμβάνονται πρωτόκολλα δρομολόγησης, τεχνολογίας τοίχους προστασίας και εξισορροπητές φορτίου που επιτρέπουν την παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών δικτύου. Παρ' όλα αυτά, το υλικό που χρειάζεται απαιτεί περισσότερο χώρο και τελικά ενέργεια και ισχύ ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά, με αποτέλεσμα την απαίτηση μεγαλύτερων κεφαλαίων επενδύσεις.

Το NFV, σε αντίθεση παρέχει την δυνατότητα οι υπηρεσίες δικτύου να εφαρμόζονται πλήρως μέσα από virtual λογική και την δυνατότητα cloud στο σύνολό της. Ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί εικονικές μηχανές και γίνεται φανερό, λοιπόν, πως υπάρχουν πάρα πολλοί λόγοι για τους οποίους οι οργανισμοί επιθυμούν να χρησιμοποιούν το NFV. Το NFV βοηθά στη μείωση των λειτουργικών εξόδων για υλικό και εξοπλισμό από τους οργανισμούς που το χρησιμοποιούν. Καθώς δεν απαιτείται επιπλέον αγορά κάποιας ειδικής συσκευής υλικού για την εκτέλεση της εργασίας ή των υπηρεσιών που επιθυμούν, μειώνεται το κόστος, αλλά και ο χώρος που θα χρειαζόταν για επιπλέον υποδομή. Επιπλέον η χρήση του επιφέρει καλύτερη απόδοση CAPEX και OPEX και το κόστος συντήρησης είναι οικονομικότερο.

Επίσης καθώς οι λειτουργίες εικονικού δικτύου τρέχουν σε εικονικές μηχανές, δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης πολλών λειτουργιών σε μία μόνο συσκευή, όπως η ενοποίηση διακομιστών με χρήση εικονικοποίησης διακομιστή. Πέρα από την εξοικονόμηση κόστους υλικού, χώρου και ισχύος, απλοποιείται επίσης η διαδικασία σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών λειτουργιών δικτύου, καθώς όλα γίνονται σχεδόν μέσα σε μία μόνο συσκευή.

Τελικά όταν προχωρήσουμε σε ένα Data Center ή σε μια αντίστοιχη υποδομή να την εικονικοποιήσουμε, μπορεί να έχει αποτέλεσμα να χρησιμοποιούμε λιγότερους

πόρους για την ίδια ποσότητα λειτουργιών, αφού ένας μεμονωμένος διακομιστής μπορεί να εκτελεί διαφορετικές λειτουργίες σε ένα εικονικό δικτύου ταυτόχρονα με στόχο τελικά να παράγει την ίδια ποσότητα δεδομένων ή διεργασιών και επιτρέπει αυξημένη χωρητικότητα φόρτου εργασίας.

# ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

## Γενική Εικόνα και Δομή Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Ως κινητό δίκτυο επικοινωνίας ορίζεται ένας τύπος τηλεπικοινωνιακών δικτύων, που αποτελούνται από ένα σύνολο τερματικών, οντοτήτων και κόμβων συνδεδεμένων μεταξύ τους μέσω συνδέσμων, που επιτρέπουν την τηλεπικοινωνία μεταξύ των χρηστών των τερματικών. Οι οντότητες αντιπροσωπεύουν ανθρώπους, που χρησιμοποιούν φορητές κινητές συσκευές και ταυτόχρονα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους με μηνύματα ή με σήματα φωνής. [1]

Η δομή ενός κινητού δικτύου επικοινωνίας είναι κυψελοειδής. Ένα κυψελοειδές δίκτυο κινητής επικοινωνίας, ορίζεται σαν ένα δίκτυο διαφορετικών συχνοτήτων, όπου κατανέμονται χωρικά και ορίζουν περιοχές οι οποίες ονομάζονται κελιά. Κάθε κελί εξυπηρετείται από τουλάχιστον δέκτη που βρίσκεται σε μια σταθερή θέση η οποία είναι η θέση μιας κυψέλης ή του λεγόμενου σταθμού βάσης.

Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, κάθε κελί χρησιμοποιεί συγκεκριμένες συχνότητες με στόχο ταυτόχρονα να αποφύγει πιθανές παρεμβολές μέσα σε ένα εγγυημένο εύρος ζώνης. Ταυτόχρονα όταν τα κελιά ενώνονται, παρέχουν ραδιοφωνική κάλυψη σε μια τελικά ευρύτερη γεωγραφική περιοχή. Τελικά έχουμε την δυνατότητα σε μεγάλο αριθμό φορητών πομποδεκτών (π.χ. κινητά τηλέφωνα) να επικοινωνούν μεταξύ τους, με σταθερούς πομποδέκτες και τηλέφωνα οπουδήποτε στο δίκτυο, μέσω των σταθμών βάσης [2], [3]

## Πλεονεκτήματα Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Σύμφωνα με έρευνες ο αριθμός των ανθρώπων που χρησιμοποιούν τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας αγγίζει το μισό του παγκόσμιου πληθυσμού και διαρκώς αυξάνεται, καθώς είναι πάρα πολλές οι συσκευές που τα υποστηρίζουν (π.χ. tablet, Εκτιμάται ότι μέχρι το 2025, οι χρήστες των κινητών δικτύων επικοινωνίας θα φτάσουν τους 6 δισεκατομμύρια. [4]

Ορισμένα πλεονεκτήματα των κινητών δικτύων είναι:

- Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου είναι δύσκολη ή αδύνατη η τοποθέτηση καλωδίων λόγω της ασύρματης φύσης τους.
- Δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να κινηθεί οπουδήποτε επιθυμεί και σε όποια απόσταση χωρίς την ανησυχία για την ύπαρξη καλωδίων.
- Παρέχεται φθηνότερη και λιγότερο χρονοβόρα εγκατάσταση.
- Μειώνονται τα καλώδια και ταυτόχρονα η δυσκολία στη ρύθμισή τους.
- Εξασφαλίζεται η ευκολότερη και οικονομικότερη συντήρηση και αναβάθμιση τους, καθώς δεν απαιτούνται καλώδια.
- Εξασφαλίζει επεκτασιμότητα, αφού μέσω αυτών μπορούν να διαμορφωθούν ειδικά ώστε να δώσουν λύσεις τις ανάγκες συγκεκριμένων εφαρμογών.
- Μεγάλη χωρητικότητα, που συνεπάγεται την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών.
- Προσφέρεται η δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε από τις κινητές συσκευές επιθυμεί, οποιαδήποτε στιγμή καθώς και τις παρεχόμενες υπηρεσίες τους. [5], [6]

## 2.3 Μειονεκτήματα Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Πέρα από τα πλεονεκτήματα τους, τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία είναι:

- Η ποιότητα επικοινωνίας μπορεί να επηρεάζεται από φυσικά εμπόδια, κλιματολογικές συνθήκες και παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές.



- Ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να είναι χαμηλός ή να μεταβάλλεται λόγω του αέρα που αποτελεί μη ασφαλές μέσο μετάδοσης.
- Η έλλειψη ασφάλειας λόγω του μέσου μετάδοσης. [7]

## 2.4 Ιστορική Εξέλιξη Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Η διαρκής τεχνολογική εξέλιξη της επικοινωνίας μέσω κινητών δικτύων, μας παρέχει ποικίλες πληροφορίες, ταχύτερο χρόνο ανταπόκρισης και συνεχώς αυξανόμενους τρόπους πρόσβασης σε νέες πληροφορίες, περισσότερες από ποτέ, στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών.

Το Δεκέμβριο του 2018, η Νότια Κορέα, έγινε η πρώτη χώρα που εδραίωσε τη χρήση του 5G, και πρέπει να αναφερθεί πως η βιομηχανία της κινητής τηλεπικοινωνίας έχει σημειώσει αναμφίβολη εξέλιξη από τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε η πρώτη κλήση μέσω κινητού το 1973. Οι κινητές συσκευές έχουν αλλάξει τον κόσμο μας με τέτοιο τρόπο που κανείς δεν θα φανταζόταν. Οι περισσότερες χώρες υιοθέτησαν το 5G μέσα στο 2020 και αυτό έχει συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση του IoT και των Big

Κάθε διαδοχική γενιά ασύρματων προτύπων, που χαρακτηρίζεται από τη συντομογραφία "G", εισαγάγει τεράστιες προόδους στη χωρητικότητα μεταφοράς δεδομένων και συμβάλει στη μείωση της καθυστέρησης, και το 5G δεν θα αποτελεί εξαίρεση. Αν και τα επίσημα πρότυπα του 5G δεν έχουν ακόμη καθοριστεί, αναμένεται να είναι τουλάχιστον τρεις φορές ταχύτερο από τα ισχύοντα πρότυπα του 4G.

Για να γίνει απόλυτα κατανοητή η μετάβαση στην πέμπτη γενιά, θα ήταν χρήσιμη μια ιστορική αναδρομή της ασταμάτητης ανόδου των ασύρματων προτύπων από την πρώτη γενιά και εξής. [2]

### 2.4.1 Πρώτη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας

Η εξέλιξη των δικτύων κινητής επικοινωνίας ξεκίνησε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 με τα δίκτυα πρώτης γενιάς, που είχαν πλήρως αυτόματες λειτουργίες για τη δημιουργία φωνητικών κλήσεων. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε για το πρώτο εμπορικό κινητό δίκτυο επικοινωνίας, το οποίο αναπτύχθηκε στο Τόκυο το 1979 από την Nippon Telegraph and Telephone (NTT) .

Τα επόμενα χρόνια και συγκεκριμένα το 1981, το Nordic Mobile Telephone εφαρμόστηκε στη Δανία, τη Φινλανδία, τη Νορβηγία και τη Σουηδία. Το νέο δίκτυο NMT ήταν το πρώτο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που έδωσε την δυνατότητα περιαγωγής μεταξύ διαφορετικών χωρών.

Οι ΗΠΑ το 1983, ενέκριναν και εφάρμοσαν για πρώτη φορά τις λειτουργίες του 1G καθώς και το πρωτόκολλο DynaTAC της Motorola έγινε ένα από τα πρώτα κινητά τηλέφωνα με ευρεία χρήση. Στην συνέχεια αρκετές χώρες μέσα στη δεκαετία του 1980 ακολούθησαν εφαρμόζοντας σειρά από τεχνολογίες μέχρι σήμερα. [8], [9],

Τα περισσότερα κινητά τηλέφωνα της εποχής ήταν ιδιαίτερα βαριά, με βάρος περίπου 3-4 κιλά και δεν προορίζονταν για ευρεία προσωπική χρήση, αλλά κυρίως για εταιρική. Επίσης ήταν αρκετά ακριβά και αποτελούσαν ταυτόχρονα σύμβολο ευημερίας και κοινωνικής κατάστασης. Κάποια επιπλέον μειονεκτήματα από τα οποία η τεχνολογία 1G υπέφερε ήταν:

- Η κάλυψη του δικτύου δεν ήταν πάντα ποιοτική με αποτέλεσμα πολλά προβλήματα στην ένταση και την ροή μετάδοσης του ήχου.
- Επειδή κάθε χώρα χρησιμοποιούσε διαφορετικά πρωτόκολλα και συστήματα υπήρχε πρόβλημα στο θέμα της περιαγωγής.
- Δεν υπήρχε δυνατότητα κρυπτογράφησης και έτσι εύκολα μπορούσε κάποιος να κάνει υποκλοπή.

- Αδυναμία χρήσης του φάσματος λόγω του πλήρους αναλογικού τρόπου επικοινωνίας.
- Υπήρχε χαμηλή χωρητικότητα λόγω της χρήσης FDMA [9], [10], [11]



Εικόνα 1. Το Εμπορικό Φορητό κινητότηλέφωνο της Motorola DynaTAC

## 2.4.2 Δεύτερη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας

Η

<sup>η</sup> γενιά κινητής τηλεφωνίας δημιουργήθηκε από την ανάγκη να καλυφθούν οι ελλείψεις και να λυθούν τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν από τη χρήση της πρώτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1991 στη Φιλανδία, με βάση το πρότυπο Global System of Mobile communications (GSM). Στο νέο αυτό πρότυπο υπήρχε η δυνατότητα κρυπτογράφησης και η ταχύτητα στις ψηφιακές φωνητικές κλήσεις έφταναν στα 64 kbps με αποτέλεσμα να είναι σαφώς πιο ποιοτικές. Τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας δεύτερης γενιάς ήταν κάτι πολύ περισσότερο από απλές τηλεπικοινωνίες καθώς έθεσαν τα θεμέλια για μια πολιτιστική επανάσταση. Οι χειριστές των κινητών τηλεφώνων είχαν την δυνατότητα αποστολής μικρών μηνυμάτων (SMS), καθώς και μηνυμάτων πολυμέσων (MMS). Το αναλογικό παρελθόν της πρώτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας 1G, έδωσε τη θέση του στο ψηφιακό μέλλον που παρουσίασε η δεύτερη γενιά 2G. Αυτό οδήγησε σε μαζική υιοθέτηση από καταναλωτές και επιχειρήσεις σε κλίμακα που μέχρι πρότινος δεν είχε υπάρξει. [2],

C

I

T Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς, αποδείχθηκαν χρήσιμα τόσο για τους χρήστες όσο και για τους χειριστές του δικτύου ταυτόχρονα. Τα βελτιωμένα και αποδοτικότερα ψηφιακά συστήματα αγκαλιάστηκαν από τους καταναλωτές για πολλούς λόγους:

I

O • Επέτρεπαν την ψηφιοποίηση και τη συμπίεση των φωνητικών σημάτων. Έτσι, N ήταν πιο αποτελεσματικά στο φάσμα συχνοτήτων απ' ότι τα προηγούμενα.

g

w • Εισήγαγαν υπηρεσίες δεδομένων για κινητά με τη μορφή μηνυμάτων κειμένου, i εικόνας και πολυμέσων.

k

i • Τα δεδομένα και τα φωνητικά σήματα κρυπτογραφούνταν ψηφιακά, έτσι, η l ασφάλεια κατά της υποκλοπής και της απάτης αυξήθηκε πολλαπλάσια.

- Τα ψηφιακά σήματα κατανάλωναν λιγότερη ισχύ μπαταρίας, με αποτέλεσμα τα κινητά σύνολα να ήταν πολύ πιο ενεργειακά αποδοτικά από τα αντίστοιχα 1G.

### 2.4.3 Τρίτη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας

Με την αύξηση της χρήσης κινητών τηλεφώνων με τεχνολογία 2G, προέκυψε μεγαλύτερη ζήτηση για περισσότερες υπηρεσίες δεδομένων. Το πρότυπο 2G ήταν ένα πολύ πετυχημένο πρότυπο αλλά υστερούσε στην δυνατότητα χρήσης του διαδικτύου. Έτσι η απαίτηση για μια νέα τεχνολογία με μεγαλύτερη απόδοση στις μεταφορές δεδομένων ήταν πλέον πραγματικότητα. Για το λόγο αυτό καθώς και για βελτιώσεις και στις αποδόσεις μεταφοράς ήχου προέκυψε και εφαρμόστηκε το δίκτυο 3G.

Η 3<sup>η</sup> γενιά κινητής τηλεφωνίας, για τη μετάδοση δεδομένων χρησιμοποίησε εναλλαγή πακέτων, επιτρέποντας έτσι φαινομενικά υψηλότερες ταχύτητες. Από τις πιο πολυσυζητημένες υπηρεσίες του, αποτέλεσαν αναμφίβολα, οι βιντεοκλήσεις, μέσω αυτών δίνεται η δυνατότητα συνομιλίας μέσω της κάμερας, εφόσον διαθέτουν οι συνομιλητές συμβατές συσκευές. Επιπλέον, οι χρήστες είχαν τη δυνατότητα

πρόσβασης σε μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, να στέλνουν εικόνες και βίντεο μέσω των κινητών τους συσκευών με ταχύτητες των 384kbps. Το αυξημένο εύρος ζώνης επέτρεψε τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο, κινούμενης εικόνας και ήχου υψηλής ανάλυσης, παρακολούθηση τηλεοπτικών προγραμμάτων, ζωντανά ή μαγνητοσκοπημένα, ανεξαρτήτως τόπου και χρόνου. Λόγω των νέων τεχνολογικών δυνατοτήτων των 3G δικτύων αναπτύχθηκαν Global Positioning Systems (GPS) αλλά και υψηλής ποιότητας παιχνίδια, τα οποία θα μπορούν να παίζονται online σε πραγματικό χρόνο και ταυτόχρονα με άλλους παίκτες.

Ένα κύριο μειονέκτημα της υπηρεσίας 3G αποτέλεσε το κόστος απόκτησης της. Η εγκατάσταση της κατάλληλης διαμόρφωσης σε κάθε σταθμό βάσης από τον πάροχο υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, σε συνδυασμό με το κόστος εγκατάστασης μπορεί να ήταν πολύ δαπανηρά. Επιπρόσθετα, ο καταναλωτής υποχρεούνταν να αγοράσει μια κινητή συσκευή με δυνατότητα 3G, η οποία αποτελούσε ένα επιπλέον κόστος.

Σαν συνολική εικόνα το 3G έχει πολύ περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με μειονεκτήματα. Ουσιαστικά παρέχεται σε εργαζόμενους ή σε ανθρώπους που το θέλουν για προσωπική χρήση, ένας ευκολότερος τρόπος σύνδεσης με τον υπόλοιπο κόσμο. Για αυτό το λόγο η προστιθέμενη δαπάνη θεωρήθηκε από τους περισσότερους καταναλωτές πως άξιζε για την άνεση που πρόσφερε. [9], [16], [17]

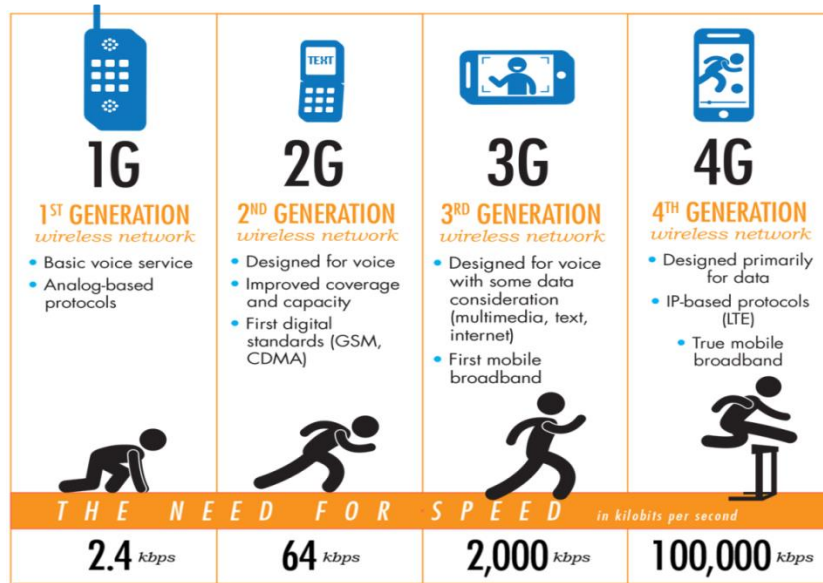
#### 2.4.4 Τέταρτη Γενιά Κινητής Τηλεφωνίας

Η 4<sup>η</sup> γενιά κυψελοειδών δικτύων, που διαδέχεται την 3<sup>η</sup>, προσδιορίζεται με τον όρο «4G». Είναι η γενιά ασύρματης τεχνολογίας, σχεδιασμένη να είναι συμβατή με φορητά πολυμέσα, με παγκόσμια υποστηριζόμενη και ολοκληρωμένη προσαρμοσμένη προσωπική υπηρεσία. Η 4G κινητή επικοινωνία λόγω της υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και της μεγαλύτερης χωρητικότητας φάσματος, κάνει δυνατή τη χρήση υπηρεσιών υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας. Οι πιθανές και τρέχουσες εφαρμογές περιλαμβάνουν τροποποιημένη πρόσβαση στον ιστό για κινητά, τηλεφωνία IP, υπηρεσίες τυχερών παιχνιδιών, αποστολή και λήψη μεγάλων αρχείων σε ελάχιστο χρόνο, τηλεδιασκέψεις και τηλεόραση 3D. Σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, σ' ένα σύστημα 4G, η επικοινωνία είναι βασισμένη στο πρωτόκολλο Internet Protocol

IP) και δεν υποστηρίζεται η μεταγωγή κυκλώματος. [18], [19]

Η 4<sup>η</sup> γενιά αποτελεί ουσιαστικά περισσότερο μια εξέλιξη, παρά μια επανάσταση όπως στην περίπτωση των προηγούμενων κυψελοειδών δικτύων. Το 4G πρακτικά είναι επέκταση του 3G, με βελτιώσεις κυρίως λόγω της εφαρμογής το πρωτοκόλλου Long Term Evolution ή LTE. Το LTE κυκλοφόρησε το 1998 στο Όσλο, τη Νορβηγία, τη Στοκχόλμη και τη Σουηδία. Στην συνέχεια αναπτύχθηκε παγκοσμίως. Οι τεχνολογίες 4G και LTE είναι παρόμοιες τεχνολογίες. Είναι ταχύτερες σε σύγκριση με την ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση έχοντας μικρές διαφορές μεταξύ τους. [18], [19], [20]

