ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
"ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ"

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Cloud and Mobile Edge Computing Platforms for 5G Systems

Χαράλαμπος Χ. Παπαδόπουλος

Επιβλέπων: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Cloud and Edge Computing Platforms for 5G Systems

Χαράλαμπος Χ. Παπαδόπουλος
Α.Μ.: M1353

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής
Χατζηευθυμιάδης Ευστάθιος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Μάρτιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι κατασκευαστές προωθούν στην αγορά έξυπνες κινητές συσκευές οι οποίες δημιουργούν όλο και πιο απαιτητικούς χρήστες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται μια τάση αύξησης της κίνησης του όγκου των δεδομένων που μεταφέρονται εντός των δικτύων επικοινωνιών και σε συνδυασμό με το Δίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Thing) να υπάρχει μεγάλη συμφόρηση στο δίκτυο, να δημιουργούνται μεγάλες καθυστερήσεις πράγμα το οποίο είχε σημαντική επίπτωση στην τελική εμπειρία των χρηστών. Επομένως κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθεί μια νέα γενιά δικτύων επικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G) για να ικανοποιεί τις ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών έχοντας ως κύριο γνώμονα την επίτευξη της ελάχιστης δυνατής καθυστέρησης (latency) και της μέγιστης δυνατής ρυθμοαπόδοσης (throughput). Τα 5G δίκτυα θα μπορούν να κάνουν χρήση νέων τεχνολογιών όπως της Υπολογιστικής Νέφους (Cloud Computing) αξιοποιώντας την τεχνολογία της εικονικοποίησης δικτύου καθώς επίσης και μιας ακόμα πιο τελευταίας τεχνολογίας η οποία αποτελεί επέκταση της Υπολογιστικής Νέφους και ονομάζεται Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου (Mobile Edge Computing, MEC). Το Edge Computing δεν αντικαθιστά, αλλά συμπληρώνει το Cloud Computing, και έχει την ιδιότητα να είναι κοντά στους τελικούς χρήστες εξυπηρετώντας άμεσα και γρήγορα τα αιτήματά τους, αποσυμφορίζοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό την κίνηση στον πυρήνα του δικτύου ενώ αυξάνοντας παράλληλα την ποιότητα υπηρεσίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια ιστορική αναδρομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, στη συνέχεια γίνεται μια εκτενής περιγραφή των συστημάτων κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G) όπου και αναφέρονται αναλυτικά ποιοι είναι οι λόγοι που κάνουν επιτακτική την ανάγκη για την εξέλιξη στην πέμπτη γενιά κινητών δικτύων, ποια είναι η αρχιτεκτονική των 5G συστημάτων, ποιες είναι οι κυρίαρχες τεχνολογίες που θα βασιστούν και τέλος περιγράφονται συνοπτικά ορισμένα χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα που έχουν ως στόχο την πραγματοποίηση του οράματος των δικτύων πέμπτης γενιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της Υπολογιστικής Νέφους. Συγκεκριμένα δίνεται αρχικά ο ορισμός της Υπολογιστικής Νέφους, μια ιστορική αναδρομή της, παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά της, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τι είδους μοντέλα υπολογιστικού νέφους υπάρχουν σήμερα διαθέσιμα από τους γίγαντες της πληροφορικής, ποιες είναι οι κυρίαρχες πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους, αναλύονται θέματα ασφάλειας που προκύπτουν από την χρήση της τεχνολογίας του υπολογιστικού νέφους και τέλος περιγράφεται πως η χρήση του Υπολογιστικού Νέφους μπορεί να φανεί χρήσιμη στα συστήματα πέμπτης γενιάς.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή της τεχνολογίας της Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου αναλύοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της, την αρχιτεκτονική της, τα πλεονεκτήματα της, πως η MEC μπορεί να χρησιμεύσει στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου περιγράφεται η γενικευμένη μορφή της MEC όπου ο ορισμός των άκρων διευρύνεται και οδηγεί στην Υπολογιστική Ομίχλης (Fog Computing), παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και η αρχιτεκτονική της Υπολογιστικής Ομίχλης στα δίκτυα πέμπτης γενιάς καθώς επίσης και ορισμένα θέματα ασφαλείας.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο κόσμος του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT), η αρχιτεκτονική του IoT, τα μοντέλα επικοινωνίας που υπάρχουν, ποια πλατφόρμα είναι η πιο ιδανική από τις προαναφερθείσες για να μπορεί