Η χρήση της 4<sup>ης</sup> γενιάς κινητής τηλεφωνίας προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η εκπληκτική ταχύτητα είναι ένα από αυτά, καθώς το δίκτυο 4G LTE είναι πολύ γρήγορο, έως και 10 φορές γρηγορότερο από το δίκτυο 3G με υψηλότερο εύρος ζώνης. Οι χειριστές κινητών συσκευών με 4G απολαμβάνουν ποιοτικότερη και πιο σταθερή συνδεσιμότητα, ενώ οι συσκευές παρέχουν δυνατότητες μετάδοσης ροής μουσικής, βίντεο κ.α. με πιο γρήγορο ρυθμό από ποτέ. Επίσης η χρήση του διαδικτύου γίνεται ευκολότερη και πιο σταθερή. Επιπλέον η συγκεκριμένη γενιά κινητής τηλεφωνίας παρουσιάζει μεγαλύτερη κάλυψη σε σχέση με άλλα συστήματα, όπως το wifi, καθώς προσφέρει κάλυψη 30 μιλίων και άνω. Τέλος είναι ιδιαίτερα προσιτή και παρέχει ευελιξία στους χρήστες. Τους δίνεται δηλαδή, από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, η δυνατότητα της επιλογής ανάμεσα σε προσφορές και υπηρεσίες που προσφέρουν ποικιλία ποιότητας και καλύτερης φασματικής απόδοσης. [18], [19], [20]



Εικόνα 2. Η εξέλιξη των τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας[21]

## **ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ 5G**

### **3.1 Εισαγωγή στα Δίκτυα Κινητής Επικοινωνίας 5<sup>ης</sup> Γενιάς**

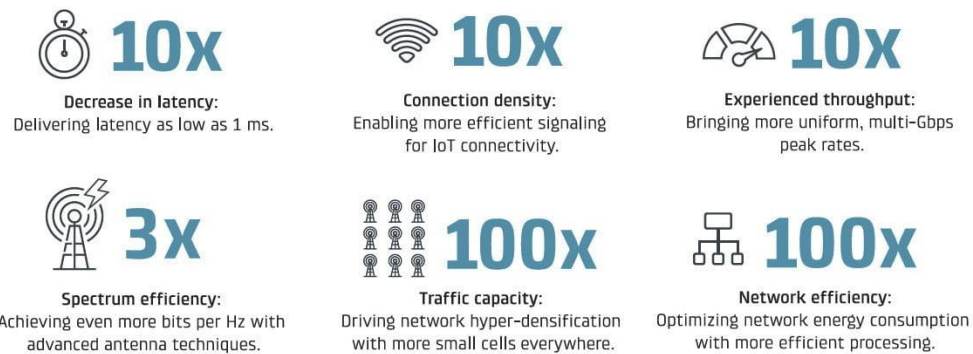
Τα δίκτυα 5G αποτελούν την επόμενη γενιά τεχνολογίας ασύρματου δικτύου που θα τροφοδοτήσει την καινοτομία και θα μεταμορφώσει την καθημερινότητα μας σε όλους τους τομείς της, διαμορφώνοντας τον τρόπο που ζούμε, εργαζόμαστε και παίζουμε. Τα 5G θα παίξουν σημαντικό ρόλο τόσο για την καθημερινή ζωή όσο και συνολικά στην εφαρμογή υπηρεσιών που σχετίζονται με την επιστήμη. Ο κυριότερος λόγος εφαρμογής και ανάπτυξης του 5G είναι η λύση στην απαίτηση του αυξανόμενου αριθμού κινητών συσκευών, στην χρήση του διαδικτύου που συνεχώς απαιτείται μεγάλου εύρους ζώνης, όπου η τεχνολογία 4G δεν ήταν ικανή να ανταποκριθεί. Με το 5G υπάρχει δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων σε όγκο πακέτων δεδομένων πολύ πιο αποτελεσματικά.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του 5G είναι ότι χρησιμοποιεί διαφορετικά είδη κεραιών, λειτουργεί σε διαφορετικές ζώνες ραδιοσυχνοτήτων, συνδέει πολλές άλλες συσκευές στο διαδίκτυο ( εξυπηρέτηση 100 δισεκατομμύρια συσκευών) , ελαχιστοποιεί τις καθυστερήσεις και παρέχει εξαιρετικά γρήγορες ταχύτητες της τάξης των 10 Gbps. [22], [23]



## The Landscape of 5G

5G will differentiate itself by delivering various improvements:



Εικόνα 3. Οι ποικίλες διαφοροποιήσεις του δικτύου 5G [24]

## Απαιτήσεις των 5G Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Λαμβάνοντας υπόψιν την πλειοψηφία των αναγκών στη σημερινή κοινωνία, γίνεται μία αναφορά στις κύριες απαιτήσεις της τεχνολογίας 5G.

- **Ταχύτητες της τάξεως των 10Gbps:** Οι προβλεπόμενες ταχύτητες έως και 10 Gbps αντιπροσωπεύουν έως και 100 φορές αύξηση σε σύγκριση με την 4G τεχνολογία. Στην πράξη, οι βελτιώσεις της ταχύτητας των 5G, έναντι του προκατόχου του, θα σημάνουν συναρπαστικές δυνατότητες για τους καταναλωτές.
- **Απειροελάχιστη καθυστέρηση:** Με τον όρο καθυστέρηση ορίζουμε το χρόνο που ένα σήμα χρειάζεται για να μεταφερθεί από την πηγή του στον δέκτη και στην συνέχεια να επιστραφεί. Ένας από τους κύριους στόχους κάθε ασύρματης γενιάς τηλεπικοινωνιών είναι η μείωση αυτής της καθυστέρησης και τα νέα δίκτυα 5G δεν θα μπορούσαν να αποκλίνουν από αυτόν.
- **Υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος:** Αυτή θεωρείται η σημαντικότερη και μεγαλύτερη πρόκληση για τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Οι ρυθμοί ανάπτυξης του

όγκου της κίνησης των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας διαρκώς αυξάνονται, και ως στόχος έχει τεθεί η επίτευξη χωρητικότητας, χίλιες φορές μεγαλύτερης, σε σχέση με το 4G LTE.

- **Αυξημένο εύρος ζώνης:** Απαιτείται 1000 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε κάθε περιοχή. Η δυνατότητα μεγαλύτερης ταχύτητας και χωρητικότητας στο 5G θα δώσει τη δυνατότητα μετάδοσης μεγαλύτερων ποσοτήτων δεδομένων από όλα τα πρωτόκολλα μέχρι σήμερα, αφού το 5G έχει πολύ διαφορετικό τρόπο διάρθρωσης βελτιστοποιώντας την κίνηση του δικτύου.
- **Μεγαλύτερος αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών:** Με χρήση του 5G θα έχουμε μέχρι και 1.000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό δίνει την δυνατότητα χιλιάδων συσκευών να έχουν καλύτερη επικοινωνία ακόμα και σε περιβάλλοντα μεγάλης συχνότητας όπως πόλεις, εργοστάσια, σχολεία, πανεπιστήμια κ.α..
- **Μειωμένο κόστος και υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα:** Το λειτουργικό αλλά και το κόστος κεφαλαίου πρέπει να είναι χαμηλό. Ακόμη, το δίκτυο πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικό και ανθεκτικό στις φυσικές καταστροφές. [25], [26]

## Ιστορική Πορεία και Εξέλιξη των 5G Δικτύων

- Συνεργασία της NASA με την Machine-to-Machine Intelligence (M2Mi) Corp, με σκοπό την ανάπτυξη μιας προσέγγισης της τεχνολογίας επικοινωνιών πέμπτης γενιάς. [27], [23]
- Η Νότια Κορέα αναπτύσσει πρόγραμμα που εξετάζει τα συστήματα κινητής επικοινωνίας 5G. [22]
- Το Πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης ιδρύει ένα πολυεπιστημονικό ακαδημαϊκό ερευνητικό κέντρο, το NYU Wireless, με στόχο τη δημιουργία πρωτοποριακού έργου στις ασύρματες επικοινωνίες 5G. [22]
- Το Ταμείο Επενδύσεων Ερευνητικής Συνεργασίας του Ηνωμένου Βασιλείου υποδομής, συμπεριλαμβανομένης της Huawei, Samsung, Telefonica Europe, χρηματοδοτούν ένα νέο ερευνητικό κέντρο 5G για το Πανεπιστήμιο του Surrey του Ηνωμένου Βασιλείου, με σκοπό να προσφέρει εγκαταστάσεις δοκιμών σε παρόχους κινητής τηλεφωνίας που επιθυμούν να αναπτύξουν ένα πρότυπο που χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια και λιγότερο ραδιοφάσμα, ενώ παρέχει ταχύτητες γρηγορότερες από τις τρέχουσες 4G. [22]
- Ξεκινά τη δραστηριότητά του το έργο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, "Mobile and

διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην οικοδόμηση συναίνεσης μεταξύ άλλων εξωτερικών σημαντικών φορέων πριν από τις δραστηριότητες παγκόσμιας τυποποίησης. [22]

### **2013:**

- Η Ομάδα Εργασίας ITU-R 5D (WP 5D) ξεκίνησε δύο επιστημονικές μελέτες που στόχευαν στην καλύτερη κατανόηση των μελλοντικών τεχνικών πτυχών των κινητών επικοινωνιών προς τον ορισμό του κινητού επόμενης γενιάς. [22]
- Η Samsung ανακοινώνει τη δημιουργία ενός δικτύου 5G με μέγιστη ταχύτητα δεκάδων Gbit/s (gigabits ανά δευτερόλεπτο). Κατά τη δοκιμή, οι ταχύτητες μεταφοράς για το δίκτυο "5G" έστειλαν δεδομένα στα 1,056 Gbit / s σε απόσταση έως 2 χιλιομέτρων με τη χρήση 8 \* 8 MIMO. [27]
- Ινδία και Ισραήλ συμφωνούν τη συνεργασία τους με στόχο την ανάπτυξη τεχνολογιών τηλεπικοινωνιών πέμπτης γενιάς. [27]
- Η NTT DOCOMO ανακοινώνει τα σχέδια της για τη δημιουργία δύο νέων επιχειρηματικών μονάδων, με σκοπό την ενίσχυση της καινοτομίας, της έρευνας και της ανάπτυξης σε κινητές τεχνολογίες επόμενης γενιάς. [28]
- Η Huawei αναφέρει τις πρώτες ημερομηνίες εισαγωγής καινοτομίας σε ένα μνημόνιο συμφωνίας συνεργασίας 5G με τη MegaFon στη Ρωσία. [29]
- Απονομή στη Huawei του τίτλου: «Μεγαλύτερη συνεισφορά στην ανάπτυξη στη 5G, ιδίως για τις νέες τεχνολογίες διεπαφής αέρα. [29]
- Η επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης μαζί με εταιρείες όπως η Alcatel-Lucent,

η Ericsson, η Nokia, η Orange, η Thales Alenia Space και άλλοι εταίροι στη σύμπραξη δημόσιου και ιδιωτικού τομέα 5G, παρουσιάζουν το όραμα της Ευρώπης για τις τεχνολογίες και τις υποδομές 5G. [30]

- Αποκαλύπτεται ότι η Google αναπτύσσει ένα δίκτυο 5G που ονομάζεται SkyBender. Πρόκειται για ένα δίκτυο που στοχεύει στην παροχή συνδέσεων θα μπορούσαν να δουν τεχνολογία κύματος χιλιοστών που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση gigabits δεδομένων κάθε δευτερόλεπτο σε ταχύτητες έως και 40 φορές ταχύτερες από το σύγχρονο 4G LTE. [27]
- Η Verizon ανακοινώνει την έναρξη των δοκιμών 5G σε πραγματικές καταστάσεις, σε συνεργασία με Ericsson, Intel, Nokia, Samsung και
- BT και η Nokia συνεργάζονται για τη δημιουργία «δοκιμών 5G Proof of Concept», την ανάπτυξη προτύπου 5G και πιθανών περιπτώσεων χρήσης για
- S  
K  
Telecom και Samsung ανακοινώνουν την επιτυχή ολοκλήρωση μιας δοκιμής
- Η ραδιοσυχνότητα 5G είναι 28 GHz [27] 5G: το  
έως 5Gbps, [27], [23]
- Η Huawei και η DOCOMO διεξάγουν την πρώτη παγκόσμια δοκιμή 5G μεγάλης κλίμακας στον κόσμο. Χρησιμοποιώντας τη ζώνη συχνοτήτων 4,5 GHz, και οι δύο εταιρείες κατέγραψαν ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 11,29 Gbps, που είναι περίπου 40 φορές ταχύτερες από το τρέχον πρότυπο 4G. [27]

- Η Ericsson παρουσιάζει την πρώτη πλατφόρμα 5G που προσφέρει υποστήριξη από άκρο σε άκρο για το ασύρματο δίκτυο πέμπτης γενιάς. [27]
- Η Samsung ανακοινώνει την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος 5G RF
- Η Nokia λανσάρει το "5G First" [27]
- Η Verizon, η Qualcomm και η Novatel Wireless ενώνουν τις δυνάμεις τους για την ανάπτυξη τεχνολογίας 5G New Radio (NR) χιλιοστομετρικών κυμάτων και για να επιταχύνουν την υιοθέτησή της και να υποστηρίξουν την ανάπτυξη ενός εμπορικού δικτύου πλήρους κλίμακας πριν από το τέλος της δεκαετίας. [27]
- Η Dialog Axiata με συνεργάτες την Ericsson και την Huawei στο Dialog Iconic στο Colombo, πραγματοποιεί πρωτοποριακή δοκιμή δυνατοτήτων τεχνολογίας
- Η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου ανακοινώνει ότι σκοπεύει να δημιουργήσει μια «πόλη 5G» σε μια δοκιμή πολλών εκατομμυρίων λιρών που θα ανοίξει το δρόμο για μια μελλοντική διάθεση 5G σε εθνικό επίπεδο. [27]
- Η Νότια Κορέα γίνεται η πρώτη χώρα υιοθέτησης 5G. Οι τρεις κύριες εταιρείες τηλεπικοινωνιών της Νότιας Κορέας (SK Telecom, KT και LG Uplus) πρόσθεσαν περισσότερους από 40.000 χρήστες στο δίκτυό τους 5G την ημέρα της κυκλοφορίας. [22]
- Η Verizon ξεκινάει τις υπηρεσίες 5G στις Ηνωμένες Πολιτείες [27]
- Οι Φιλιππίνες γίνονται η πρώτη χώρα στη Νοτιοανατολική Ασία που

παρουσιάζουν ένα δίκτυο 5G μέσω της Globe Telecom που παρουσίασε εμπορικά τα 5G δεδομένα της στους πελάτες [22]

- Η Vodafone γίνεται ο δεύτερος πάροχος του Ηνωμένου Βασιλείου που ενεργοποιείτο δίκτυό της 5G. Ξεκινώντας σε επτά πόλεις, ο πάροχος του δικτύου ξεκίνησε επίσης σε άλλες 12 πόλεις μέχρι το τέλος του 2019, συμπεριλαμβανομένων των Μπέρμιγχαμ, Μπρίστολ και Λονδίνου. [27]

#### **2020:**

- Η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου επιτρέπει τη χρήση εξοπλισμού Huawei σε δίκτυα 5G. Μετά από μια συνεχιζόμενη καθυστέρηση λόγω των αντιπαραθέσεων γύρω από την Huawei υπό την ηγεσία της αμερικανικής κυβέρνησης, η Βρετανία ανακοινώνει τελικά την απόφασή της να επιτρέψει τη χρήση εξοπλισμού Huawei στα δίκτυα 5G του Ηνωμένου Βασιλείου. [27]
- Η Samsung ανακοινώνει την κυκλοφορία του smartphone Samsung Galaxy S20, του πρώτου smartphone all-5G. [27]
- Οι θεωρητικοί συνωμοσίας σε όλο το Ηνωμένο Βασίλειο άρχισαν να βανδαλίζουν τους ιστούς δικτύου 5G, μετά από μήνες ισχυρισμών ότι ο COVID-19 προκλήθηκε από συχνότητες 5G και ότι σήματα από δίκτυα 5G διαταράσσουν το ανθρώπινο ανοσοποιητικό σύστημα με τους επιστήμονες να απαντούν ότι οποιαδήποτε ιδέα της σύνδεσης μεταξύ COVID-19 και 5G δεν είναι βάσιμη. [27]
- Στις 22 Μαΐου, η A1, σε συνεργασία με την ZTE, ξεκινάει το πρώτο δίκτυο 5G SA στη Λευκορωσία, σε δοκιμαστική λειτουργία, στο Μινσκ και στις 25 Μαΐου κάνει την πρώτη κλήση στην Κοινοπολιτεία Ανεξάρτητων Κρατών μέσω Voice Belarus ξεκινάει ένα δίκτυο 5G SA σε μια αθλητική αρένα στο Μινσκ. Στις 28 Μαΐου, ο διαχειριστής υποδομής της Λευκορωσίας beCloud ξεκινάει, σε λειτουργία δοκιμής, ένα δίκτυο 5G, με 20 σταθμούς βάσης. [22]

- Η ΒΤ συνάπτει συμφωνία με τη Nokia για αντικατάσταση του εξοπλισμού της Huawei για το 5G εκτός από τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς, γιατί απόφαση της βρετανικής κυβέρνησης τον Ιούλιο απαγορεύει στους φορείς εκμετάλλευσης να αγοράζουν εξοπλισμό Huawei μετά τις 31 Δεκεμβρίου 2020. [22]
- Οι ΗΠΑ, η Ινδία, η Ιαπωνία και η Αυστραλία διερευνούν την εξέλιξη μιας κοινής προσέγγισης για την τεχνολογία τηλεπικοινωνιών 5G. [31]

## Το Δίκτυο 5G στην Ελλάδα

Τον Δεκέμβριο του 2018, πραγματοποιήθηκε το πρώτο δοκιμαστικό δίκτυο 5G στην Ελλάδα που υλοποιήθηκε από τη COSMOTE, πετυχαίνοντας live ταχύτητες πάνω από 12Gbps, 60 φορές μεγαλύτερες από τις σημερινές ταχύτητες 4G. Η δοκιμή έγινε σε υπαίθριο χώρο του Δήμου Ζωγράφου, όπου η COSMOTE αναπτύσσει πιλοτικό δίκτυο 5G.

Η δημοπρασία για τη χορήγηση δικαιωμάτων χρήσης ραδιοσυχνοτήτων στις ζώνες 700 MHz, 2 GHz, 3400-3800 MHz και 26 GHz ξεκίνησε επίσημα μαζί με τη διαδικασία για την ανάπτυξη δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς (5G). Εφόσον πουληθούν όλες οι προς διάθεση φασματικές περιοχές, το συνολικό τίμημα που θα καταβάλουν οι τρεις πάροχοι Cosmote, Vodafone και Wind.

Τα δίκτυα 5G θα είναι εμπορικά διαθέσιμα σε ορισμένες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης τους πρώτους μήνες του 2021. Η Cosmote έχει επιλέξει για το δίκτυό της τεχνολογίες Ericsson και Nokia (για το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης - RAN την πρώτη και για το δίκτυο κορμού - Core και τις δύο). Η Vodafone έχει Huawei μόνο στο RAN, με τον όμιλο να προωθεί την ανάπτυξη ενός ανοικτού δικτύου ασύρματης πρόσβασης (Open RAN) και η Wind έχει επιλέξει Ericsson για το Core και Huawei για το RAN.

Αυτή τη στιγμή, στην Ελλάδα, το Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης συντονίζει τη διαδικασία της δημοπρασίας του φάσματος συχνοτήτων 5G. Η ανάπτυξη



των δικτύων 5G θα ξεκινήσει μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημοπράτησης του φάσματος, η οποία αναμένεται να ξεκινήσει το τελευταίο τρίμηνο του 2020. Από το 2020 και μετά το 5G θα είναι έτσι και αλλιώς εμπορικά διαθέσιμο παντού και από το 2025 θα κυριαρχεί. [32], [33]

## Τεχνολογίες 5G Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Οι πιο σημαντικές τεχνολογίες ενεργοποίησης 5G είναι οι ακόλουθες:

- C  
o  
g  
n  
i  
t(UDN)  
i  
v  
e

### Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα (Ultra-Dense Networks)

R

Τα ετερογενή πυκνά δίκτυα (UDN) είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την κάλυψη των απαιτήσεων της κινητής επικοινωνίας 5G. Απαιτήσεις, όπως: 50 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα, μέγιστα ποσοστά ροής δεδομένων που υπερβαίνουν τα πυκνά δίκτυα αποτελούνται από μικρά διαφορετικά κελιά (picocells, femtocells), τα οποία επαναχρησιμοποιούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης. [34]

S

o

f

t

w

a

r

e

D

e

f

i

Το Software Defined Networking (SDN) αποτελεί μια προσέγγιση αρχιτεκτονικής δικτύου που επιτρέπει στο δίκτυο να ελέγχεται έξυπνα και κεντρικά ή να προγραμματίζεται χρησιμοποιώντας εφαρμογές λογισμικού. Αυτό βοηθά τους

χειριστές να διαχειρίζονται ολόκληρο το δίκτυο με συνέπεια και ολιστικό τρόπο, ανεξάρτητα από την υποκείμενη τεχνολογία δικτύου.