να υποστηρίξει γρήγορα και αποδοτικά αυτόν τον τεράστιο IoT κόσμο, τι δυνατότητες και ποια τα χαρακτηριστικά του, και τέλος το παρουσιάζονται οι εφαρμογές που υποστηρίζει το IoT.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα κινητών επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς, 5G, Υπολογιστική Νέφους, Κινητή Υπολογιστική στις Άκρες του Δικτύου, Υπολογιστική Ομίχλης, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, IoT

ABSTRACT

Nowadays the technology is evolving rapidly, many manufacturers are launching smart mobile devices on the market which are creating increasingly demanding users. This results in a trend of increasing the volume of data traffic transferred in the communication networks and in conjunction with the Internet of Thing, a heavy congestion is created on the network, which creates long delays and finally has significant impact on users' experience. Therefore, it is necessary to develop a new generation of communications networks, fifth generation (5G), to meet the increasing users need, having as their main objective the achievement of the minimum latency and the maximum throughput. 5G networks will be able to use new technologies such as Cloud computing, using network virtualization technology as well as an even more state-of-the-art technology which is an extension of the Cloud Computing and is called Mobile Edge Computing (MEC). Edge Computing does not replace, but complements the Cloud Computing and has the feature to be close to end users in order to serve their requests quickly, and to reduce the traffic to the core of the network while the quality of service is increased.

This diploma thesis contains four chapters. In the first chapter there is a historical overview of mobile communication networks, followed by an extensive description of the fifth generation mobile communications systems (5G) where is described in detail the evolution reasons of fifth generation of mobile networks, the architecture of 5G systems is described, the dominant technologies that 5G systems will be based on and finally is described some funded research projects that aim to realize the phantom of fifth-generation networks.

In the second chapter is presented a detailed description of Cloud Computing. More specific, primarily the Cloud Computing is defined, its historical overview is presented, its basic features, its advantages and disadvantages are described, the available cloud computing models which are available today is presented, the dominant cloud computing platforms, some security issues resulting from the use of cloud computing technology is mentioned and how Cloud Computing can be used in 5G systems.

In the third chapter there is an extensive description of Mobile Edge Computing technology having analyzed its basic features, its architecture, its advantages and how MEC can be used in 5G systems. Moreover, in this chapter is described a generalized form of MEC which is called Fog Computing and also are presented its basic features, its architecture for 5G systems and some security issues.

Finally, in the fourth chapter is described the Internet of Things (IoT) world, the IoT architecture, all the existing communication models of IoT, and which of the referred platforms can be applied properly in the IoT world is mentioned. Also, is described the IoT properties and features and the number of applications that IoT supports.

SUBJECT AREA: Mobile communications Networks

KEYWORDS: Five Generation Communication Systems, 5G, Cloud Computing, Mobile Edge Computing, Fog Computing, Internet of Things, IoT

Στην οικογένειά μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδίας τον καθηγητή κ. Λάζαρο Μεράκο για την εμπιστοσύνη του προς σε εμένα για το συγκεκριμένο θέμα της εργασίας, καθώς επίσης και για τις πολύ χρήσιμες γνώσεις που μου μετέδωσε καθόλη τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Επίσης, πολλές ευχαριστίες οφείλω στον Διδάκτωρ Διονύση Ξενάκη για την άριστη συνεργασία και καθοδήγησή του, τις πολύτιμες συμβουλές του που ήταν καθοριστικές στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών στα Προηγμένα Πληροφοριακά Συστήματα

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 5ης ΓΕΝΙΑΣ (5G)

1.1 Ιστορική Αναδρομή Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

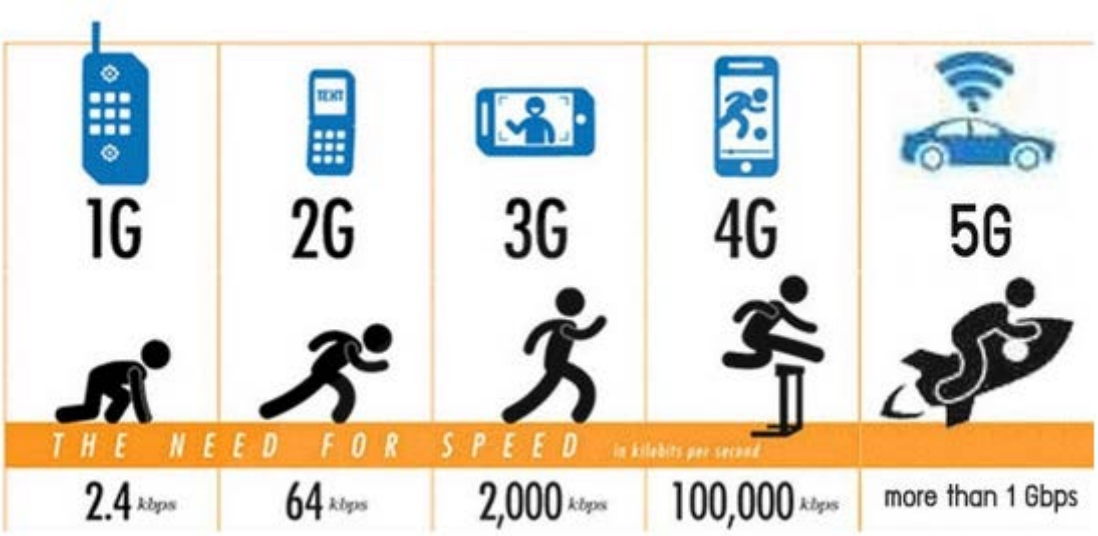
Με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας το πλήθος δικτυακών συσκευών που έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο χρόνο με τον χρόνο αυξάνεται με πολύ μεγάλους ρυθμούς πράγμα το οποίο καθιστά αναγκαίο την επέκταση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι δικτυακές διευθύνσεις που υπάρχουν στο πρωτόκολλο IPv4 έχουν αρχίσει σιγά σιγά να εξαντλούνται και γι' αυτό στα σύγχρονα δίκτυα θα επικρατήσει το πρωτόκολλο IPv6 ως λύση του παραπάνω προβλήματος. Επίσης, οι κινητές επικοινωνίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την καθημερινότητα του κάθε ανθρώπου γι' αυτό και ο ρυθμός εξέλιξής τους είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν του παρελθόντος. Αρχικά η ανάπτυξή τους πραγματοποιήθηκε σε στενά εθνικά πλαίσια, όμως με την πάροδο του χρόνου και λαμβάνοντας μέρος διεθνής οργανισμοί, όπως το 3GPP (3rd Generation Partnership Project), η ανάπτυξή τους πραγματοποιήθηκε σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η πρώτη γενιά (1G) κυψελωτών δικτύων προέρχεται από τις αρχές του 1980 και έχει αναλογική βάση. Υποστήριζε φωνητική επικοινωνία και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά δεδομένων μέσω modem [1]. Τα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) εμφανίστηκαν περίπου μετά από 10 χρόνια με τη χρήση των ψηφιακών δικτύων. Τα δίκτυα 2G παρέχουν καλύτερη ποιότητα φωνής, μπορούν να υποστηρίξουν υπηρεσίες δεδομένων όπως μηνύματα και έχουν την δυνατότητα της παγκόσμιας περιαγωγής. Τα δίκτυα 2G μπορούν να υποστηρίξουν μετάδοση δεδομένων από 9,6 έως 14,4 Kbps, πράγμα που σημαίνει ότι αυτή η ταχύτητα μετάδοσης είναι αρκετά αργή για χρήση Internet.