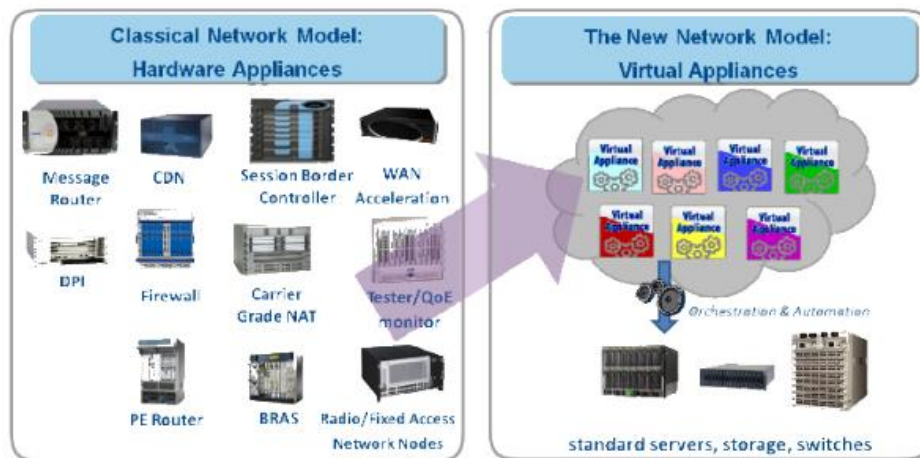
Στα υπάρχοντα δίκτυα που βασίζονται στις κλασικές αρχές, υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ των λειτουργιών τους σε τρεις βασικές κατηγορίες, το αναφέρεται στις υπηρεσίες που προσφέρουν διαχείριση και επίβλεψη στην λειτουργία του εξοπλισμού) , στο Data Plane (αναφέρεται στις διεπαφές ή τις πόρτες που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και λήψη πακέτων) και το Control Plane, όπου σε αυτό λαμβάνονται οι αποφάσεις για την επεξεργασία και βέλτιστη δρομολόγηση πακέτων.

Ωστόσο σε ένα SDN ο εξοπλισμός δεν χρειάζεται πια να λαμβάνει αποφάσεις πάρα να προωθεί τα πακέτα βασιζόμενος στις πληροφορίες και τους πίνακες που δημιουργεί και ενημερώνει ο controller. Έτσι ο διαχωρισμός του επιπέδου των δεδομένων από το επίπεδο ελέγχου αποτελεί την κύρια και βασική ιδέα της τεχνολογίας

Στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών η Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών τεχνολογίες εικονικοποίησης με σκοπό την δημιουργία μία πλήρως εικονικής υποδομής. Ουσιαστικά, για τη δημιουργία τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών το NFV επιτρέπει την αντικατάσταση υλικού με λογισμικό, εξομοιώνει λειτουργίες των κόμβων του δικτύου σε δομικά στοιχεία που δύναται να συνδεθούν μαζί. Μια εικονική λειτουργία δικτύου, μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες εικονικές μηχανές που τρέχουν διαφορετικό λογισμικό και διεργασίες, πάνω σε κοινούς εξυπηρετητές, μεταγωγείς και συσκευές αποθήκευσης, ή ακόμα και σε υπολογιστικά νέφη, χωρίς να χρειάζεται εξειδικευμένες συσκευές για κάθε λειτουργία του δικτύου. Τέλος, προσφέρεται η δυνατότητα διαχείρισης και ενορχήστρωσης της εικονικοποίησης πόρων για την παροχή λειτουργιών δικτύου και τη σύνθεσή τους σε υπηρεσίες δικτύου υψηλότερου επιπέδου. [36]

Περισσότερες λεπτομέρειες για την τεχνολογία NFV θα δούμε στο επόμενο

κεφάλαιο.



Εικόνα 4. Λειτουργίες δικτύου βασισμένες σε υλικό (αριστερά) και σε εικονικοποιημένες συσκευές (δεξιά) [37]

### 3.4.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Σε ένα σύστημα MIMO, τα ίδια δεδομένα μεταδίδονται μέσω πολλαπλών κεραιών, μέσω της ίδιας διαδρομής, στο ίδιο εύρος ζώνης. Εξαιτίας αυτού, κάθε σήμα φτάνει στην κεραία λήψης μέσω διαφορετικής διαδρομής, με αποτέλεσμα μεγαλύτερα ποσοστά δεδομένων και καλύτερη αποδοτικότητα φάσματος. Ο ρυθμός που αυξάνονται τα δεδομένα γίνεται κατά έναν παράγοντα που καθορίζεται από τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης και λήψης. Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί η καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) αλλά και η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από την πλευρά του αποστολέα (green technology). Ωστόσο κύρια μειονεκτήματα του αποτελούν το περισσότερο hardware και το σύνθετο λογισμικό. Ανάλογα με τον αριθμό των υπάρχουσών κεραιών, αυτή η τεχνολογία ονομάζεται MIMO ή Massive MIMO.

D  
e  
v  
i  
t  
o  
D  
e  
v

Η επικοινωνία Device-to-Device (D2D) αναφέρεται σε μια τεχνολογία ραδιοφώνου που επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ δύο χρηστών χωρίς την παρέμβαση του σταθμού βάσης ή του πυρήνα του δικτύου. Οι επικοινωνίες D2D σε

συγκεκριμένα σενάρια μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη φασματική απόδοση του δικτύου. Τα πιθανά σενάρια εφαρμογών περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, υπηρεσίες βάσει εγγύτητας όπου οι συσκευές εντοπίζουν την εγγύτητά τους και στη συνέχεια ενεργοποιούν διαφορετικές υπηρεσίες (όπως κοινωνικές εφαρμογές που ενεργοποιούνται από την εγγύτητα των χρηστών, διαφημίσεις, τοπική ανταλλαγή πληροφοριών, έξυπνη επικοινωνία μεταξύ οχημάτων κ.λπ.). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν υποστήριξη δημόσιας ασφάλειας, όπου οι συσκευές παρέχουν τουλάχιστον τοπική συνδεσιμότητα ακόμη και σε περίπτωση βλάβης της ραδιοφωνικής υποδομής. [34]

C

o

g

n

Είναι μια μορφή ασύρματης επικοινωνίας στην οποία ένας πομποδέκτης μπορεί να ανιχνεύσει έξυπνα ποια κανάλια επικοινωνίας χρησιμοποιούνται και ποια όχι. Σε αυτά τα δίκτυα, υπάρχουν χρήστες οι οποίοι έχουν προτεραιότητα και πρόσβαση στο συγκεκριμένο φάσμα. Υπάρχουν επίσης άλλοι χρήστες που πραγματοποιούν έλεγχο κατάστασης δικτύου σε πραγματικό χρόνο, εάν χρησιμοποιείται το φάσμα με άδεια χρήσης ή όχι. Χρησιμοποιούν το μη εξουσιοδοτημένο φάσμα ή το αδειοδοτημένο φάσμα εάν είναι δωρεάν, που μετακινείται αμέσως σε κενά κανάλια αποφεύγοντας ταυτόχρονα τα κατεχόμενα. Δεν προκαλεί παρεμβολές στον χρήστη με άδεια χρήσης.

d

o

### 3.4.7 Internet Of The Things (IoT)

Το IoT μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο δικτύου που αποτελείται από διάφορα συνδεδεμένα αντικείμενα πραγματικού κόσμου, που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων. Το IoT είναι μια τεχνολογία που προσφέρει πολλά βασικά οφέλη όσον αφορά τις έξυπνες πόλεις, την ηλεκτρονική υγεία, τα έξυπνα σπίτια κ.λπ. Η βασική διαφορά μεταξύ του IoT και του παραδοσιακού διαδικτύου είναι η απουσία του ανθρώπινου ρόλου. [39]

C

l

o

u

d

Το Mobile cloud computing χρησιμοποιεί cloud computing για την παράδοση εφαρμογών σε κινητές συσκευές. Αυτές οι εφαρμογές για κινητά μπορούν να αναπτυχθούν εξ αποστάσεως χρησιμοποιώντας εργαλεία ταχύτητας, ευελιξίας και ανάπτυξης. Οι εφαρμογές cloud για κινητά μπορούν να δημιουργηθούν ή να αναθεωρηθούν γρήγορα χρησιμοποιώντας υπηρεσίες cloud. Μπορούν να παραδοθούν σε πολλές διαφορετικές συσκευές με διαφορετικά λειτουργικά συστήματα, υπολογιστικές εργασίες και αποθήκευση δεδομένων. Έτσι, οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε εφαρμογές που διαφορετικά δεν θα μπορούσαν να υποστηριχθούν. [40]

Τα συστήματα επικοινωνίας των χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) έχουν προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον όσον αφορά την ικανοποίηση των απαιτήσεων χωρητικότητας του μελλοντικού δικτύου 5G. Τα συστήματα mmWave έχουν εύρη συχνοτήτων μεταξύ 30 και 300 GHz όπου διατίθενται συνολικά περίπου 250 GHz εύρος ζώνης. Ενσωματωμένο μεταξύ μικροκυμάτων και υπέρυθρων κυμάτων, αυτό το φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας, όπως φαίνεται με το τελευταίο πρότυπο Wi-Fi 802.11ad (λειτουργεί στα 60 GHz). Θεωρείται από τον οργανισμό τυποποίησης, την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών και τους ερευνητές ως ο τρόπος για να «φέρει» το 5G στο μέλλον, διαθέτοντας περισσότερο εύρος ζώνης για να παρέχει ταχύτερα, υψηλότερης ποιότητας περιεχόμενο και υπηρεσίες βίντεο και πολυμέσων. [34]

### 3.5 Ανοιχτά θέματα και Μελλοντικές Προκλήσεις των 5G Δικτύων

Το στοίχημα για την 5<sup>η</sup> γενιά κινητής τηλεφωνίας είναι η εκμηδένιση των περισσότερων από τα προβλήματα των προηγούμενων τεχνολογιών, με την επιστήμη να αναζητά διαρκώς λύσεις και για τα νέα θέματα που δημιουργούνται. Αυτό το στοίχημα αφορά, λοιπόν, τρόπους μείωσης της κατανάλωσης ρεύματος, τη χρήση πολύ χαμηλού κόστους εξαρτημάτων, τα οποία να συνεργάζονται αποτελεσματικά και,

γενικά, η ανεύρεση νέων τρόπων ανάπτυξης, αφού οι επιπλέον υπηρεσίες που προσφέρουν οι κεραίες, δίνουν σημαντικές δυνατότητες και νέες ευκαιρίες. Τα νέα τεχνολογικά ερωτήματα που εγείρονται είναι κρίσιμα και καθορίζουν τις προκλήσεις στο 5G. Ερωτήματα σχετικά με την αποτελεσματική ή μη υποστήριξη πολλών συσκευών από το διαδίκτυο, τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου πλήθους νέων εφαρμογών χωρίς να αλλάζει η ποιότητα τους και την αξιοπιστία των συστημάτων. Είδη προκλήσεων που καλούνται να αντιμετωπιστούν στα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα είναι η αξιόπιστη μετάδοση, το μειωμένο κόστος, η ασφάλεια, οι υπηρεσίες πολυεκπομπής, η υποστήριξη διαφορετικών συσκευών, πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών, η λειτουργία υπό υπερύψηλη πυκνότητα χρηστών, η δυνατότητα συνδεσιμότητας ετερογενών δικτύων, η υποστήριξη πολλαπλών μοντέλων κινητικότητας, κ.α.

## 4. NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION (NFV)

### 4.1 Δομή & Αρχιτεκτονική

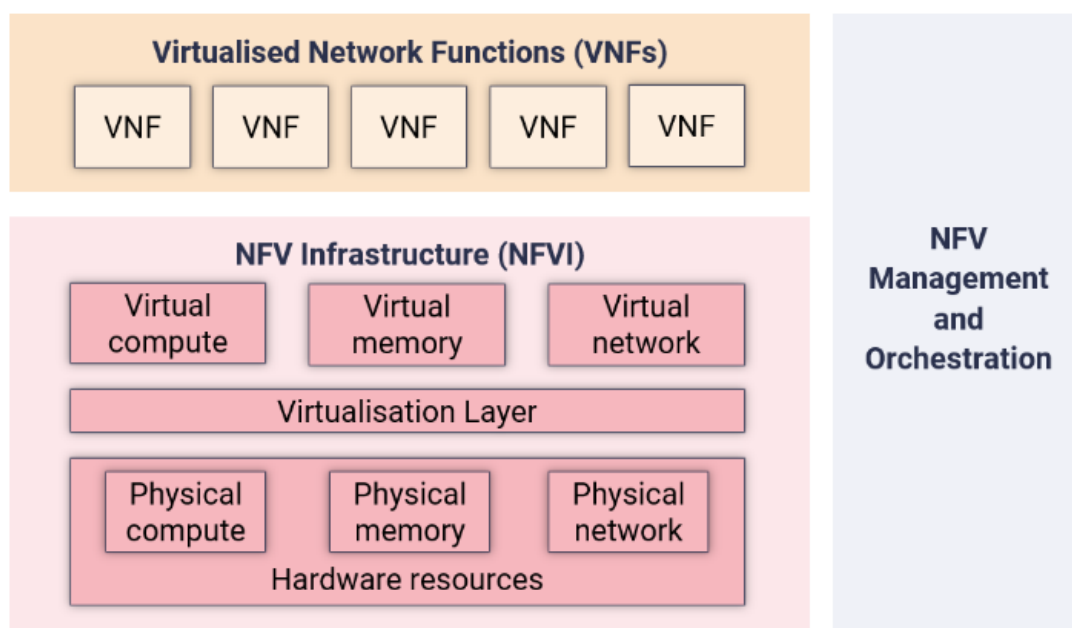
Τα υπάρχοντα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους υλικού. Με την εισαγωγή κάθε νέας υπηρεσίας, είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί κατευθείαν νέος εξοπλισμός και να επαναδιαμορφωθεί το δίκτυο, γεγονός που αποτελεί μια χρονοβόρα και δαπανηρή διεργασία. Το Network Function Virtualization (NFV) εισήχθη ως τρόπος αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων. Οι παραδοσιακές συσκευές του δικτύου καθορίζονται από μια στοιχειώδη αρχιτεκτονική, εξαιτίας αυτού, τόσο το υλικό όσο και το λογισμικό είναι προσαρμοσμένα και σταθερά ενσωματωμένα. Αντίθετα, το NFV δίνει τη δυνατότητα στο λογισμικό που αναπτύχθηκε από τους προμηθευτές να εκτελείται σε κοινόχρηστο υλικό, δημιουργώντας μια ευκολία διαχείρισης. Στην ορολογία NFV, η εικονική υλοποίηση των λειτουργιών δικτύου αναφέρεται ως λειτουργία εικονικοποιημένου δικτύου (VNF). Ένα VNF προορίζεται να εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία δικτύου π.χ. δρομολογητής, διακόπτης, τείχος προστασίας, αντισταθμιστής φορτίου κ.λπ. και ένας συνδυασμός αυτών των VNF ενδέχεται να απαιτηθεί για την υλοποίηση του πλήρους τμήματος δικτύου που εικονικοποιείται. [41], [42]

Για την επίτευξη αυτού του στόχου και τον καθορισμό ενός συνόλου προδιαγραφών που θα καθιστούσαν δυνατή τη μετάβαση από την παραδοσιακή προσέγγιση κεντρικού προμηθευτή και δικτύου σε ένα δίκτυο που βασίζεται σε NFV, επτά από αυτούς τους κορυφαίους παρόχους τηλεπικοινωνιών δημιούργησαν μια ομάδα προδιαγραφών Διαδικτύου (ISG), κάτω από ένα ανεξάρτητο οργανισμό τυποποίησης που ονομάζεται European Telecommunication Standards Institute (ETSI). Ο πλήρης διαχωρισμός υλικού και λογισμικού, η ευελιξία στην ανάπτυξη των λειτουργιών του δικτύου και ένταξη δυναμικών λειτουργιών, όπως έλεγχος και παρακολούθηση της κατάστασης του δικτύου, ήταν τρία σημαντικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό να τεθούν οι προτάσεις της ομάδας. Με βάση αυτά τα κριτήρια, δημιουργήθηκε ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο υψηλού επιπέδου, που αποτελεί

τη βάση της εργασίας τυποποίησης και ανάπτυξης και συνήθως αναφέρεται ως το πλαίσιο ETSI NFV. [41], [42]

Το πλαίσιο λειτουργίας του NFV σε υψηλό επίπεδο παρουσιάζεται στην εικόνα. Απεικονίζονται, ουσιαστικά τρία τμήματα ως τρία μπλοκ υψηλού επιπέδου, δηλαδή:

- Υποδομή NFV (NFV Infrastructure, NFVI)
- Εικονικοποιημένες Δικτυακές Λειτουργίες (Virtualised Network Functions, VNFs)
- Ενορχήστρωση και Διαχείριση του NFV (NFV Management and Orchestration, NFV-MANO)



Εικόνα 5. Πλαίσιο αρχιτεκτονικής NFV σύμφωνα με το ETSI[43]

#### 4.1.1 Υποδομή NFV (NFV Infrastructure, NFVI)

Το συγκεκριμένο μπλοκ, αποτελεί το θεμελιώδες και πιο σημαντικό μέρος της



συνολικής αρχιτεκτονικής. Ουσιαστικά σ' αυτό το μπλοκ ομαδοποιούνται το υλικό που φιλοξενεί τις εικονικές μηχανές, το λογισμικό που καθιστά δυνατή την εικονικοποίηση και οι εικονικοποιημένοι πόροι.

Το NFVI βασίζεται σε ευρέως διαθέσιμα και χαμηλού κόστους, τυποποιημένα υπολογιστικά στοιχεία. Στο κατώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής NFVI παρατηρούνται οι φυσικοί ή πόροι υλικού, που αποτελούνται από υπολογιστικές, αποθηκευτικές και δικτυακές μονάδες (Compute, Storage, Network). Αυτοί οι πόροι κοινοποιούνται και χρησιμοποιούνται από τις Virtual Network Functions (VNF's) . Οι υπολογιστικοί και οι πόροι αποθήκευσης χρησιμοποιούνται συνήθως σε μια ομάδα που περιλαμβάνει τη μνήμη και την CPU. Οι δικτυακοί πόροι αποτελούνται από κάρτες διασύνδεσης δικτύου και θύρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα VNF, π.χ. δρομολογητής, ενσύρματο ή ασύρματο δίκτυο. Ακολουθεί το επίπεδο εικονικοποίησης (Layer). Ουσιαστικά είναι το μέρος στο οποίο γίνεται η εικονικοποίηση, δηλαδή το επίπεδο του hypervisor. Τέλος στο ανώτερο επίπεδο τοποθετούνται οι εικονικοί πόροι όπως το εικονικό δίκτυο, οι εικονικές αποθήκες και οι εικονικοί διακομιστές που δημιουργούνται με τη βοήθεια κάποιου υπερ- ελεγκτή. Αυτό που ξεχωρίζει το NFV είναι ότι κανένα υλικό δεν έχει σχεδιαστεί σκόπιμα για κάποια συγκεκριμένη λειτουργία δικτύου ή κανένα από αυτά δεν είναι κλειδωμένο από τον προμηθευτή, αλλά είναι μια γενική συσκευή υλικού γνωστή και ως COTS.

Επιπλέον παρέχει τους πραγματικούς φυσικούς πόρους και το αντίστοιχο λογισμικό στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν οι εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες. Το Virtualization Layer αποσυνδέει τους πόρους υλικού του NFVI. Υπολογίζει και εξοικονομεί πόρους αποθήκευσης και δικτύου. Κύρια ευθύνη του αποτελεί η αφαίρεση των φυσικών πόρων με αποτέλεσμα το VNF να τους χρησιμοποιεί ως ανεξάρτητους για την εκτέλεση των λειτουργιών τους. Το NFVI είναι επίσης κρίσιμο για τη δημιουργία πιο σύνθετων δικτύων χωρίς γεωγραφικούς περιορισμούς των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών δικτύων. [41], [44], [45]

Ε  
ι  
κ  
ο  
ν  
ι  
κ  
ο  
π

Το μπλοκ λειτουργίας εικονικοποιημένου δικτύου VNF, χρησιμοποιεί τις

εικονικές μηχανές που προσφέρονται από το NFVI και βασίζεται πάνω τους προσθέτοντας το λογισμικό που υλοποιεί τις λειτουργίες του εικονικοποιημένου δικτύου. Δηλαδή οι σύγχρονες λειτουργίες του δικτύου, όπως της δρομολόγησης, της μεταγωγής, της εγκαθίδρυσης μιας σύνδεσης κ.ά. δεν υλοποιούνται πλέον από φυσικές συσκευές αλλά από εικονικές μηχανές που παρέχουν ακριβώς την ίδια λειτουργικότητα με τις προηγούμενες συμβατικές, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα των σημερινών δικτύων.

Αποτελείται από δύο υποενότητες τις Virtual Network Function (VNF) και Element Management System (EMS). Μια λειτουργία εικονικού δικτύου (VNF) είναι το βασικό μπλοκ στην αρχιτεκτονική NFV και ουσιαστικά λειτουργεί όπως αναφέρει και το ονομά του αυτό το επίπεδο, δηλαδή εικονικοποιεί τις λειτουργίες του δικτύου. Το ακρωνύμιο VNF χαρακτηρίζει οποιοδήποτε μέρος του δικτύου είναι εικονικοποιημένο, όπως π.χ. όταν ένας δρομολογητής είναι εικονικοποιημένος, τον αποκαλούμε Router VNF και όταν ένας σταθμός βάσης είναι εικονικός, τον αποκαλούμε ως σταθμό βάσης VNF, ομοίως, μπορεί και ένας διακομιστής DHCP VNF και ένα Firewall VNF αντίστοιχα. Επιπρόσθετα όταν μια υπο-λειτουργία ενός στοιχείου του δικτύου εικονικοποιείται, ονομάζεται VNF.