Τα κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) βασίζονται στην τεχνολογία μεταγωγής πακέτων όπου μπορούν να φτάσουν σε ταχύτητες 22 Mbps για uplink και σε 168 Mbps για downlink. Οι υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης επιτρέπουν την μεταφορά video, γραφικών και άλλων μέσων ενημέρωσης. Αυτό καθιστά κατάλληλα τα 3G δίκτυα για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο και τη μετάδοση των δεδομένων.

Σήμερα έχουμε μεταβεί στα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G). Τα 4G δίκτυα έκαναν την εμφάνισής τους το 2011 και σχεδιάστηκαν με κύριο στόχο να καλύψουν τις απαιτήσεις των πολυμεσικών εφαρμογών βασισμένων στο Internet οι οποίες απαιτούν μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης για μεγάλο όγκο δεδομένων με μικρή καθυστέρηση. Έτσι τα 4G δίκτυα χρησιμοποιούν IP σε όλες τις υπηρεσίες, σε συνδυασμό με την χρήση τεχνικών πολυπλεξίας όπως ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (ODFM), τεχνολογία πολλαπλής εισόδου και εξόδου (MIMO). Τα 4G δίκτυα προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης από 100Mb/s μέχρι 1Gb/s, μικρότερη καθυστέρηση στις διαδραστικές εφαρμογές, πλήρη αξιοποίηση του δοθέντος φάσματος, εξυπηρέτηση των χρηστών ανεξαρτήτως ώρα αιχμής χωρίς να υπάρχει υποβάθμιση των υπηρεσιών που προσφέρουν (QoS), επαρκής εξυπηρέτηση χρηστών που βρίσκονται εν κινήσει ακόμα και με μεγάλες ταχύτητες.

Είναι πιθανό η νέα γενιά των προτύπων 5G να εισαχθεί στις αρχές της δεκαετίας του 2020. Επομένως, θα γίνει μια μικρή αναφορά στις προηγούμενες γενιές πριν παρουσιαστεί στη συνέχεια η 5η γενιά (5G).



Εικόνα 1. Η εξέλιξη των κινητών δικτύων

1.1.1 Δίκτυα 1ης Γενιάς (1G)

Τα συστήματα πρώτης γενιάς (1G) βασίζονται στην αναλογική τεχνολογία και χρησιμοποιούνται τα παρακάτω:

- FM (διαμόρφωση συχνότητας)
- FDD (συχνοδιαιρετική αμφίδρομη επικοινωνία)
- FDMA (πολυπλεξία στη συχνότητα)

Τα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς έκαναν χρήση των κοινών καναλιών σήματος και η μετάδοση των δεδομένων μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού χρήστη δεν ήταν επαρκής και σε συνδυασμό με το χαμηλό ποσοστό μετάδοσης δεδομένων, δημιουργήθηκε η ανάγκη για κυψελωτά συστήματα επόμενης γενιάς. Επιπλέον, στα συστήματα πρώτης γενιάς, επειδή είναι βασισμένα σε αναλογικά συστήματα, η μετάδοση δεν είναι ασφαλής, σε αντίθεση με τα συστήματα δεύτερης γενιάς που είναι ασφαλής η μετάδοσή των δεδομένων εξαιτίας της χρήστης της ψηφιακής διαμόρφωσης.