Τα VNF αναπτύσσονται σε εικονικές μηχανές (VM). Ένα VNF μπορεί να αναπτυχθεί σε πολλές εικονικές μηχανές όμως κάθε εικονική μηχανή φιλοξενεί μία μόνο λειτουργία του VNF. Ωστόσο, ολόκληρο το VNF μπορεί επίσης να αναπτυχθεί και σε μία μόνο εικονική μηχανή.

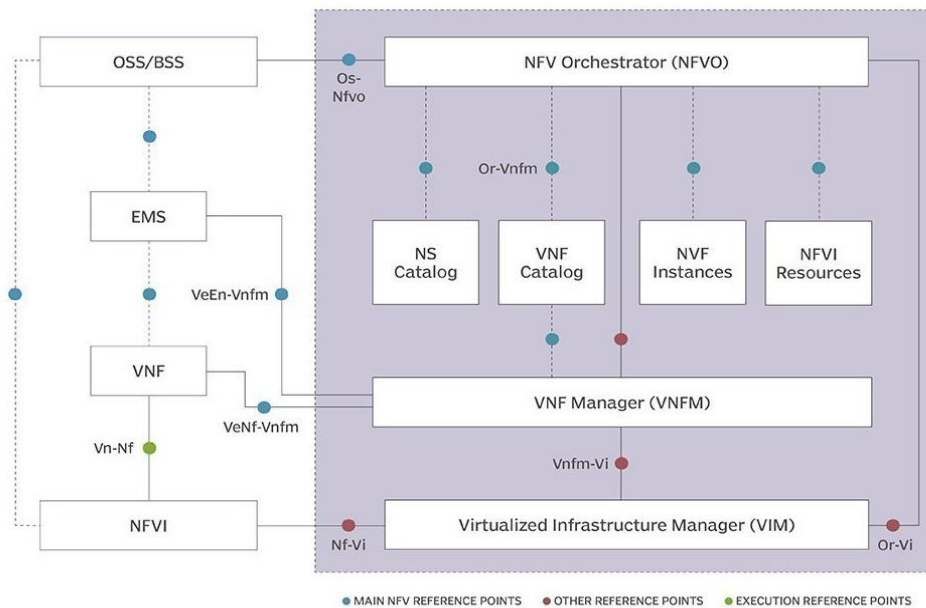
Το Element Management System (EMS) είναι υπεύθυνο για τη λειτουργική διαχείριση του VNF. Οι λειτουργίες χαρακτηρίζονται από παραμέτρους διαχείρισης σφαλμάτων, διαμόρφωσης, απόδοσης και ασφάλειας. Ένα EMS μπορεί να διαχειριστεί τα VNF μέσω ιδιόκτητων διεπαφών. Μπορεί να υπάρχει ένα EMS ανά VNF ή ένα EMS που μπορεί να διαχειριστεί πολλαπλά VNF. Η υπηρεσία που εικονικοποιείται μπορεί να απαιτεί διάφορους συνδυασμούς VNFs ή μπορεί να εκτελεστεί σε ένα μόνο VNF. Όταν μια ομάδα λειτουργιών εικονικοποιημένου δικτύου υλοποιείται και δεν έχει καμία αλληλεξάρτηση, είναι γνωστή ως σύνολο VNF. Ωστόσο, εάν η υπηρεσία δικτύου χρειάζεται να εφαρμοστεί εκεί όπου η ροή δεδομένων πρέπει να ταξιδέψει μέσω μιας συγκεκριμένης ακολουθίας, τότε καθορίζεται η συνδεσιμότητα μεταξύ των VNFs και

αναφέρεται ως αλυσίδα υπηρεσίας ή γράφημα προώθησης VNF. [44] , [46]

#### 4.1.3 Ενορχήστρωση και Διαχείριση του NFV (NFV Management and Orchestration, NFV-MANO)

Αποτελεί το πλαίσιο που καθορίζεται από το ETSI με σκοπό τη διαχείριση και την ενορχήστρωση όλων των πόρων σε ένα εικονικοποιημένο κέντρο δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων υπολογιστικών πόρων, δικτύωσης, αποθήκευσης και εικονικής μηχανής. Ουσιαστικά αναφέρεται σε όλες τις λειτουργίες οι οποίες σχετίζονται με τη διαχείριση των διαδικασιών εικονικοποίησης και αλληλεπιδρά και με τα μπλοκ NFVI και VNF, δημιουργώντας ή και διαγράφοντας πόρους και διαχειρίζοντας την κατανομή των VNFs. Για να είναι αποτελεσματικό το NFV MANO, πρέπει να ενσωματωθεί σε Interfaces (API) σε υπάρχοντα συστήματα, προκειμένου να συνεργαστεί με τεχνολογίες πολλαπλών προμηθευτών σε πολλούς τομείς δικτύου. Οι λειτουργίες παρόχων τηλεπικοινωνιών και τα συστήματα χρέωσης (OSS / BSS) πρέπει να αλληλεπιδρούν με το συγκεκριμένο επίπεδο.

# NFV MANO architecture



Εικόνα 6. Αρχιτεκτονικό Πλαίσιο NFV MANO[47]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6, το NFV MANO χωρίζεται σε τρία λειτουργικά μπλοκ:

- **N**  
**F**  
**V**
- **O**  
**N**  
**F**  
**M**  
**a**  
**n**
- **N**  
**g**  
**a**  
**t**

Είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του κύκλου ζωής του VNF που περιλαμβάνει εγκατάσταση, ενημερώσεις, ερωτήματα, κλιμάκωση / μείωση και τερματισμό.

Είναι διαυφίση για VNF αποθήκη σφραματκωθη διακάθηση VNF ρένωσφομαξικός διαχειριστής VNF Κομπραμάτο πονέσσησφίσας δικτύσφυτηρέτηση πολλαπλών

εικονικοποίησης χρησιμοποιεί το υλικό. Μέσω του πλαισίου ETSI επιτρέπεται σε ένα ενιαίο VIM να ελέγχει πολλαπλά λειτουργικά μπλοκ NFVI και πολλαπλά VIMS για τον έλεγχο διαφορετικών πόρων υλικού. [48], [49], [50]

#### 4.1.4 Σημεία Αναφοράς στο Πλαίσιο Αρχιτεκτονικής ETSI

Επιπλέον, στο πλαίσιο αρχιτεκτονικής του ETSI ορίζονται και μερικά σημεία αναφοράς, τα οποία είναι απαραίτητα για την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κύριων μονάδων που το αποτελούν. Τα σημεία αναφοράς που ορίζονται στο πλαίσιο ενός δικτύου NFV είναι τα εξής:

- **O**

**s**

**M**

Καθορίζει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του VIM και των λειτουργικών μονάδων στο NFVI. Κατανέμει, διαχειρίζεται και ελέγχει τους πόρους που διατίθενται στο NFVI.

**v**

Χρησιμοποιείται από το VNFM για τη διαχείριση του κύκλου ζωής VNF και για την ανταλλαγή ρυθμίσεων και πληροφοριών κατάστασης με το VNF.

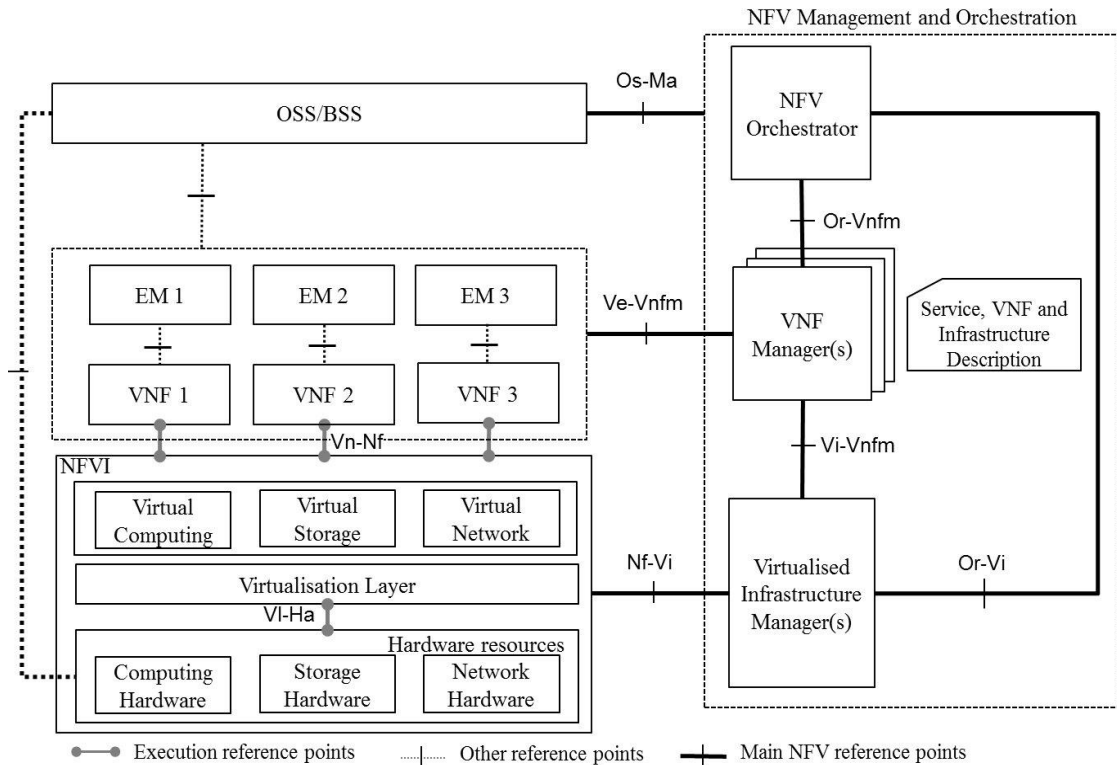
Καθορίζει την επικοινωνία μεταξύ των OSS/ BSS και NFVO. Χρησιμοποιείται για τον πλήρη προσδιορισμό των παρεχόμενων υπηρεσιών. Πραγματοποιείται μεταξύ του VNFM και των μονάδων EM, με κύριο σκοπό τη διαχείριση των FCAPS.

Ορίζει την επικοινωνία μεταξύ NFVO και VNFM που σχετίζεται με την εγκατάσταση των VNF και τη ροή πληροφοριών που αφορά τον κύκλο ζωής τους.

Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ NFVO και VIM ώστε να επέλθει διαχείριση των πόρων της υποδομής, όπως η δέσμευση πόρων για την προσθήκη VM ή VNF.

Συμβάλει στον καθορισμό των προτύπων ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ VIM και VNFM.

κύρια χρήση του αποτελεί η γνωστοποίηση των αναγκών επίδοσης και φορητότητας του VNF στο μονάδα υποδομής NFV.



Εικόνα 7. Τα σημεία αναφοράς στο πλαίσιο αρχιτεκτονικής ETSI

## 4.2 Απαιτήσεις Network Function Virtualization (NFV)

Καθώς οι πάροχοι υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας μεταβαίνουν σε 5G, το NFV παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στην ενοποίηση λειτουργιών δικτύου και τη δυνατότητα ανάπτυξης εικονικών υποδομών που είναι πιο ευέλικτες και επεκτάσιμες με χαμηλότερο TCO. Οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να κλιμακώσουν τις υπηρεσίες προς τα πάνω ή προς τα κάτω ή να μετακινήσουν τις λειτουργίες του δικτύου από τοποθεσία σε τοποθεσία για να ανταποκριθούν στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Είναι σαφές ότι η άφιξη των δικτύων 5G θα οδηγήσει σε μια ολόκληρη σειρά νέων υπηρεσιών για τους πελάτες, και η εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών ως υπηρεσία τους, απαιτείται να παρέχει τα ακόλουθα: [51]

- Υψηλή απόδοση έως 100Gbps και πάνω

- Υψηλή αξιοπιστία, ώστε τα εικονικά τερματικά να είναι εξίσου αξιόπιστα με τα αντίστοιχα συμβατικά.
- Εύκολη ανάπτυξη.
- Επεκτασιμότητα σε εκατομμύρια χρήστες.
- Παράδοση εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο σε χαμηλό χρονικό διάστημα.
- Δυνατότητα ενοποίησης με παλαιότερες αρχιτεκτονικές δικτύου και σύνδεση με υπάρχοντα λειτουργικά συστήματα και συστήματα χρέωσης. [52] [53]

## Ιστορική Ανασκόπηση

Η τεχνολογία NFV δημιουργήθηκε από την ανάγκη των παρόχων τηλεπικοινωνιών να εξαλειφθεί η καθυστέρηση στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών δικτύου και να ευθυγραμμιστούν τα δίκτυα με τους στόχους ανάπτυξης και εσόδων τους. Καθώς, λοιπόν, οι τυπικές λύσεις με βάση το υλικό δεν ήταν επαρκείς, έθεσαν προκλήσεις, οδηγώντας έτσι στη βελτίωση των δικτύων τους μέσω της εφαρμογής τυπικών τεχνικών εικονικοποίησης. Σε μια προσπάθεια να επιταχυνθεί η λύση και να επιτευχθεί ένας κοινός στόχος, το European Telecommunication Standards Institute ιδρύθηκε από ορισμένους παρόχους και ανέλαβε επομένως την ανάπτυξη αρχιτεκτονικής και απαιτήσεων για εικονικοποίηση των διαφόρων λειτουργιών ενός δικτύου.

Τον Οκτώβριο του 2012, στο OpenFlow World Congress τα μέλη του ETSI, μια κοινοπραξία παρόχων υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων των AT&T, China Mobile, ιδέα ενός προτύπου εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου. Συγκεκριμένα, πρότειναν την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) ως τρόπο απλοποίησης και βελτίωσης της διαχείρισης του δικτύου, μετατρέποντας την υποκείμενη αρχιτεκτονική. Ως

πρωτοπόροι, δημιούργησαν την ομάδα προδιαγραφών Βιομηχανίας (ISG) για να παρέχουν ένα φόρουμ στον κλάδο με σκοπό τη συνεργασία για τον καθορισμό των απαιτούμενων προτύπων και την υποστήριξη της εφαρμογής εικονικοποίησης δικτύου.

Στα δύο πρώτα χρόνια του, το ISG NFV είχε ως κύριο στόχο να βοηθήσει τη βιομηχανία να δημιουργήσει μια κουλτούρα σχετικά με την εικονικοποίηση του δικτύου και να συμβάλει στην κατανόσή της. Τον Οκτώβριο του 2013 τέθηκε το πρώτο σημαντικό ορόσημο, η δημοσίευση των πέντε πρώτων εγγράφων ETSI Group Specifications (GSs). Τα τέσσερα από αυτά είχαν ως στόχο την κατανόηση του NFV σε ολόκληρο τον κλάδο. Συγκεκριμένα, κάλυπταν περιπτώσεις χρήσης NFV, αρχιτεκτονικό πλαίσιο, ορολογία και απαιτήσεις εικονικοποίησης. Το πέμπτο καθόρισε ένα πλαίσιο για το συντονισμό και την προώθηση των δημόσιων επιδείξεων των πλατφορμών Proof of Concept (PoC) που απεικόνιζε βασικές πτυχές του NFV. Το 2014, δημοσιεύτηκαν 11 ακόμη έγγραφα που εστίαζαν σε διαφορετικούς τεχνικούς τομείς, όπως η υποδομή NFV, η διαχείριση NFV και ενορχήστρωση, η αρχιτεκτονική του VNF και συναφείς λειτουργικές και μη περιοχές ασφάλειας, αξιοπιστίας και απόδοσης.

Το 2015, προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας προδιαγραφών για να επιτρέπεται η διεργασία μεταξύ συσκευών και υπηρεσιών από άκρο σε άκρο. Έτσι, αποφασίστηκε η ομαδοποίηση του μεγαλύτερου μέρους του κανονιστικού έργου του NFV στο "NFV Release 2", μέσω νέων αναφορών. Η έκδοση 2 εστίασε στην κάλυψη των προδιαγραφών μοντέλων και διεπαφών σχετικά με διαφορετικές δυνατότητες για τη διαλειτουργικότητα στα λειτουργικά μπλοκ NFV-MANO (VIM, VNFM και NFVO) και προς εξωτερικά συστήματα, σύμφωνα με τα καθορισμένα σημεία αναφοράς.

Τη χρονιά 2017- 2018 εκδόθηκε το NFV Release 3, το οποίο επικεντρώθηκε στον εμπλουτισμό του Αρχιτεκτονικού Πλαισίου NFV μέσω 22 νέων λειτουργιών. Μέχρι το καλοκαίρι του 2019, 10 λειτουργίες είχαν ολοκληρωθεί και 2 λειτουργίες είχαν ολοκληρωθεί εν μέρει στο επίπεδο καθορισμού αρχιτεκτονικής, διεπαφών και μοντέλου πληροφοριών.

Το καλοκαίρι του 2019, ξεκίνησε η συγγραφή του NFV Release 4. Οι βασικοί τομείς για το συγκεκριμένο έργο προδιαγραφών εστίαζαν στην εξέλιξη του NFVI, στην



ενίσχυση του αυτοματισμού και των δυνατοτήτων του NFV και στην αναβάθμιση του πλαισίου NFV-MANO, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και την αντοχή του. [54]

Σχεδόν επτά χρόνια και πάνω από 100 δημοσιεύσεις αργότερα, η κοινότητα ISG NFV έχει εξελιχθεί σε διάφορες φάσεις, καθώς οι δημοσιεύσεις της έχουν μετακινηθεί από μελέτες προτυποποίησης σε λεπτομερείς προδιαγραφές. Αυτή η μεγάλη κοινότητα εξακολουθεί να εργάζεται εντατικά με σκοπό την ανάπτυξη των απαιτούμενων προτύπων για μετασχηματισμό του NFV, που ενσωματώνουν τις τελευταίες τεχνολογίες και τον διαμοιρασμό των εμπειριών τους σχετικά με την εφαρμογή και τη δοκιμή NFV σε περιβάλλοντα πολλών προμηθευτών.

Σήμερα, πέρα από το ETSI, πολλά έργα ανοιχτού κώδικα ασχολούνται με την ανάπτυξη προτύπων NFV, όπως το Open Platform for NFV, το Open Network για πρότυπα, έχουν καταστήσει δύσκολο για τους παρόχους υπηρεσιών να εξοικειωθούν με την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου. Ωστόσο, αυξάνεται η δημοτικότητα του λόγω της ταχύτατα αναπτυσσόμενης πολυπλοκότητας και των απαιτήσεων των εταιρικών δικτύων σήμερα. [55]

Η Cisco προσφέρει πολλά προϊόντα που σχετίζονται με το NFV, όπως το Nexus 1000V Switch, το οποίο παρέχει προηγμένες δυνατότητες εναλλαγής και ασφάλειας, όπως υποστήριξη για λίστες ελέγχου πρόσβασης δικτύου, εικονικά επεκτάσιμα τοπικά δίκτυα και διαδικτυακό πρωτόκολλο διαχείρισης ομίλου. Η Nokia προσφέρει επίσης μια ποικιλία προϊόντων που σχετίζονται με το NFV, συμπεριλαμβανομένου του Virtualized Service Router (VSR), ενός εικονικοποιημένου δρομολογητή IP edge που έχει σχεδιαστεί για τηλεπικοινωνιακά περιβάλλοντα cloud. Οι διαχειριστές μπορούν να κλιμακώσουν το VSR προσθέτοντας περισσότερα VMs, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζουν ανεξάρτητη κλιμάκωση των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων. Ακόμη και η Microsoft, με τον Windows Server, έχει συμπεριλάβει δυνατότητες NFV, όπως εξισορρόπηση φόρτου λογισμικού, τείχος προστασίας πολλαπλών ενοικιαστών και διάφορους τύπους πυλών, συμπεριλαμβανομένων ιστότοπων σε τοποθεσία, προώθησης και γενικής ενθυλάκωσης δρομολόγησης. [55]

## Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Με την πάροδο του χρόνου, οι πάροχοι υπηρεσιών δικτύου απαιτείται να επενδύσουν σε ακριβό, ειδικό υλικό. Αυτές οι εγκαταστάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν δρομολογητές, τείχη προστασίας και εξισορροπητές φορτίου που επιτρέπουν την παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών δικτύου. Ωστόσο, το εξειδικευμένο υλικό απαιτεί περισσότερο χώρο και ισχύ για να λειτουργεί αποτελεσματικά, κάτι που απαιτεί επίσης περαιτέρω επενδύσεις κεφαλαίου. Αντίθετα, η τεχνολογία NFV προσφέρει τη δυνατότητα εικονικοποίησης της υπηρεσίας δικτύου μέσω του cloud στο σύνολό της. Ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί εικονικές μηχανές και γίνεται φανερό, λοιπόν, πως υπάρχουν πάρα πολλοί λόγοι για τους οποίους οι οργανισμοί επιθυμούν να χρησιμοποιούν το NFV, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων πλεονεκτημάτων:

- **Μειωμένο κόστος:** Το NFV βοηθά στη μείωση των λειτουργικών εξόδων για υλικό και εξοπλισμό από τους οργανισμούς που το χρησιμοποιούν. Καθώς δεν απαιτείται επιπλέον αγορά κάποιας ειδικής συσκευής υλικού για την εκτέλεση της εργασίας ή των υπηρεσιών που επιθυμούν, μειώνεται το κόστος, αλλά και ο χώρος που θα χρειαζόταν για επιπλέον υποδομή. Επιπλέον η χρήση του επιφέρει καλύτερη απόδοση CAPEX και OPEX και το κόστος συντήρησης είναι οικονομικότερο.
- **Απλοποιημένη λειτουργικότητα και καλύτερη διαχείριση πόρων:** Καθώς οι λειτουργίες εικονικού δικτύου τρέχουν σε εικονικές μηχανές, δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης πολλών λειτουργιών σε μία μόνο συσκευή, όπως η ενοποίηση διακομιστών με χρήση εικονικοποίησης διακομιστή. Πέρα από την εξοικονόμηση κόστους υλικού, χώρου και ισχύος, απλοποιείται επίσης η διαδικασία σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών λειτουργιών δικτύου, καθώς όλα γίνονται σχεδόν μέσα σε μία μόνο συσκευή. Όταν ένα κέντρο δεδομένων ή μία παρόμοια υποδομή εικονικοποιηθεί, μπορεί να κάνει περισσότερα με λιγότερους πόρους, επειδή ένας μεμονωμένος διακομιστής μπορεί να εκτελεί διαφορετικές λειτουργίες εικονικού δικτύου ταυτόχρονα για να παράγει την ίδια ποσότητα εργασίας και επιτρέπει αυξημένη χωρητικότητα φόρτου εργασίας.