1.1.2 Δίκτυα 2ης Γενιάς (2G)

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) είναι η μετεξέλιξη των συστημάτων πρώτης γενιάς (1G) και παρέχει επικοινωνία δεδομένων υψηλών ταχυτήτων καθώς και μετάδοση φωνής. Η αναλογική τεχνολογία της πρώτης γενιάς λόγω των αναλογικών σημάτων ομιλίας, τον χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την ανεπαρκή διαβίβαση των δεδομένων, αντικαθίσταται από την ψηφιακή τεχνολογία σε ασύρματα συστήματα 2G. Στη δεύτερη γενιά, αντί της τεχνικής FM, χρησιμοποιούνται τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης. Οι τεχνικές πρόσβασης που χρησιμοποιούνται είναι:

- TDMA (Time Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)

Έτσι με την χρήση των παραπάνω τεχνολογιών, η χωρητικότητα των συστημάτων δεύτερης γενιάς είναι τρεις φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς και λόγω της αύξησης στο φάσμα η 2η γενιά είναι τρεις φορές ποιο αποδοτική σε σύγκριση με τα αναλογικά συστήματα 1ης γενιάς. Τα πρότυπα στην

2G τεχνολογία είναι τα εξής: GSM, IS-136, PDC, IS-95 και περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

1.1.2.1 GSM (Global System For Mobile)

Το 1982 ξεκίνησε η μελέτη για την δημιουργία ενός κοινού Ευρωπαϊκού ψηφιακού συστήματος δεύτερης γενιάς (2G) από το Ευρωπαϊκό Τηλεπικοινωνιακό Συμβούλιο (European Telecommunications Standards Institute). Το σύστημα αυτό ονομάστηκε GSM (Group Special Mobile) και είναι ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά σήματα και την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων σε ένα αριθμό καναλιών και την διαίρεση αυτών σε χρονοθυρίδες για την μετάδοση σημάτων.

Το 1989 η ευθύνη του GSM ανατέθηκε στο Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) και το ίδιο το πρότυπο και τα χαρακτηριστικά του GSM ανακοινώθηκαν επίσημα για πρώτη φορά το 1990. Το 1991 άρχισε η εμπορική διάθεσή του GSM στην Ευρώπη, ενώ το 1993 το σύστημα αυτό πρώτο χρησιμοποιήθηκε στην Ελλάδα.

Το GSM διαθέτει υπηρεσίες όπως κλήση, λήψη κλήσεων, αποστολή και λήψη SMS, αποστολή και λήψη MMS, εκτροπή κλήσεων, φραγή κλήσεων, απόκρυψη κλήσεων, αναμονή και κράτηση κλήσεων και τηλεδιάσκεψη. Το GSM επιτρέπει μέχρι και 8 χρήστες για κάθε κανάλι 200KHz. Η συχνότητα ανοδικής ζεύξης που υποστηρίζει (από το σταθμό βάσης στο κινητό σταθμό) είναι 890-915MHz και η συχνότητα καθοδικής ζεύξης (από το κινητό σταθμό προς το σταθμό βάσης) είναι 935-960MHz. Το εύρος ζώνης (bandwidth) του GSM είναι 25MHz και κάνει χρήση του TDMA μαζί με την FDD.

Τέλος, το GSM περιλαμβάνει διάφορα είδη τηλεϋπηρεσιών όπως κλήση έκτακτης ανάγκης, φαξ, videotext, teletext και υπηρεσίες δεδομένων όπως επικοινωνία υπολογιστή με υπολογιστή και μεταγωγή πακέτων. Ακόμα η κάρτα SIM είναι ένα από τα ποιο γνωστά χαρακτηριστικά του GSM η οποία χαρακτηρίζει μοναδικά κάθε συνδρομητή.

1.1.2.2 IS-136 (Interim Standard 136)

Το IS-136 είναι γνωστό και ως NADC (North American dual mode cellular), υποστηρίζει 3 χρήστες για κάθε κανάλι 30KHz και χρησιμοποιεί επίσης ως τεχνική την TDMA με την FDD. Η εμπρόσθια συχνότητα του καναλιού είναι 1850-1910MHz και η αντίστροφη είναι 1930-1990MHz. Το εύρος ζώνης καναλιού είναι 60MHz και ο ρυθμός δεδομένων του διαύλου είναι 46.6kbps.