- **Ευελιξία και ταχύτερη εξέλιξη στην καινοτομία:** Το NFV βοηθά τους οργανισμούς να ενημερώσουν το λογισμικό υποδομής τους όταν αλλάζουν οι απαιτήσεις του δικτύου, μειώνοντας έντονα την ανάγκη για φυσικές ενημερώσεις. Καθώς οι επιχειρηματικές απαιτήσεις αλλάζουν και ανοίγουν νέες ευκαιρίες αγοράς, το NFV βοηθά τους οργανισμούς να προσαρμοστούν γρήγορα. Με το NFV, οι πάροχοι μπορούν τώρα να επιλέξουν ανάμεσα σε πολλούς διαφορετικούς προμηθευτές και να έχουν την ευελιξία να επιλέξουν τις χωρητικότητες υλικού που είναι βέλτιστες για την αρχιτεκτονική και τον σχεδιασμό του δικτύου τους.
- **Ανεξαρτησία προμηθευτή:** Επειδή το NFV παρέχει τα μέσα για την εύκολη ανάπτυξη μιας λύσης διαφορετικού προμηθευτή χωρίς το βαρύ κόστος που σχετίζεται με την αντικατάσταση ενός υπάρχοντος προμηθευτή, εμποδίζει τους χειριστές δικτύου να κλειδωθούν σε έναν συγκεκριμένο προμηθευτή. Έτσι μπορούν να συγκρίνουν τους προμηθευτές και τις υπηρεσίες και να επιλέγουν μεταξύ τους με βάση τη διαθεσιμότητα χαρακτηριστικών, το κόστος αδειοδότησης του λογισμικού, το μοντέλο υποστήριξης μετά την ανάπτυξη, τους χάρτες πορείας κ.λπ., χωρίς να περιμένουν να αναπτυχθούν και να υποστηριχθούν από τον υπάρχοντα προμηθευτή νέες λύσεις και δυνατότητες.
- **Αξιοποίηση των υπάρχοντων εργαλείων:** Το NFV μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει και να αξιοποιήσει τα εργαλεία ανάπτυξης και διαχείρισης που χρησιμοποιούνται ήδη σε κέντρα δεδομένων. Ως αποτέλεσμα, δίνεται το πλεονέκτημα της ταχύτερης προσαρμογής χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης νέων εργαλείων και ως εκ τούτου εξαλείφει το κόστος ανάπτυξης, εξοικείωσης και χρήσης νέου συνόλου εργαλείων.
- **Γρήγορη αποκατάσταση:** Παρέχεται η δυνατότητα γρήγορης αποκατάστασης αλλά και η επαναχρησιμοποίηση των εικονικών υποδομών σε περιπτώσεις βλάβης τους. Επιπλέον οι απώλειες δεδομένων σε μια τέτοια περίπτωση

ελαχιστοποιούνται, λόγω της ύπαρξης αντιγράφων ασφαλείας για κάθε μονάδα της υποδομής του δικτύου.

- **Γρηγορότερος κύκλος ζωής υπηρεσιών:** Οι νέες υπηρεσίες ή οι δυνατότητες δικτύου αναπτύσσονται πιο γρήγορα, παρέχοντας οφέλη για τους τελικούς χρήστες καθώς και για τους παρόχους δικτύου. Σε σχέση με το φυσικό υλικό, οι εικονικές λειτουργίες δικτύου μπορούν να δημιουργηθούν και να αφαιρεθούν εν κινήσει και ο κύκλος ζωής τους μπορεί να είναι πολύ μικρότερος και δυναμικός σε σύγκριση με τις φυσικές συσκευές. Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να προστεθούν όταν χρειάζεται, παρέχονται εύκολα μέσω αυτοματοποιημένων εργαλείων λογισμικού που δεν απαιτούν καμία επιτόπια δραστηριότητα και, στη συνέχεια, καταστρέφονται για να ελευθερώσουν πόρους το συντομότερο καθώς η ανάγκη έχει τελειώσει. [56], [57] [58]

Πέρα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση της τεχνολογίας NFV, τόσο στους χειριστές του δικτύου όσο και στους χρήστες, προκύπτουν και κάποιες προκλήσεις ή αδυναμίες, όπως:

- Η ανάγκη για συνύπαρξη με φυσικές συσκευές σ'ένα υβριδικό περιβάλλον ενσωματωμένο στο cloud.
- Αρκετά περίπλοκο NFVI.
- Καθυστέρηση μεταφοράς λόγω της εικονικοποίησης.
- Η απαίτηση κλιμάκωσης με πρόσθετα χαρακτηριστικά, καθώς τα περιβάλλοντα NFV είναι πιο δυναμικά από τα παραδοσιακά.
- Η ανάγκη διαχείρισης της πληροφορικής αφηρημένα, σε αντίθεση με τα συμβατικά περιβάλλοντα πληροφορικής.
- Ο επαναπροσδιορισμός της διαδικασίας, ώστε η παραδοσιακή και εικονική υποδομή να διαχειρίζονται ταυτόχρονα.

- Προσωρινά έξοδα προκειμένου να γίνει η επένδυση στο λογισμικό εικονικοποίησης και, ενδεχομένως, για τις πρόσθετες συσκευές που μπορεί να απαιτηθούν για να γίνει δυνατή η εικονικοποίηση.
- Ανησυχία για τους κινδύνους ασφάλειας από την κοινή χρήση αρχείων και την ένωση των διακομιστών. [59] [60]

## **ΣΥΓΚΡΙΣΗ NFV ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ**

### **5.1. Δίκτυο που καθορίζεται από λογισμικό (SDN):**

Το SDN είναι μια αρχιτεκτονική δικτύωσης που στοχεύει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου με στόχο να κάνει τα δίκτυα πιο ευέλικτα, επιτρέποντας μια δυναμική και αποδοτική διαμόρφωση. Το SDN είναι μια τεχνολογία που διαχωρίζει τη διαχείριση του επιπέδου ελέγχου των συσκευών δικτύου από το επίπεδο δεδομένων που προωθεί την κυκλοφορία του δικτύου προκειμένου να καταστεί δυνατή η πιο αυτοματοποιημένη παροχή και διαχείριση βάσει πόρων του δικτύου.

Βασικά, το SDN καθιστά προγραμματιζόμενο το δίκτυο διαχωρίζοντας το σύστημα που πρόκειται να αποφασίσει πού θα πρέπει να σταλεί η κυκλοφορία, δηλαδή, το επίπεδο ελέγχου από το υποκείμενο σύστημα που ωθεί τα πακέτα δεδομένων σε συγκεκριμένους προορισμούς, δηλαδή, επίπεδο δεδομένων.

Η τεχνολογία SDN παρέχει στις συσκευές του δικτύου μια σειρά υπηρεσιών με χρήση κατάλληλου λογισμικού που δίνει την δυνατότητα τα δίκτυα να προγραμματίζονται κεντρικά οπότε επιτυγχάνεται καλύτερη και πιο άμεση διαμόρφωση. Η δυνατότητα διαμόρφωσης μέσω λογισμικού επιτρέπει στις επιχειρήσεις και τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών να ανταποκρίνονται άμεσα όταν αλλάζουν ή μεταβάλλονται οι ανάγκες και οι απαιτήσεις, δίνοντας ένα καλύτερο και πιο έλεγχο του δικτύου.

### **Εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV):**

Το NFV όπως έχουμε αναφέρει είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που τελικά στοχεύει στην επιτάχυνση της ανάπτυξης υπηρεσιών για χειριστές δικτύου και στη μείωση του κόστους διαχωρίζοντας λειτουργίες όπως τείχος προστασίας ή κρυπτογράφηση από ειδικό υλικό και μετακινώντας τις υπηρεσίες σε εικονικούς διακομιστές, όπου τελικά μειώνει το συνολικό κόστος.

Το NFV επιτρέπει σε διάφορους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου να εφαρμόζουν την πολιτική δικτύου χωρίς να λαμβάνουν μέριμνα για το πού να τοποθετούν τις λειτουργίες στο δίκτυο και πώς να δρομολογούν την κυκλοφορία μέσω αυτών των

λειτουργιών. Είναι ένας τρόπος εικονικοποίησης υπηρεσιών δικτύου, όπως δρομολογητές, τείχη προστασίας κ.α. που παραδοσιακά εκτελούνται σε υλικό υπολογιστή του οποίου η διεπαφή ελέγχεται από ιδιοκτήτη (ιδιόκτητο υλικό) και επιτρέπει στις υπηρεσίες δικτύου να φιλοξενούνται σε εικονικές μηχανές.

Στα Virtual μηχανήματα (VM) - εικονικές μηχανές υπάρχει ένα controller - επόπτης ο οποίος διαχειρίζεται το κάθε VM, και έτσι πολλά διαφορετικά λειτουργικά συστήματα μπορούν να μοιράζονται το ίδιο hardware.

Το NVF παρέχει δίκτυα υψηλής απόδοσης που έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης, ελαστικότητα και προσαρμοστικότητα με χαμηλό κόστος σε σύγκριση με εκείνα τα δίκτυα που κατασκευάζονται από παραδοσιακό εξοπλισμό δικτύωσης. Επομένως, έρχεται να ξεπεράσει το μειονέκτημα του παραδοσιακού, προσαρμοσμένου σχεδιασμού εξοπλισμού δικτύου και μειώνει την ανάγκη για αποκλειστικό ή ιδιόκτητο υλικό για ανάπτυξη και διαχείριση δικτύων.

### 5.3 Διαφορές SDN με NFV

Το κοινό χαρακτηριστικό τόσο του SDN όσο και το NFV είναι ότι η δικτύωση και οι δύο χρησιμοποιούν αφαιρετική λογική στη δόμηση του δικτύου. Έτσι το SDN στόχο έχει τον διαχωρισμό των λειτουργιών ελέγχου στο δίκτυο από τις λειτουργίες που αφορούν την προώθηση των πακέτων δικτύου. Στο NFV στόχος είναι η αφαίρεση και διαχωρισμός ομοίως των λειτουργιών προώθηση δικτύου από το Hardware στο οποίο εκτελείται. Με βάση το παραπάνω και οι δύο τεχνολογίες εξαρτώνται άμεσα από τον τρόπο που θα γίνει η εικονικοποίηση ώστε να μπορεί να γίνει δυνατή η αφαίρεση του σχεδιασμού και της υποδομής του δικτύου σε λογισμικό και τελικά να εφαρμοστούν μέσω software σε πλατφόρμες υλικού και συσκευές.

Στην περίπτωση που το SDN χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σε υποδομή NFV, το χρησιμοποιεί και λειτουργίες ελέγχου για δρομολόγηση. Δηλαδή εφαρμόζει πολιτικές και εφαρμογές που καθορίζουν τις κατάλληλες διαδρομές και εκτελούνται σε VM στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το NFV δίνει τις βασικές λειτουργίες δικτύωσης και το

# S D N

καθορίζει τον έλεγχο για να γίνουν μια σειρά από συγκεκριμένες χρήσεις. Επίσης το SDN δίνει βραχυπρόθεσμα απάντηρα για ελέγχους και διαδρομολογήσεις και κεντρικά σημεία ελέγχου. Η βραχυπρόθεσμα απάντηρα για ελέγχους και διαδρομολογήσεις και κεντρικά σημεία ελέγχου είναι η βασική λειτουργία του SDN. Πιο συγκεκριμένα το SDN κάνει αφαίρεση των φυσικών πόρων δικτύωσης και των αντίστοιχων διακοπών και δρομολογητών και τελικά οδηγεί τη βασική λήψη αποφάσεων σε ένα VM περιβάλλον ελέγχου. Το επίπεδο ελέγχου, στην περίπτωση αυτή, είναι αυτό που αποφασίζει τον τρόπο αλλά και την διαδρομή για κάθε πακέτο, ενώ το Hardware συνεχίζει να χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των παραπάνω αποφάσεων. Στη περίπτωση του ο βασικό στόχος είναι η εικονοποίηση όλων των φυσικών πόρων του δικτύου κάτω από έναν υπεύθυνο κεντρικό κόμβο, ο οποίος επιτρέπει στο δίκτυο να αναπτυχθεί χωρίς την ανάγκη να προσθέσουμε συνεχώς νέες συσκευές ελέγχου.

Παρόλο που το SDN και NFV εφαρμόζουν και οι δύο, αρχιτεκτονικές δικτύου πιο ευέλικτες και δυναμικές, παίζουν διαφορετικούς ρόλους στον καθορισμό της αρχιτεκτονικής και της υποδομής που υποστηρίζουν. Παρακάτω φαίνονται οι βασικές διαφορές μεταξύ του SDN και NFV.

SDN	NFV
Η αρχιτεκτονική SDN εστιάζει κυρίως στα κέντρα δεδομένων	Το NFV απευθύνεται σε παρόχους υπηρεσιών ή φορείς εκμετάλλευσης.
Το SDN ακολουθεί διαχωρισμό στο επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο προώθησης δίνοντας έμφαση στον έλεγχο μέσω προγραμματισμού.	Το NFV βοηθά τους παρόχους υπηρεσιών ή τους χειριστές να εικονικοποιούν λειτουργίες όπως εξισορρόπηση φορτίου, δρομολόγησης, διαχείρισης πολιτικής, μεταφέροντας λειτουργίες δικτύου από ειδικές συσκευές σε εικονικούς διακομιστές.
Το SDN χρησιμοποιεί το OpenFlow ως πρωτόκολλο επικοινωνία	Δεν έχει καθοριστεί ακόμη πρωτόκολλο για το NFV.
Το SDN υποστηρίζει το Open Networking Foundation.	Το NFV καθοδηγείται από την ομάδα εργασίας ETSI NFV.
Διάφοροι προμηθευτές λογισμικού	Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών είναι οι



και υλικού εταιρικής δικτύωσης είναι υποστηρικτές του SDN.	βασικοί υποστηρικτές της NFV.
Οι εφαρμογές SDN εκτελούνται σε τυποποιημένους διακομιστές.	Οι εφαρμογές NFV εκτελούνται σε industry-standard διακομιστές .
Το SDN μειώνει το κόστος του δικτύου, επειδή δεν υπάρχει ανάγκη δαπανηρών διακοπών και δρομολογητών.	Το NFV αυξάνει την επεκτασιμότητα και την ευελιξία, καθώς και την επιτάχυνση του χρόνου προς την αγορά, καθώς δυναμικά-κατατάσσει υλικό ένα επίπεδο χωρητικότητας σε λειτουργίες καθαρής εργασίας που απαιτούνται σε μια συγκεκριμένη στιγμή.
Εφαρμογές στο SDN: Networking Cloud orchestration	Εφαρμογές στο NFV: Routers, firewalls, gateways WAN accelerators SLA assurance Video Servers Content Delivery Networks (CDN)

Τα παραδοσιακά δίκτυα που βασίζονται σε υλικό δεν ταιριάζουν με τις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες υπολογιστών και αποθήκευσης σε περιβάλλοντα μεγάλης κίνησης όπως πανεπιστημιούπολεων, κέντρα δεδομένων και περιβάλλοντα φορέων / παρόχων υπηρεσιών. Το SDN εφαρμόζεται με καλύτερο τρόπο σε καταστάσεις, που πολλά χαρακτηριστικά απαιτούν ευέλικτη δυναμική λογική.

Πιο αναλυτικά, η ταχεία αλλαγή της χρήσης και τα διαφορετικά μοτίβα κυκλοφορίας είναι ο κανόνας. Έτσι εφαρμογές που έχουν πρόσβαση σε πολλά δεδομένα σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές αλλά υπηρεσίες και περνούν τόσο από δημόσια ή ιδιωτικά clouds, απαιτούν λογική ευέλικτη και δυναμική όσο αφορά την διαχείριση της κυκλοφορίας αλλά και το εύρος ζώνης που απαιτείται.

Επίσης όπου η πληροφορία χρησιμοποιείται σαν καταναλωτικό αγαθό, και οι χρήστες χρησιμοποιούν όποια συσκευή θέλουν, τότε απαιτείται τα δίκτυα να είναι ιδιαίτερα ευέλικτα ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν αιτήσεις από τις συσκευές των χρηστών που πιθανά διαθέτουν διαφορετικά λειτουργικά περιβάλλοντα και hardware.

Επίσης τα δίκτυα πρέπει να παρέχουν ασφάλεια όσο αφορά την προστασία δεδομένων και να συμμορφώνονται με τους κανονισμούς, όπως τους καθορίζει ο νόμος περί φορητότητας και λογοδοσίας. Οι νόμοι καθορίζουν τόσο το θέμα της υγείας αλλά και της ασφάλειας δεδομένων για συναλλαγές.

Η δε συνεχή ανάπτυξη clouds οδηγεί οι χρήστες να χρειάζονται συνεχώς πρόσβαση σε εφαρμογές και πόρους ανεξάρτητα του χώρου και του χρόνου. Ταυτόχρονα η πολύ μεγάλη αύξηση του όγκου δεδομένων που χρειάζονται για διάφορες επιχειρηματικές διαδικασίες, υπάρχει απαίτηση για ακόμα μεγαλύτερους αποθηκευτικούς χώρους, υπολογιστικής ισχύς αλλά και εύρους ζώνης για τη διαχείριση πλέον Big Data. Ακόμα κι αν σήμερα οι χώροι αυτοί είναι επαρκείς σίγουρα στο μάλλον θα χρειάζονται αναβάθμιση.

Τα παραπάνω καθιστούν τα συμβατικά δίκτυα μη ικανά αφού τα κλασσικά δίκτυα επιβάλλουν περιορισμούς που εμποδίζουν τις νέες απαιτήσεις στο συνεχώς μεταβαλλόμενο τοπίο των αναγκών σε πόρους και υπηρεσίες.

Ο κύριος περιορισμός είναι η συνεχή αύξηση της πολυπλοκότητας και οι ανάγκες σε χωρητικότητα και ικανότητα στην αύξηση των κινητών συσκευών. Η ενίσχυση της χωρητικότητας και της ικανότητας σημαίνει ουσιαστικά την συνεχή δυνατότητα προσθήκης και εξυπηρέτησης της κίνησης των συσκευών και συνεχή διαμόρφωση πολιτικών όσο λειτουργεί το δίκτυο. Οι παραπάνω διαδικασίες προσθέτουν έντονη πολυπλοκότητα σε συμβατικά περιβάλλοντα και απαίτηση χρόνου αφού η μη αυτόματη πρόσβαση σε συσκευές και κονσόλες απαιτεί φυσική παρουσία.

Τα συμβατικά δίκτυα πρέπει να συμμορφώνονται επίσης με τον λεγόμενο κύκλο προϊόντων δηλαδή από ιδιόκτητες διεπαφές σε περιβάλλοντα ειδικά για προμηθευτές. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων συχνά καταβάλουν σημαντικό κόστος χρόνου και χρήματος στην προσπάθεια να προσαρμόσουν τα δίκτυά τους με νέες τεχνολογίες όταν ένα προϊόν που εκμεταλλεύονται λήγει ή ανανεώνεται.

Το SDN δίνει λύσεις σε πολλά από τα παραπάνω αφού βασίζεται στο ότι ο έλεγχος δικτύου μπορεί να διαχωριστεί και έτσι η υποδομή του δικτύου να ελέγχεται κεντρικά ανεξάρτητα από τις φυσικές συσκευές. Έτσι ο προγραμματισμός του δικτύου

και οι υπηρεσίες και τα πρωτόκολλα που εφαρμόζει γίνονται κεντρικά επιτυγχάνοντας αυτοματισμό, ενώ οι διαχειριστές δικτύου μπορούν να ορίσουν, να διαχειριστούν και να χειριστούν τα λογικά δίκτυα άμεσα.

Στην περίπτωση του NFV, ο στόχος είναι όλες τις λειτουργίες δικτύου που εκτελούνται σε όλα τα επίπεδα και τα στάδια ενός δικτύου να περνούν μέσα από μια οποιαδήποτε δεδομένη υποδομή δηλαδή να λειτουργούν κάτω από κοινούς πόρους.

Το NFV αντικαθιστά ουσιαστικά τις υπηρεσίες δικτύου από hardware με εικονικό λογισμικό. Δηλαδή οι υπηρεσίες δικτύου όπως η δρομολόγηση, το τείχος προστασίας, η εξισορρόπηση του φορτίου κ.α. μπορούν να αντικατασταθούν με κατάλληλο λογισμικό που εκτελείται σε VM. Οι αντίστοιχες λειτουργίες στο VM βρίσκονται υπό τον έλεγχο ενός controller όπου μπορεί να συνδυαστεί και με το SDN εφαρμόζοντας ένα σενάριο συνεργασίας μεταξύ αυτών των στοιχείων.

Με το NFV επιτυγχάνεται εξοικονόμηση των κεφαλαιουχικών δαπανών αλλά και των λειτουργικών εξόδων (OPEX), αφού στα μέχρι τώρα περιβάλλοντα οι υπηρεσίες δικτύου απαιτούν εξειδικευμένο hardware όπως σειρά από διαφορετικούς servers κ.α..

## Κόστος σε SDN / NFV

Υποτίθεται ότι ένα δίκτυο βασισμένο στην αρχιτεκτονική SDN / NFV προσφέρεται από εικονικές μηχανές (VM) που μπορούν να χειριστούν ταυτόχρονα  $k$  συνεδρίες. Επίσης θεωρείται ένα κόστος μίσθωσης  $u$  για κάθε μια από τις VM ετησίως να είναι δολάρια. Η ενέργεια που καταναλώνεται από τις VM ανά ημέρα είναι  $e$ . Ακόμη υποτίθεται ότι όλοι οι πάροχοι υπηρεσιών χρησιμοποιούν ένα κοινό δίκτυο με δυνατότητα κοινής χρήσης SDN / NFV. Αν όλες οι άλλες εισοδοι οι μεταβλητές για τους παρόχους υπηρεσιών είναι οι ίδιες, όπως ο αριθμός των πελατών τους και η συμπεριφορά τους στο δίκτυο, ο αριθμός των VM που χρειάζεται ο πάροχος υπηρεσιών για την υποστήριξη όλων των πελατών του και των συνδεδεμένων το κόστος για  $x$  χρόνια δίνεται από τον τύπο:

$$n_i = \left( \frac{k_v}{k} \right) \times c_i$$

$$C_i = n_i \times u \times x$$

Όπου  $n_i$  είναι ο αριθμός των VM που χρειάζονται και  $C_i$  είναι το κόστος για τον πάροχο υπηρεσιών για  $x$  χρόνια. Η ενέργεια που καταναλώνει ο πάροχος ορίζεται με  $E_i$  και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_i = n_i \times e$$

Για την σύγκριση ποσοτικά έχουμε τα παρακάτω μεγέθη

$$k = a_i \times k_i$$

$$u \times x = \gamma_i \times u_i$$

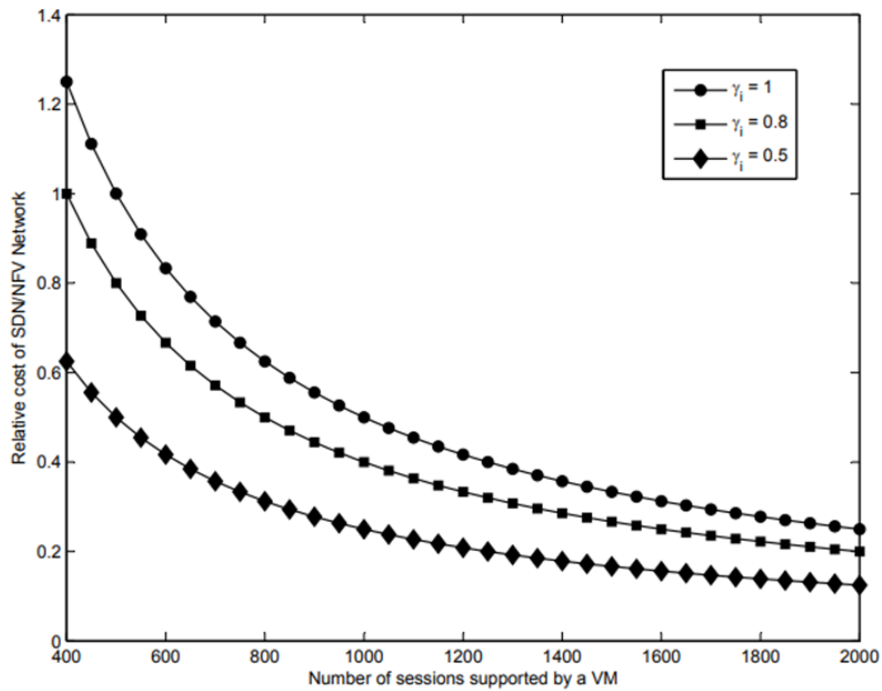
$$e = \beta_i x e_i$$

Όπου  $a_i$ , αποτελεί τα αιτήματα ανά συνεδρία,  $\gamma_i$  ποσοστό κέρδους σε σχέση με το μίσθωμα και  $\beta_i$  το βάρος κατανάλωσης ανά κόμβο. Το κόστος για κάθε πάροχο  $i$  που χρησιμοποιεί SDN/NFV για  $x$  χρόνια δίνεται από τον παρακάτω τύπο τελικά :

$$C_i = \frac{\gamma_i}{a_i} \times C_i$$

Για μείωση κόστους σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SDN / NFV το  $\gamma_i / a_i$  πρέπει να είναι μικρότερη από 1. Εάν θεωρήσουμε δύο δρομολογητές VM και 5G με ίδιο αριθμό περιόδων συνδέσεων, το κόστος της VM θα πρέπει να είναι χαμηλότερο από αυτό του κόστους δρομολογητή 5G. Ωστόσο, όταν ένα VM υποστηρίζει περισσότερες συνεδρίες από το δρομολογητή 5G, υπάρχει μεγαλύτερη χαλάρωση στο κόστος των VM. Αναμένεται όμως από ειδικούς του κλάδου ότι οι VM θα είναι πιο ισχυρές και θα είναι λιγότερο δαπανηρές από τους δρομολογητές 5G. Η απαραίτητη και απαιτούμενη κατάσταση είναι να είναι ότι  $a_i > \gamma_i$ .

Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του κόστους σε σχέση με τις συνδέσεις σε ένα VM σε σχέση με το  $\gamma$ .



Εικόνα 8. Κόστος VM ανά συνδέσεις σε ένα δίκτυο 5G SDN/NFV

Αντίστοιχα η σύγκριση κόστους και κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ δύο εντελώς διαφορετικών τεχνολογιών είναι αναμφίβολα πολύ περίπλοκο καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές πτυχές για το κάθε υλικό που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, σειρά από εφαρμοσμένα συστήματα στις εταιρίες τηλεπικοινωνιών αλλά και στη βιομηχανία οι ταχύτητες επεξεργασίας πακέτων καταναλώνουν λιγότερη ισχύ.

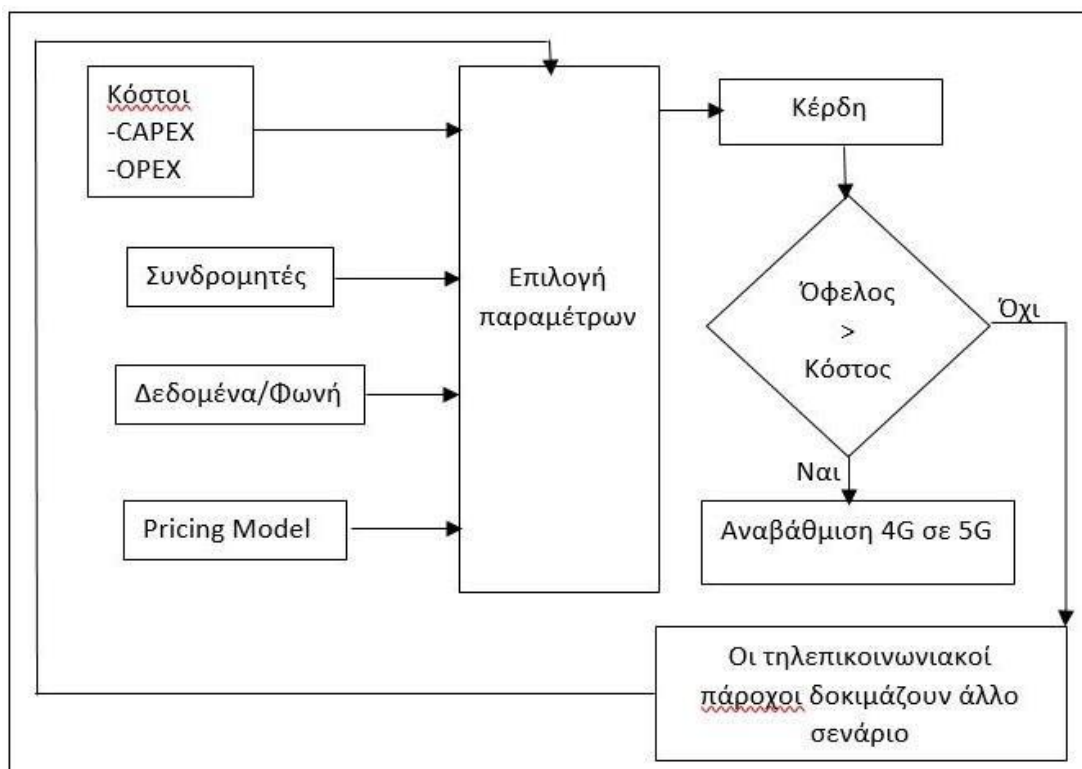
Στο δίκτυο που βασίζεται σε SDN / NFV, οι VM κατανέμονται για τους παρόχους υπηρεσιών για την εξυπηρέτηση της κίνησης των πελατών τους. Φαίνεται λοιπόν ότι η σχετική μείωση του κόστους είναι πραγματική και ποσοτική με βάση τις παραμέτρους που αναλύθηκαν.

# ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

## .1 Πρόβλεψη κόστους - Ανάλυση οφέλους ανάπτυξης 5G δικτύων

Στόχος της παρούσης οικονομοτεχνικής μελέτης είναι αρχικά ο ορισμός των κατάλληλων παραμέτρων ώστε να μπορεί να προβλεφθεί το κόστος ανάπτυξης ενός δικτύου 5G με εφαρμογή των NFV τεχνολογιών όσο και χωρίς αυτές. Για να μπορέσει να γίνει η ανάλυση εστίασαμε αρχικά σε στοιχεία που αφορούν τον Ελληνικό χώρο, τα οποία μπορεί κάποιος να βρει από ανακοινώσεις των εταιριών στο διαδίκτυο.

Το πιο βασικό στοιχείο για να μπορέσει να γίνει η ανάλυση είναι ο αριθμός των συνδρομητών. Σαν αριθμό συνδρομητών σε κάθε εταιρία ονομάζουμε κάθε συσκευή που κατέχει ένα άτομο με ένα νούμερο επικοινωνίας (τηλεφωνικό νούμερο ή νούμερο για χρήση DATA). Πιο συγκεκριμένα καθορίζεται κάθε χρήστης που έχει μια ή περισσότερες κάρτες SIM όπου μέσω αυτής συνδέεται στο τηλεφωνικό δίκτυο ενός παρόχου. Ο αριθμός τελικά είναι οι ενεργές συσκευές με κάρτα SIM στο δίκτυο ενός παρόχου.



Εικόνα 9. Μοντέλο για την πρόβλεψη κόστους

Για την κατοχή μιας τέτοιας κάρτας ο κάτοχος πληρώνει ένα αντίτιμο. Για να υπάρξει η υπηρεσία θα πρέπει να υπάρχει ένα δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει μια οργάνωση σε σειρά από συσκευές όπως κεραίες, κόμβοι, καλώδια, συσκευές σύνδεσης, προσωπικό κ.α.

Στόχος τελικά είναι να μπορέσει αρχικά να υπολογιστεί το Συνολικό Κόστος του Παρόχου. Επίσης να γίνει υπολογισμός στα προβλεπόμενα έσοδα και τελικά κέρδη που πιθανά έχει όταν ένας πάροχος εισάγει νέες τεχνολογίες στο δίκτυο του και πιο συγκεκριμένα τεχνολογίες όπως η NFV. Ο δείκτης που καθορίζει την επιτυχία μιας επένδυσης ή αλλιώς την απόδοση της είναι ο δείκτης Return On Investment (ROI).

Η Απόδοση επένδυσης είναι ένας βασικός δείκτης στο χώρο της οικονομίας που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση μιας επένδυσης με στόχο να κρίνει η να συγκρίνει αν μια επένδυση θα φέρει κέρδη ή θα είναι καλύτερη από μια άλλη. Για τον υπολογισμό του ROI, το όφελος (απόδοση) μιας επένδυσης διαιρείται με το κόστος της και το αποτέλεσμα εκφράζεται ως ποσοστό.

$$\text{Απόδοση της επένδυσης} = \frac{\text{(Κέρδος επένδυσης - Κόστος επένδυσης)}}{\text{Κόστος επένδυσης}}$$

Αν η απόδοση επένδυσης είναι θετική τότε η επένδυση επιφέρει κέρδη.

Στην περίπτωση των οργανισμών τηλεπικοινωνίας στόχος είναι όπως και σε κάθε εταιρία η μεγιστοποίηση στα οφέλη και στα κέρδη. Ένας οργανισμός όμως στις τηλεπικοινωνίες έχει και ιδιαίτερο ανταγωνισμό. Έτσι θέλει ουσιαστικά να προσφέρει ανταγωνιστική τιμή στους καταναλωτές της ώστε να τον προτιμούν και ταυτόχρονα να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κέρδος.

Ταυτόχρονα οι καινοτομίες και η ποιότητα των επικοινωνιών αποτελεί σημαντικό παράγοντα προτίμησης οπότε οι επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες μπορούν

να δώσουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης εξετάζεται η Ελλάδα, έχοντας τα παρακάτω:

- Η Ελλάδα έχει έκταση 131.990 km<sup>2</sup>.
- Ο πληθυσμός της χώρας είναι 11 εκατομμύρια
- Η πυκνότητα του πληθυσμού είναι 84 κατ./km<sup>2</sup> [11].

Η δομή σε σχέση με το περιβάλλον που ζουν οι καταναλωτές είναι :

- Το 67% του πληθυσμού ζει σε αστικές περιοχές.
- Το 33% σε αγροτικές περιοχές.

Επίσης σημαντική είναι η χρήση ανά κάτοικο κινητών συσκευών. Με βάση την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία [12], αντιστοιχούνται 129 κινητά ανά 100. Με βάση επίσης και την ΕΕΤΤ, αναμένεται ότι ο αριθμός των κινητών συσκευών το 2022 στην Ελλάδα να φτάσει στα 16 εκατομμύρια. Αυτό είναι λογικό σήμερα αφού η πλειοψηφία των συνδρομητών χρησιμοποιεί και δεύτερη κάρτα SIM είτε για τηλεφωνική επικοινωνία ή για χρήση δεδομένων.

Για την πρόβλεψη κόστους και όφελους σε ένα βάθος 7 χρόνων είναι σημαντικοί κάποιοι παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Η πρόβλεψη των συνδρομητών σε ένα οργανισμό τα επόμενα 7 χρόνια
- Ο ρυθμός κινητικότητας των συνδρομητών από πάροχο σε πάροχο
- Η πρόβλεψη και ανάλυση της βέλτιστης τιμής πώλησης
- Η αξιολόγηση CAPEX ή OPEX για τους σταθμούς βάσης.

Η πρόβλεψη των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας αποτελεί ένα από τους βασικότερους παράγοντες για τις επενδύσεις σε ένα οργανισμό τηλεπικοινωνιών. Παράμετροι όπως ο αριθμός των ανταγωνιστών, ο κατακερματισμός της αγοράς σε σχέση με την παρεχόμενη υπηρεσία, τα δημογραφικά στοιχεία των καταναλωτών, τα προσφερόμενα πακέτα υπηρεσιών είναι βασικοί δείκτες – παράγοντες για την μέτρηση σκοπιμότητας μιας επένδυσης στην αγορά των τηλεπικοινωνιών.

Επίσης η κινητικότητα των καταναλωτών και των συνδέσεων τους, που ορίζεται στο ποσοστό των συνδρομητών που πρόκειται διακόψουν ένα πακέτο από ένα οργανισμό



με σκοπό είτε να σταματήσουν οριστικά είτε να αλλάξουν πάροχο, έχει σημαντική επίπτωση στα έσοδα του οργανισμού.

Η ανάλυση τιμής και η στρατηγική για την εύρεση της βέλτιστης τιμής αγοράς αφορά το πόσο μια εταιρία θα επιτύχει την καλύτερη τιμή σε σχέση με το κέρδος της σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και ταυτόχρονα ανταγωνιστική ώστε οι πελάτες να προτιμούν τον συγκεκριμένο πάροχο.

Σημαντικές είναι και οι αξιολογήσεις CAPEX και OPEX. Οι επιχειρήσεις έχουν μια ποικιλία δαπανών, από το ενοίκιο που πληρώνουν για τις εγκαταστάσεις τους, το κόστος των τεχνολογιών που εφαρμόζουν, το κόστος των πρώτων υλών για τα προϊόντα τους, τους μισθούς που πληρώνουν στους εργαζομένους, το συνολικό κόστος ανάπτυξης της επιχείρησής τους. Οι επιχειρήσεις με στόχο την απλοποίηση υπολογισμού στα παραπάνω κόστη, δυο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) και οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX).

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) αφορούν τις αγορές που πραγματοποιεί μια εταιρεία με στόχο να σχεδιάσει για να χρησιμοποιήσει στην ανάπτυξη της στο μέλλον. Τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) είναι τα καθημερινά έξοδα που πραγματοποιεί μια εταιρεία για να διατηρήσει τη λειτουργία της επιχείρησής της.

## .2 Πρόβλεψη συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας

Για την πρόβλεψη των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και χρήσης DATA έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά μοντέλα. Όλα τα μοντέλα έχουν σαν βάση τον πληθυσμό των χρηστών, τον ρυθμό που εφαρμόζονται καινοτομίες καθώς και τον λεγόμενο συντελεστή μίμησης, δηλαδή τον τρόπο που άλλες εταιρίες προσπαθούν ή εφαρμόζουν παρόμοιες τεχνολογίες με αυτή του υπό μελέτη παρόχου.

- **Ο αριθμός των μελλοντικών συνδρομητών** είναι ανάλογος και εξαρτάται από τον συνολικό πληθυσμό των καταναλωτών δηλαδή τον πληθυσμό που είναι σε θέση να αγοράσει την παρεχόμενη υπηρεσία με τις καινοτομίες της .

- **Ο ρυθμό ανάπτυξη της καινοτομίας (coefficient of innovation)** είναι ο ρυθμός που προβλέπουμε ότι μια καινοτομία εφαρμόζεται στην αγορά
- **Ο συντελεστή «μίμησης» (coefficient of imitation)** αφορά στο ποσοστό των πιθανών, σε αριθμό, μελλοντικών συνδρομητών που πρόκειται να ενταχθούν σε μια καινοτομία όπως στην περίπτωση μας στο 5G.

Ένα μοντέλο που εκφράζει τα παραπάνω είναι:

$$N(t) = \frac{M(1 - e^{-t(p+q)})}{1 + \frac{q}{p}e^{-t(p+q)}}, p > 0, q \geq 0$$

Πιο συγκεκριμένα:

- ο παράγοντας  $M$  αφορά το επίπεδο κορεσμού της χρήσης του 5G δικτύου. Δηλαδή πόσο χρησιμοποιείται από τους χρήστες ο δίκτυο.
- Το  $p$  ορίζει το ρυθμό ανάπτυξης της καινοτομίας, δηλαδή τη πιθανότητα το αρχικό κόστος – αγορά μιας καινοτομίας στο ξεκίνημα του κύκλου ζωής των υπηρεσιών να σχετίζεται με την αρχική αποδοχή των υπηρεσιών από τους συνδρομητές. Πιο συγκεκριμένα δηλώνει το πόσο έντονα γίνεται η διάδοση της καινοτομίας σε σχέση με μια αρχική κατάσταση.
- Το  $q$  δηλώνει το συντελεστής μίμησης.
- Τελικά το  $N(t)$  είναι ο αριθμός των συνδρομητών σε μια χρονική στιγμή  $t$ .