1.1.2.3 PDC (Pacific Digital Cellular)

Το PDC πρότυπο είναι παρόμοιο με το IS-136 και χρησιμοποιεί ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης την TDMA με την FDD. Σε αντίθεση με το IS-136, ο ρυθμός δεδομένων του διαύλου είναι 42kbps και ο διαχωρισμός του φέροντος σήματος είναι 25KHz.

1.1.2.4 IS-95 (Interim Standard 95)

Το πρότυπο IS-95 είναι γνωστό και ως cdmaOne και χρησιμοποιεί CDNA με FDD. Η εμπρόσθια συχνότητα καναλιού είναι 824-849MHz και η αντίστροφη είναι 869-894MHz

ενώ υποστηρίζει συνολικά 64 κανάλια φωνής ανά φέρον σήμα τα οποία είναι ορθογώνια κωδικοποιημένα.

Μπορεί οι τα συστήματα 2ης γενιάς (2G) να παρέχουν αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων φωνής, όμως οι εφαρμογές περιήγησης στο διαδίκτυο παραμένουν σε πολύ χαμηλές ταχύτητες και επομένως δεν επαρκούν για ταχεία μετάδοση email. Έτσι για να λυθεί το παραπάνω πρόβλημα το πρότυπο 2G τροποποιήθηκε σε ένα νέο πρότυπο το 2.5G, το οποίο αναπτύχθηκε με την προς τα πίσω συμβατότητα με το πρότυπο 2G. Η τεχνολογία 2.5G εξελίχθηκε από τα πρότυπα GSM, PDC, IS-136 και IS-95 που χρησιμοποιεί η τεχνολογία 2G και επίσης οι 2.5G τεχνολογίες χρησιμοποιούν WAP (Wireless Application Protocols) όπου οι ιστοσελίδες προβάλλονται στους χρήστες σε συμπιεσμένη μορφή.

Το πρότυπο 2.5G IS-95B εξελίχθηκε από το cdmaOne σε 2G το οποίο χρησιμοποιεί κανάλι εύρους ζώνης (bandwidth) 1,25MHz. Εξέλιξη του προτύπου GSM αποτελεί το HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) το οποίο επιτρέπει την χρήση διαδοχικών χρονοθυρίδων (time slots) από μεμονωμένους χρήστες επιτρέποντας την πρόσβαση σε υψηλότερες ταχύτητες λήψης δεδομένων στα GSM δίκτυα. Το εύρος ζώνης καναλιού που χρησιμοποιεί το HSCSD φτάνει τα 200KHz και παρέχει ρυθμό μετάδοσης έως και 57,6kbps.

Το GPRS παρέχει ένα πακέτο δεδομένων για χρήση μη πραγματικού χρόνου του διαδικτύου, του φαξ, του email καθώς και την περιήγηση όπου η ταχύτητα λήψης (downloading) είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα μεταφόρτωσης (uploading). Επίσης το GPRS περιλαμβάνει χαρακτηριστικά από τα GSM, IS-136 και PDC.

Το GSM Evolution είναι το προηγμένο πρότυπο του GSM και βασίζεται στα κοινά χαρακτηριστικά του GSM και του IS-136 προσφέροντας αυξημένο ρυθμό δεδομένων. Επίσης το GSM Evolution αναφέρεται και ως enhanced GPRS.