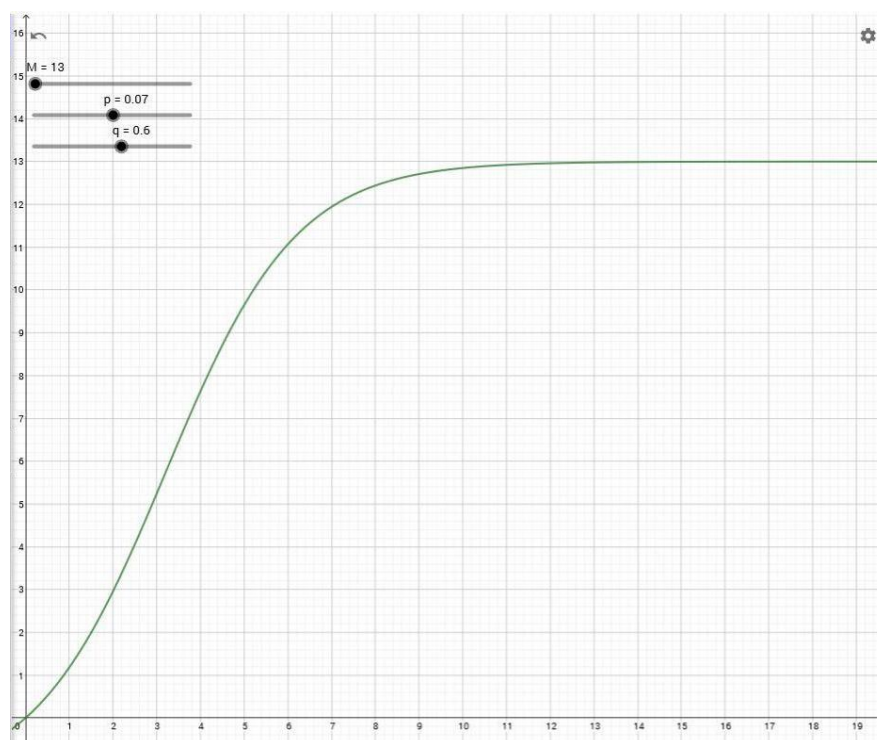
Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της ΕΕΤΤ τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα, θεωρείται ότι  $M = 13$  εκατομμύρια (αριθμός συνδρομητών στην Ελλάδα) με  $p = 0.07$  και  $q = 0.60$  μπορεί να υπολογιστεί το  $N$  για κάθε χρόνο.

Πίνακας 1. Συνδρομητές, Έσοδα, Διείσδυση, Ποσοστό συνδρομητών

Χρονιά	Σύνολο (Cosmote - Vodafone - Wind)	Έσοδα κινητής τηλεφωνίας σε δις	Διείσδυση 4G	Ποσοστό
2015	12.127.985	2,3		-0.01
2016	12.897.306	2,1		+0.07
2018	12.518.645	1,9	0.00	-0.03
2019	12.144.598	1,7	0.60	-0.03
2020	12.566.650	1,7	0.85	+0,04

Με βάση αυτά τα στοιχεία υπολογίστηκε για κάθε χρόνο το N και όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, γίνεται φανερό ότι στο δίκτυο 5G ο αριθμός των συνδρομητών - καινοτόμων το πρώτο χρόνο είναι σχετικά μικρός. Με το πέρασμα όμως του χρόνου η επιρροή της νέας τεχνολογίας και των καινοτόμων υπηρεσιών θα επηρεάσει τους μμητές.

Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπάρχει σταδιακή αύξηση μέχρι να φτάσει σε



Εικόνα 10. Πρόβλεψη συνδρομητών 5G

σχετικό κορεσμό.

## Ρυθμός κίνησης

Σημαντικό στοιχείο για την μελέτη είναι ο ρυθμός κίνησης. Όπως αναφέρθηκε, ο ρυθμός κίνησης (churn rate), έχει σχέση με το ποσοστό συνδρομητών που πρόκειται να διακόψουν τις υπηρεσίες που σχετίζονται με τις υπηρεσίες των 5G δικτύων από ένα πάροχο μέσα σε ένα χρονικό διάστημα.

Και στην περίπτωση αυτή υπάρχουν αρκετά μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ρυθμού κίνησης. Το πιο γνωστό μοντέλο για τον υπολογισμό είναι το παρακάτω:

$$CR_{year} = \frac{Outflow_{year}}{N_{year}}$$

Στο παραπάνω μοντέλο:

- το  $N_{year}$  είναι ο αριθμός συνδρομητών που προβλέπουμε για ένα συγκεκριμένο έτος.
- Το  $CR_{year}$  είναι το ποσοστό της αλλαγής – διακοπής συνδρομητών από ένα πάροχο σε κάποιο άλλο σε ένα συγκεκριμένο χρόνο.
- Το  $Outflow_{year}$  είναι ο αριθμός των συνδρομητών που δήλωσαν ότι θέλουν να διακόψουν και διέκοψαν ή τελικά δεν χρησιμοποίησαν της σύνδεση τους σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα

Το παραπάνω κλάσμα υπολογίζει το ρυθμό κίνηση και είναι πολύ βασικό στοιχείο για τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών. Αυτό γιατί με το παραπάνω κλάσμα μπορούν να κάνουν ένα υπολογισμό στα κέρδη που θα αποκτήσουν αλλά και τα κέρδη που θα χάσουν οι πάροχοι, από χρήστες-συσκευές που τελικά θα αποχωρήσουν για μια συγκεκριμένη περίοδο.

Με βάση την ΕΕΤΤ, ο ρυθμός κίνησης κυμαίνεται από 1 έως 5% . Σύμφωνα με το παραπάνω στοιχείο ο ρυθμός κίνησης φαίνεται να είναι μικρός έχοντας σαν συνέπεια

ότι τελικά δεν έχουμε σημαντικό βαθμό επίδρασης στα έσοδα των τηλεπικοινωνιακών παρόχων.

Παρόλα αυτά αν θεωρηθεί ότι συμβαίνει η χειρότερη περίπτωση δηλαδή το 5% του ποσοστού των συνδρομητών, τελικά υπάρχει μια σχετική μείωση στα μελλοντικά κέρδη. Αυτό γιατί, δεν χάνεται μόνο από τα κέρδη κατά την διάρκεια που είναι ενεργός ο συνδρομητής αλλά υπάρχει και μεγαλύτερο κόστος λόγω δυσμενής αναλογίας του κόστους μάρκετινγκ για την απόκτηση του συνδρομητή αυτού.

## Αναζήτηση καλύτερης τιμής (Pricing model)

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για να έχει καταναλωτές μια εταιρία τηλεπικοινωνιών είναι η τιμή που παρέχεται η υπηρεσία. Η παροχή των δεδομένων στα δίκτυα 5G θα αντιμετωπίσει ένα σημαντικό ζήτημα όσο αφορά τη στρατηγική τιμολόγησης. Το βασικό ερώτημα είναι τελικά αν το δίκτυο 5G θα καταφέρει να αυξήσει τα έσοδα του οργανισμού ή όχι.

Η παρούσα κατάσταση δείχνει ότι το 89% των παρόχων κινητής τηλεφωνίας, έχουν σαν βάση τα μοντέλα «πακέτων δεδομένων». Επίσης συνδυάζουν ένα τρόπο τιμολόγησης που έχει ανώτατα όρια. Για παράδειγμα όπως μοντέλα με πακέτα 1GB, ανά μήνα είναι ευνοϊκά μόνο για πιο χαμηλά επίπεδα κινητού δικτύου όπως είναι το 4G. Στην περίπτωση του 5G αυτό αλλάζει αφού ο όγκος δεδομένων που θα μεταφέρεται θα είναι τάξης μεγέθους μεγαλύτερος. Μάλιστα οι νέες υπηρεσίες που έρχεται να καλύψει το 5G σε σχέση με το 4G είναι ακριβώς ότι εφαρμογές που απαιτούσαν μεγάλο όγκο δεδομένων τώρα είναι εφικτές.

Σύμφωνα με μελέτη της Ericsson ακριβώς πάνω σε αυτό το ζήτημα, φαίνεται ότι οι χρήστες είναι πρόθυμοι να πληρώσουν περισσότερα χρήματα, αρκεί να υπάρχει παροχή σε περισσότερες και κυρίως βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες.

Φυσικά η τιμή είναι πολύ σημαντική για την αύξηση της κερδοφορίας και το γεγονός αυτό μπορεί να ενθαρρύνει τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας να στραφούν προς το μοντέλο της τιμολόγησης βάσει αξίας (value-based pricing). Τεχνικές διαχείρισης των πελατών τόσο από θέμα διαχείρισης όσο και θέμα της αξίας τους

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να γίνει ο υπολογισμός της αξία της αγοράς και να μεγιστοποιηθεί η αξία.

## Τιμή ελαστικότητας με βάση τον όγκο (Price Elasticity of

Τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την βέλτιστη τιμή είναι η Τιμή Ελαστικότητας με βάση τον όγκο (Price elasticity of volume) και η Ελαστικότητα του όγκου με βάση τα έσοδα (Volume Elasticity of revenue).

Η τιμή ελαστικότητας με βάση τον όγκο ( $E_V(P)$ ), είναι ένα μέτρο ανάλογο με την τιμή ελαστικότητας της ζήτησης (PED). Η τιμή ελαστικότητας με βάση τον όγκο, ορίζεται ως ποσοστό μεταβολής του όγκου  $V$  ως προς την ποσοστιαία μεταβολή της τιμής μονάδας  $P$ . Με χρήση της τιμής ελαστικότητας υπάρχει δυνατότητα να ελέγξουμε τις αντιδράσεις των συνδρομητών σε σχέση με τις πιθανές αυξήσεις ή μειώσεις των τιμών της κινητής τηλεφωνίας.

Ο τύπος που καθορίζει τελικά την ελαστικότητα σε σχέση τον όγκο και την τιμή είναι:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{E_V(P)\Delta P}{P}$$

Όταν η τιμή ελαστικότητα είναι μικρότερη της μονάδας κατά απόλυτη τιμή τότε σημαίνει πως έχουμε μη ελαστικότητα, δηλαδή οι μεταβολές της τιμής των υπηρεσιών έχουν σχετικά μικρή επίδραση στον όγκο της ζήτησης των υπηρεσιών. Από την άλλη πλευρά, εάν η τιμή ελαστικότητας είναι μεγαλύτερη της μονάδας τότε έχουμε ελαστικότητα, δηλαδή οι μεταβολές της τιμής των υπηρεσιών έχουν μεγάλη επίδραση στον όγκο της ζήτησης των υπηρεσιών.

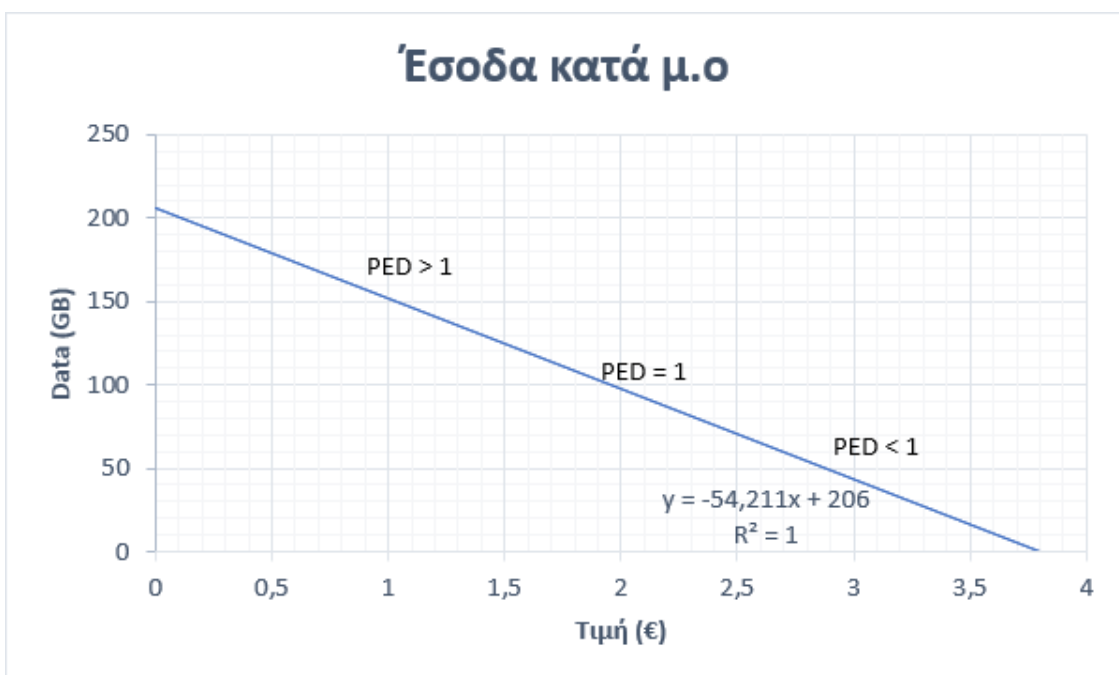
Επίσης η ελαστικότητα όγκου με βάση τα έσοδα ( $E_R(P)$ ), ορίζεται ως το ποσοστό μεταβολής των εσόδων ( $R$ ) προς το ποσοστό μεταβολής του όγκου  $V$ . Η

ελαστικότητα με βάση τα έσοδα μας δίνει την δυνατότητα της γνώσης μεταβολής των εσόδων των παρόχων των κινητών επικοινωνιών σε σχέση με τις μεταβολές του όγκου στη ζήτηση. Στην περίπτωση αυτή ο τύπος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{E_R(V)\Delta V}{V}$$

Γενικά όταν το  $E_R(V)$  είναι μεγαλύτερο του 1, η αύξηση της ζήτησης του όγκου των υπηρεσιών επηρεάζει την αύξηση των εσόδων. Αντίθετα όταν το  $E_v(P)$  είναι μικρότερο του 1, σημαίνει ότι η αύξηση τη ζήτησης του όγκου των υπηρεσιών επηρεάζει τη μείωση της τιμής και αντίστροφα.

Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η μείωση της τιμής των υπηρεσιών επιφέρει συνήθως την αύξηση της ζήτησης της ποσότητας από τους συνδρομητές. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ξεκάθαρα η σχέση αυτή.



Εικόνα 11. Τιμή σε σχέση με κατανάλωση

Με βάση στοιχεία από την ERICSON το κόστος δικτύου είναι μικρότερο από

κατασκευή του αντίστοιχου χώρου που χρειάζεται. Αν υποθετηθεί λοιπόν ότι το κόστος δικτύου ανά GB κατά μέσο όρο είναι 0.90 €, τα κέρδη της πώλησης 100 GB είναι πολύ περισσότερα από τα κέρδη κατά την πώληση των 140 GB. Παρόλα αυτά σε ένα 4G δίκτυο που μπορεί να δώσει 10 GB/συνδρομητή το μήνα, στην ίδια τιμή ανά GB με το 5G δίκτυο, τότε για τα 10 GB στο 4G δίκτυο το κέρδος ισούται με κέρδος των 100 GB για 5G κινητό δίκτυο. Δηλαδή  $100/190 = 10/19.0$ . Στο πίνακα που ακολουθεί αναπαριστώνται τα πιθανά κέρδη αναλογικά με το όγκο .

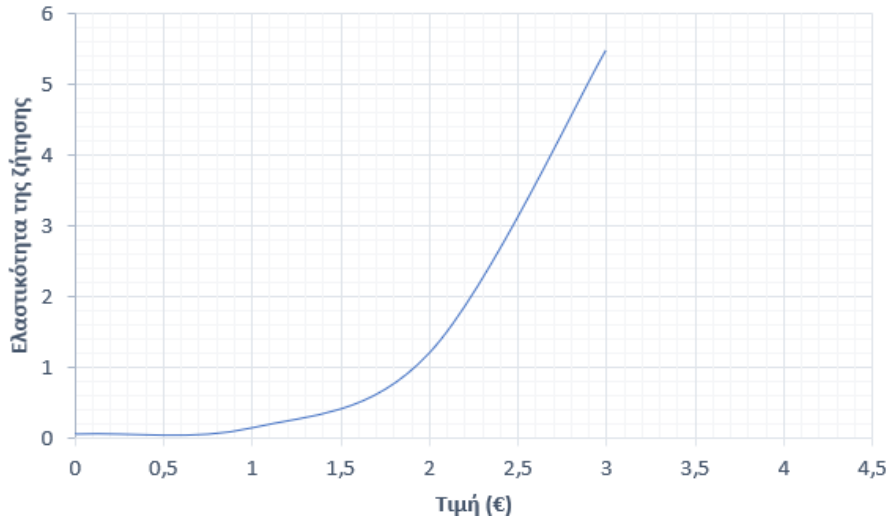
Πίνακας 2. Κέρδη σε σχέση με όγκο Data

Πώληση GB/Χρήστη/Μήνα	150	140	130	120	110	100	80	70	60	50
Τιμή ανά GB (€)	1	1.20	1.40	1.60	1.78	1.90	2.3	2.5	2.69	2.88
Κόστος ανά GB (€)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Έσοδα (€) = τιμή * GB	150	168	182	192	195.8	190	184	175	161.4	144
Συνολικό κόστος (€) = GB * κόστος	135	126	117	108	99	90	72	63	54	45
Κέρδος (€)	15	42	65	84	96.8	100	112	112	107.4	99
Περιθώριο κέρδους = Κέρδος/Έσοδα (%)	100	25	35.7	43.7	49,4	52.6	60.7	64	66.5	68.7

Με βάση τα παραπάνω, η τεχνολογία των 5G δικτύων φαίνεται αμέσως να είναι πιο κερδοφόρα από αυτή του 4G δικτύου. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας αλλά και λόγω της χρήσης μεγαλύτερου όγκου δεδομένων από τους καταναλωτές.

Επίσης φαίνεται ότι η ποσότητα ζήτησης μειώνεται όταν η τιμή αυξάνεται. Ταυτόχρονα τα κέρδη των παρόχων της κινητής τηλεφωνίας μεγιστοποιούνται όταν η τιμή έχει οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η ελαστικότητα της ζήτησης ισούται ακριβώς με 1. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ακριβώς την σχέση ελαστικότητας ζήτησης σε σχέση με την τιμή.





Εικόνα 12. Ελαστικότητα σε σχέση με Τιμή

Τα δίκτυα 5G δίνουν μια ευρυζωνική σύνδεση υψηλής ταχύτητας και υπηρεσίες που καταναλώνουν πολλά GB ανά χρήστη το μήνα. Το γεγονός αυτό επιφέρει δυσκολίες στους χρήστες που το μηνιαίο πακέτο που χρησιμοποιούν δεν έχει πολύ μεγάλο όγκο. Τα πακέτα αυτά στο δίκτυο 4G είναι σχεδόν ο κανόνας. Μια πολιτική που μπορεί να εφαρμοστεί είναι αυτή της «Επέκτασης Πακέτου». Οι εταιρίες γενικά χρησιμοποιούν τέτοιες προσφορές με στόχο να προσελκύσουν περισσότερους χρήστες και να επιτύχουν καλύτερη θέση σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Στην περίπτωση του φαίνεται αυτό να είναι μονόδρομος αφού η ανάγκη συνεχώς για περισσότερα δεδομένα σχεδόν επιβάλλει τέτοιες πολιτικές.

## Πρόβλεψη Κόστους και Ανάλυση

Για να γίνει φανερό το κόστος και η σύγκριση με πιθανές πολιτικές ανάπτυξης δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν δύο σενάρια:

**Σενάριο 1:** Αντικατάσταση του υπάρχοντος εξοπλισμού στους σταθμούς βάσης, μέσω της ανάπτυξης νέας τεχνολογίας RAT (Radio Access Technology), με ένα νέο σύστημα κεραιών και ραδιοεξοπλισμού. Επίσης οι κόμβοι λειτουργούν με εφαρμογή των τεχνολογιών NFV.

Στην περίπτωση αυτή το κάθε κανάλι απέχει χιλιοστά από το άλλο έτσι ώστε να επιτρέπεται το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης καναλιών. Επίσης με αυτό τον τρόπο

υποστηρίζονται ταχύτητες έως και 10Gbit/sec.

Ταυτόχρονα η εφαρμογή του NFV φέρνει ιδιαίτερες αλλαγές στο κόστος αφού στην περίπτωση αυτή οι λειτουργίες δικτύου γίνονται μέσω λογισμικού που εκτελείται σε VM συσκευές σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα που χρησιμοποιούν πραγματικούς διακομιστές για διαφορετικές υπηρεσίες. Με τον τρόπο αυτό έχουμε εξοικονόμηση στο κόστος.

Όσον αφορά το SDN έχουμε διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων με αποτέλεσμα να είναι δυνατό για τον χρήστη να μην έχει εξαρτήσεις από έναν συγκεκριμένο προμηθευτή ώστε να αυξήσει την ταχύτητα εισαγωγής νέων δυνατοτήτων και τελικά να μειώσει το κόστος. Έτσι με βάση εφαρμοσμένα συστήματα μπορεί να υπάρχει μέχρι και 58% μείωση στο CAPEX ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ένα σενάριο με SDN τεχνολογία σε σχέση με την συμβατική αρχιτεκτονική.

Ταυτόχρονα η χρήση VM μπορεί να φέρει μέχρι και 68% μείωση στο CAPEX και 67% μείωση στο OPEX. Π.χ ένας controller Cloud-RAN μπορεί να παρέχει τεμαχισμό και διαμοιρασμό πόρων του δικτύου επιτρέποντας κοινή χρήση RAN μεταξύ των χρηστών δίνοντας πολύ μεγάλη οικονομία.

**Σενάριο 2:** Στην περίπτωση αυτοί οι σταθμοί βάσης βελτιώνονται προσθέτοντας σειρά από νέων ραδιοφασμάτων μικρότερα των 4GHz. Ταυτόχρονα δημιουργούνται νέοι σταθμοί βάσης που εδώ θα ήταν βέλτιστο με τεχνολογίες NVF όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υποστηρίζοντας και την τεχνολογία RAT.

Για τη σύγκριση κάθε σεναρίου χρησιμοποιήθηκε ο εξής τύπος:

$$C_i = \sum_{k=0}^{k-1} \frac{a_{k,i}}{(1+b)^k}$$

Όπου  $C_i$  θεωρούνται οι συνολικές δαπάνες ενώ  $a_{k,i}$  είναι σε κάθε περίπτωση το άθροισμα των δαπανών στο έτος  $k$  για τον σταθμό βάσης τύπου  $i$ . Το  $\beta$  είναι το λεγόμενο discount rate. Το  $k=6$  χρόνια αφού αφορά ένα χρόνο εξαετίας και  $\beta = 10\%$ .

Με βάση τα στοιχεία που υπάρχουν σε εταιρίες όπως η COSMOTE ή η ανάπτυξη κυψελοειδούς σταθμού βάσης σε μια αστική περιοχή ανέρχεται στα 100 χιλ. €. Στο κόστος αυτό συμπεριλαμβάνεται και η μετάδοση του σήματος. Αντίστοιχα στο κόστος πρέπει να προστεθούν 10 χιλ. €, που αντιστοιχεί στο κόστος ραδιοεξοπλισμού για υποστήριξη συχνοτήτων 5-20 MHz ο καθένας.

Το κόστος single - carrier MaBS ισούται με 20 χιλ. € και το κόστος πρόσθετου πομποδέκτη είναι 5 χιλ. € ανά sector και ανά συχνότητα φορέα (carrier frequency). Το συνολικό κόστος για την εγκατάσταση ενός επιπλέον φορέα σε τρεις τομείς είναι 25 χιλ. €. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος (OPEX) για την εγκατάσταση ενός MaBS είναι € και για την χρήση ενός υπάρχοντος MaBS είναι 10000 € ετησίως.

Ταυτόχρονα το κόστος ενός κυψελοειδούς σταθμού βάσης με μορφή micro και pico είναι το 50% και 15% αντίστοιχα, ενός MaBS single – carrier, και το κόστος για την μετάδοση σήματος ανά pico σταθμό βάσης είναι 2000 €. Για την ανάπτυξη ενός χώρου micro BS και ενός χώρου pico BS χρειάζονται 10000. € και 2000 € αντίστοιχα.

Το CAPEX και OPEX κόστος για ένα Femto Cell BS είναι 1100 € και 500€ αντίστοιχα, ενώ το CAPEX και OPEX για Wi-Fi AP IEEE 802.1ac είναι 1000 χιλ. € και 0,14 χιλ. € αντίστοιχα.

## Απαιτούμενη κίνηση και Επένδυση δικτύου

Θεωρώντας ότι ο όγκος δεδομένων ανά συνδρομητή εξαρτάται από την ανάπτυξη του δικτύου αλλά και από την κίνηση του δικτύου, η παραγόμενη κίνηση του δικτύου είναι όπως είναι φυσικό ανάλογη με την πυκνότητα του πληθυσμού  $\rho$ .

Η ζήτηση της κίνησης για 1 km<sup>2</sup>, δίνεται από την παρακάτω σχέση όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία:

$$G(t) = \rho \frac{8}{N_{ph} * N_{md}} * \varphi(t) * D_k$$

- Ο όρος  $N_{ph}$  αντιστοιχεί τον αριθμό των ωρών της μέρας που ορίζονται ως ώρες αιχμής, δηλαδή τις ώρες όπου η κίνηση του δικτύου είναι μεγάλη (peak hour).
- Το  $N_{md}$  είναι ο αριθμός των ημερών σε ένα μήνα.
- Το  $\varphi(t)$  ορίζεται σαν το ποσοστό των ενεργών χρηστών κινητής τηλεφωνίας σε μια χρονική στιγμή. Το  $\varphi(t)$  είναι 100% σε ώρες αιχμής.
- Επίσης το  $D_k$  ορίζεται σαν ο μέσος όρος δεδομένων που χρειάζονται και αποτούνται από τους χρήστες στον εξεταζόμενο μήνα.

Με βάση τα στοιχεία που δίνονται από τις εταιρίες το  $N_{ph} = 9$  για ένα μήνα. Η μεγαλύτερη πυκνότητα πληθυσμού εμφανίζεται στην Αθήνα με  $\rho = 19.000$  κάτοικοι/Ο μέσος όρος δεδομένων που απαιτούνται από τους χρήστες τον μήνα είναι  $D_k = 100$  /μήνα/χρήστη.

Με βάση τα παραπάνω ο Πίνακας 3 δίνει συνοπτικά για τους ενεργούς χρήστες, τις ώρες αιχμής της Ελλάδας, τον όγκο δεδομένων που ανταλλάσσουν οι συνδρομητές σε μια κυψέλη.

**Πίνακας 3. Μηνιαία Ζήτηση, Χωρητικότητα, Ποσοστό χρήσης δεδομένων**

<b>Μηνιαία ζήτηση</b>	<b>Χωρητικότητα περιοχής [Gbps/km<sup>2</sup>]</b>	<b>Ποσοστό χρήσης δεδομένων [Mbps]</b>
100 Gb/χρήστη	49	6.37

Το επίπεδο ζήτησης δεδομένων είναι περίπου 6.37 Mbps.

Το αντίστοιχο κόστος και χωρητικότητα για τις διαφορετικές στρατηγικές (FBS/Wi-Fi, PBS, MaBS) ώστε να καλυφθούν τα 20 Gbps/km<sup>2</sup> συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 4. CAPEX χωρητικότητα για FBS και WIFI IEEE 802.11ac

FBS/Wi-Fi	Πλήθος τοποθεσιών		CAPEX (Μ€)		Χωρητικότητα (Gbps)	
	FBS	Wi-Fi	FBS	Wi-Fi	FBS	Wi-Fi
7 BS/όροφο	350	350	0.35	0.36	46.2	455
5 BS/όροφο	250	250	0.25	0.26	33	325
3 BS/όροφο	152	12	0.15	0.16	20.06	195
4 χρήστες/BS	2500	2500	2.50	2.62	330	3250
8 χρήστες/BS	1250	1250	1.25	1.31	165	1625
16 χρήστες/FBS	625	625	0.63	0.65	82.5	812.5
32 χρήστες/FBS	313	313	0.32	0.33	41.3	406.9
64 χρήστες/FBS	156	156	0.16	0.16	20.58	203.5

Πίνακας 5. Σενάρια

BS σενάρια	Πλήθος τοποθεσιών	Συνολικό CAPEX (Μ€)	Χωρητικότητα (Gbps)
Νέο 5G mmW PBS	5	0.095	20.70
Επαναχρησιμοποίηση MaBS LTE-A (0.8 & 2.6 GHz) με carrier aggregation	59	1.77	20.10
Νέο MaBS LTE-A (0.8 & 2.6 GHz) με carrier aggregation	59	7.08	20.10
Επαναχρησιμοποίηση MaBS LTE-A 0.8 GHz με wall loss compensation	175	3.5	20.15
Νέο MaBS LTE-A 0.8 GHz με wall loss compensation	175	17.5	20.09
Επαναχρησιμοποίηση MaBS LTE-A 5x2.6 GHz με wall loss compensation	89	1.76	20.21
Νέο MaBS LTE-A 5x2.6GHz με wall loss compensation	89	8.8	20.29

Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρείται ότι:

ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού νέων τοποθεσιών είναι πολύ δαπανηρή (175 - 17.5 M €). Όμως η επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων τοποθεσιών είναι μία λιγότερο δαπανηρή λύση, ακόμα και αν πολλές τοποθεσίες πρέπει να είναι εξοπλισμένες με νέα τεχνολογία RAT (175 - 3.5 M €).

T

ο

- ~~Ελεγχόμενη ανάπτυξη στο 4G/LTE~~ Η επεξεργασία των κερμάτων βάσεων παρενέργειες σταθερά με την ανάπτυξη του δικτύου. Η συνάθροιση φάσματος είναι η πιο οικονομικά αποδοτική σε σύγκριση με όλα τα σενάρια ανάπτυξης σταθμών βάσεων σε νέες τοποθεσίες.
- Επίσης η ανάπτυξη femto σταθμό βάσεων και Wi-Fi 802.11ac είναι ακόμα πιο οικονομική σε περίπτωση που οι femto σταθμοί βάσης (FBS) μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό χρηστών ( 64 χρήστες/FBS ή 3 FBS/όροφο).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σήμερα αρκετές μελέτες αναδεικνύουν στρατηγικές εξοικονόμησης κόστους με βάση την κοινή χρήση δικτύου, φάσματος, την περιαγωγή και την ανάπτυξη της τεχνολογίας femtocell, η οποία χρησιμοποιείται για την παροχή υψηλής ποιότητας κάλυψης δικτύου σε εσωτερικούς χώρους όπως το σπίτι ή το γραφείο. Διάφορες μελέτες περιπτώσεων έχουν βασιστεί σε ποικίλες στρατηγικές για να μπορέσουν να αναπτύξουν νέους τύπους υπηρεσιών και εσόδων.

Τα υπάρχοντα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους υλικού. Με την εισαγωγή κάθε νέας υπηρεσίας, είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί κατευθείαν νέος εξοπλισμός και να επαναδιαμορφωθεί το δίκτυο, γεγονός που αποτελεί μια χρονοβόρα και δαπανηρή διεργασία. Το Network Function Virtualization (NFV) εισήχθη ως τρόπος αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων.

Το NFV επιτρέπει σε διάφορους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου να εφαρμόζουν την πολιτική δικτύου χωρίς να λαμβάνουν μέριμνα για το πού να τοποθετούν τις λειτουργίες στο δίκτυο και πώς να δρομολογούν την κυκλοφορία μέσω αυτών των λειτουργιών.

Είναι ένας τρόπος εικονικοποίησης υπηρεσιών δικτύου, όπως δρομολογητές, τείχη προστασίας κ.α. που παραδοσιακά εκτελούνται σε υλικό υπολογιστή του οποίου η διεπαφή ελέγχεται από ιδιοκτήτη (ιδιόκτητο υλικό) και επιτρέπει στις υπηρεσίες δικτύου να φιλοξενούνται σε εικονικές μηχανές. Στα Virtual Machines (VM) υπάρχει ένας controller, ο οποίος διαχειρίζεται το κάθε VM, και έτσι πολλά διαφορετικά λειτουργικά συστήματα μπορούν να μοιράζονται το ίδιο hardware.

Το NVF παρέχει δίκτυα υψηλής απόδοσης που έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης, ελαστικότητα και προσαρμοστικότητα με χαμηλό κόστος σε σύγκριση με εκείνα τα δίκτυα που κατασκευάζονται από παραδοσιακό εξοπλισμό δικτύωσης. Επομένως, έρχεται να ξεπεράσει το μειονέκτημα του παραδοσιακού, προσαρμοσμένου σχεδιασμού εξοπλισμού δικτύου και μειώνει την ανάγκη για αποκλειστικό ή ιδιόκτητο υλικό για ανάπτυξη και διαχείριση δικτύων.

Σε ένα δίκτυο που βασίζεται σε SDN / NFV, οι εικονικές μηχανές κατανέμονται για τους παρόχους υπηρεσιών για την εξυπηρέτηση της κίνησης των πελατών και τελικά φέρνουν μείωση του κόστους αλλά και αύξηση των παρεχόμενων υπηρεσιών, καθώς και πολύ μεγάλη ευελιξία στο δίκτυο.

## **Μελλοντικές Προεκτάσεις**



Με βάση την παραπάνω μελέτη, τόσο από το κόστος όσο και από τα πλεονεκτήματα ως προς την ανάπτυξη και προσαρμοστικότητα των δικτύων είναι ξεκάθαρο γιατί τα NFV είναι τόσο δημοφιλή και φαίνεται ότι θα υπάρξει άμεση επέκτασή τους στο μέλλον. Καθώς ο κόσμος κινείται προς συνεχή ανάπτυξη των δικτύων και τελικά την πλήρη σύνδεση όλων των συσκευών, φαίνεται φυσικό ότι τα εργαλεία που παρέχει το NFV για βελτιστοποίηση δικτύου θα αποτελούν την βάση στο μέλλον.

Οι μελέτες που αφορούν τις θετικές οικονομικές επιπτώσεις στα δίκτυα φαίνεται να είναι κι αυτές απαραίτητες για να μπορεί κάθε πάροχος να εκτιμήσει το ποσοστό κέρδους του από την εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών. Είδαμε ότι τα NFV επιτρέπουν υψηλό βαθμό ευελιξίας και επεκτασιμότητας με βασικό πλεονέκτημα τη δυνατότητα ενημέρωσης και διαμόρφωσης του λογισμικού σύμφωνα με συνεχώς νέες απαιτήσεις που προκύπτουν, χωρίς την ανάγκη φυσικής αλλαγής εξοπλισμού σε διάφορα σημεία του δικτύου. Οικονομοτεχνικές μελέτες με πιο πλήρη δεδομένα για διαφορετικούς παρόχους και περιοχές μπορούν να δώσουν το κέρδος, καθώς εξελίσσονται οι δυνατότητες δικτύου, δηλαδή το όφελος σε δίκτυο που βασίζεται σε

Νέες μελέτες θα μπορούν να δώσουν αποτελέσματα κατά πόσο το NFV θα είναι σε θέση να τα υλοποιηθεί και να εξελιχθεί σε σχέση με ένα δίκτυο που βασίζεται σε υλικό. Μέτρα που μπορούν να εκτιμηθούν είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επέκταση των δικτύων στις δύο περιπτώσεις αλλά και άλλες τεχνικές, οι πόροι που απαιτούνται, το κόστος, η ανάγκη για μόνιμη συντήρηση κ.α.

Φαίνεται ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα γίνουν πιο περίπλοκα, ενώ περισσότερες εφαρμογές και υπηρεσίες θα συνδέονται συνεχώς σε αυτά. Η εικονικοποίηση της λειτουργίας των δικτύων προβλέπεται να αποτελέσει τελικά αναπόσπαστο μέρος των μελλοντικών δικτύων, επιτρέποντας τους να γίνουν πιο περίπλοκα, ασφαλή και ευέλικτα.

Παράλληλα προκύπτουν πλήθος ερωτήσεων και προκλήσεων σχετικά με την τεχνολογία NFV, καθώς και την 5G τεχνολογία που έχει ήδη εφαρμοστεί από τους

παρόχους τηλεπικοινωνιών.

Γίνεται έτσι σημαντικός και απαραίτητος ο εμπλουτισμός με νέες ιδέες και προτάσεις για την χρήση του NFV και τον τρόπο εφαρμογής του στο 5G. Με βάση τον όγκο της βιβλιογραφίας που τα τελευταία χρόνια παράγεται, φαίνεται ότι η επιστημονική κοινότητα ενδιαφέρεται άμεσα για την ανάπτυξη των τεχνολογιών NFV καθώς και γενικότερα της εικονοποίησης στα δίκτυα. Οι δεδομένες τεχνολογίες χαρακτηρίζονται ως σημαντικότερες και πρωτοπόρες, όσον αφορά την είσοδο τους σε διάφορες εφαρμογές που σχετίζονται με τα δίκτυα και την επέκτασή τους μελλοντικά.

Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη μια μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα, κάνοντας χρήση κάθε ιδιότητας που αναφέρθηκε και συμπληρώνοντας με νέες την υπάρχουσα. Είναι σημαντικό να μελετηθούν διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης, ώστε να εφαρμόσει την NFV με άλλες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές, να μελετηθεί η συμπεριφορά τους, να συγκριθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Σημαντική επίσης μελλοντική έρευνα μπορεί να αποτελέσει η εύρεση νέων μεθόδων για ακόμη την ελαχιστοποίηση ακόμα περισσότερο του κόστους. Η οικονομοτεχνική ανάλυση που εφαρμόστηκε έδειξε ότι η χρήση της τεχνολογίας NFV μπορεί να επιφέρει ιδιαίτερα μειωμένα κόστη τόσο για τους παρόχους των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, όσο και για τους ίδιους τους χρήστες. Μελλοντικές έρευνες, σχετικές με το κόστος ενός δικτύου με χρήση του NFV και άλλων τεχνολογιών με συνεχώς νέες υπηρεσίες προς τους χρήστες, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικά εργαλεία για τους παρόχους ανάλογα με την περιοχή και τον όγκο των χρηστών που εξυπηρετούν.

Επιπλέον, θα άξιζε να πραγματοποιηθεί μελλοντική έρευνα, σχετικά με τη δημιουργία αλλά και τη διαμόρφωση των υπάρχοντων δικτύων κάνοντας χρήση «πράσινων» τεχνικών ανάπτυξης. Όλο και περισσότερο στη σημερινή εποχή, γίνεται αναφορά για την αειφόρο ανάπτυξη. Θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να μελετηθούν τρόποι συνδυασμού των ανανεωσιμων πηγών ενέργειας και των νέων τεχνολογιών. Απαντήσεις στο ερώτημα «Με ποιούς τρόπους η τεχνολογία NFV θα μπορούσε να συμβάλει στην αειφόρο ανάπτυξη», θα είχαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και θα έδιναν λύσεις σε πλήθος προβλημάτων.

Επιπρόσθετα, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στον τομέα των δικτύων, κρίνεται πως είναι η ασφάλεια τους. Σαν μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε να σημειωθεί η εξασφάλιση της σε 5G δίκτυα που χαρακτηρίζονται από NFV. Θα μπορούσαν να μελετηθούν τα υπάρχοντα πρωτόκολλα, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις τους με σκοπό την ανταπόκριση τους σε ζητήματα ασφάλειας. Ακόμη θα ήταν δυνατή η δημιουργία των κατάλληλων προτύπων με κύριο στόχο την επιβολή πολιτικών που θα συμβάλουν στην απόκλειση ύποπτων χρηστών, περιπτώσεων hacking και υποκλοπής πληροφοριών.

Τέλος, γίνεται φανερό πως με την έλευση του 5G, η τεχνολογία NFV μπορεί να συμβάλει απεριόριστα σε ποικίλους τομείς και να δώσει λύσεις σε προβλήματα που αφορούν τόσο τους παρόχους του δικτύου όσο και τους χρήστες. Πέρα από τις παραπάνω προτάσεις – ιδέες για μελλοντική έρευνα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πολλές νέες ιδέες είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν από την επιστημονική κοινότητα. Η εικονοποίηση είναι μια πολύδιάστατη και ενδιαφέρουσα τεχνική, γεγονός που αποτελεί βάση για αρκετές νέες προσεγγίσεις.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[Ηλεκτρονικό]. Available:

Sapna Shukla, Varsha Khare, Shubhanshi Garg, Paramanand Sharma, «Comparative Study of 1G, 2G, 3G and 4G,» Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences (JEC&AS) , Volume 2, No.4, April 2013.

[Ηλεκτρονικό]. Available: , <https://www.samsung.com/in/support/mobile->

6. ekatom. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://atromg8.com/wp->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://blog.wei.com/6-benefits-of-wireless-networking->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.bmmagazine.co.uk/business/advantages->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rfwireless->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.brainbridge.be/news/from-1g-to-5g-a-brief->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://blog.xoxzo.com/en/2018/07/24/history-of-1g/>.

[Ηλεκτρονικό]. Available:

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/2G> .

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rantcell.com/comparison-of-2g-3g-4g-5g.html>

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.online-sciences.com/technology/2g->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/3G>.

<https://www.intraway.com/blog/a-concise-history-of-the-3g-technology/>.

[Ηλεκτρονικό].

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/4G>.

[Ηλεκτρονικό]. Available:

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gurubox.org/2019/11/30/what-are-the-mobile->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>.

Prabesh Paudel and Abhi Bhattarai, «5G Telecommunication Technology: History, Overview, Requirements and Use Case Scenario in Context of Nepal,» Kathmandu, Nepal, May 2018.

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://medium.com/swlh/5g-technology-and->

Takehiro NAKAMURA, Anass BENJEBBOUR, Yoshihisa KISHIYAMA, Satoshi SUYAMA, Tetsuro IMAI, «5G Radio Access: Requirements, Concept and Experimental Trials,» IEICE Transactions on Communications, August 01, 2015.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.techadvisor.co.uk/feature/small->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.huawei.com/en/news/2015/06/hw\\_443095](https://www.huawei.com/en/news/2015/06/hw_443095) .

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://economictimes.indiatimes.com/topic/5G->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vodafone.gr/>.

Christos Bouras, Paraskevi Fotakopoulou, Anastasia Kollia, «5G Networks: Advancement and Challenges,» Computer Technology Institute & Press "Diophantus", Patras, Greece, Computer Engineering & Informatics Dept., University of Patras.

[Ηλεκτρονικό]. Available:

[Ηλεκτρονικό]. Available:

[Ηλεκτρονικό]. Available:

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.wipro.com/engineeringNXT/cognitive-radio/>.  
Rishika Mehta, Jyoti Sahnib, Kavita Khannac, «Internet of Things: Vision, Applications and Challenges,» Procedia Computer Science, The Northcap University, Gurugram, 8 June 2018.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibm.com/cloud/learn/what-is-mobile-cloud->

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.etsi.org/technologies/nfv>.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://stlpartners.com/telcocloud/nfv-architectural->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available:

S. F. H. P. S. Rajendra Chayapathi, «Network Functions Virtualization (NFV) with a

Touch of SDN,» Addison-Wesley Professional, Nov 28, 2016.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.p7networks.com/network-function->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV-](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV-)

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.techplayon.com/network-function->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.networkworld.com/article/3253118/what-is->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.etsi.org/technologies/nfv?jij=1604908197816>.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://searchservervirtualization.techtarget.com/tip/How->

[

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.intraway.com/blog/nfv-benefits> .

Rajendra Chayapathi, Syed F. Hassan, Paresh Shah, The Journey to Network Functions Virtualization (NFV) Era, Network Functions Virtualization (NFV) with a Touch of SDN, Jan 25, 2017.

[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.optanix.com/pros-and-cons-of-network->

Shankar Lal, Tarik Taleb, and Ashutosh Dutta, «NFV: Security Threats and Best Practices,» IEEE Communications Magazine , 2017.