1.1.3 Δίκτυα 3ης Γενιάς (3G)

Το 2001 έκανε την εμφάνισή της η τρίτη γενιά (3G) που αποτελείται από ένα σύνολο προτύπων βάση των προδιαγραφών των Διεθνών Κινητών Τηλεπικοινωνιών (International Mobile Telecommunications) IMT – 2000. Τα δίκτυα 3ης γενιάς παρέχουν ταχύτητες δεδομένων τουλάχιστον 200kbps και συνδυάζουν την ασύρματη τηλεφωνία, την κινητή αλλά και τη σταθερή πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Στη συνέχεια τα δίκτυα τρίτης γενιάς εξελίσσονται προσφέροντας ακόμα γρηγορότερες και ταχύτερες υπηρεσίες και γι’ αυτό συμβολίζονται ως 3.5G και 3.75G. Ακόμα παρέχεται κινητή ευρυζωνική πρόσβαση πολλών Mbps σε smartphones και σε modems για φορητούς υπολογιστές. Η πρώτη έκδοση του 3GPP Long Term Evolution (LTE) προτύπου παρείχε πολύ γρήγορες ταχύτητες αλλά δεν πληρούσε απολύτως τις απαιτήσεις της ITU 4G γι’ αυτό και ονομάστηκε IMT – Advanced ή όπως αλλιώς συμβολίζεται ως 3.9G. Η εξέλιξη του LTE – Advanced είναι μια τεχνολογία 4G καθώς επίσης η τεχνολογία WiMAX που πλησιάζει την 4G τεχνολογία όπως την γνωρίζουμε σήμερα.

Το πρότυπο 3G έγινε ευρέως γνωστό εξαιτίας της μεγάλης επέκτασης της κινητής τηλεφωνίας σε συνδυασμό με την μεγάλη εξέλιξη των έξυπνων κινητών (smartphones) που δημιούργησαν μεγάλη ζήτηση για κινητή συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο. Η ταχύτητα του 3G δικτύου επειδή το καθιστά βιώσιμη λύση τόσο για την περιήγηση όσο και για την ευελιξία, γιατί το ελάχιστο ποσοστό δεδομένων για σταθερή χρήση είναι τα 2Mbps ενώ σε κινούμενο όχημα είναι τα 384kbps, εισήγαγε τον όρο Κινητές Ευρυζωνικές Υπηρεσίες.

Τα 3G συστήματα είναι ασφαλέστερα σε σύγκριση με τους προκατόχους τους και συνδυάζοντας το εύρος ζώνης, τις ταχύτητες που προσφέρουν, τις πληροφορίες για την θέση που παρέχουν, δημιουργούν εφαρμογές που πριν δεν ήταν διαθέσιμες στους χρήστες όπως: Video on demand, Video Conferencing, Mobile TV, Location-based service, Global Positioning System (GPS), Τηλεϊατρική.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία τα ποιο σημαντικά 3G συστήματα ως ακολούθως.

1.1.3.1 UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)

Το UMTS εμφανίστηκε το 2001, έχει τυποποιηθεί από το 3GPP και βασίστηκε στην υποδομή του συστήματος GSM 2G. Σήμερα χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και στην Κίνα. Η ποιο διαδεδομένη διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων ονομάζεται W-CDMA ενώ η διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων TD-SCDMA εμφανίστηκε στην αγορά το 2009 και προσφέρεται μόνο στην Κίνα.

Το HSPA+ αποτελεί την τελευταία έκδοση του UMTS και ως μέγιστη ταχύτητα δεδομένων στην κάθοδο (downlink) φτάνει έως 56Mbps και στην άνοδο (uplink) έως 22Mbps.

1.1.3.2 CDMA2000

Το CDMA2000 εμφανίστηκε το 2002, έχει τυποποιηθεί από το το 3GPP2 και βασίστηκε στην υποδομή του συστήματος IS-95 2G. Σήμερα χρησιμοποιείται στην Βόρεια Αμερική και τη Νότια Κορέα.

Το EVDO (Enhanced Voice-Data Optimized) Rev B είναι η τελευταία έκδοση του CDMA2000 και ως μέγιστη ταχύτητα φτάνει τα 14,7Mbps.

1.1.4 Δίκτυα 4ης Γενιάς (4G)

Τα δίκτυα 4ης γενιάς αναπτύχθηκαν με σκοπό να βελτιώσουν την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που αντιλαμβάνονται οι τελικοί χρήστες και για να βάλουν τα θεμέλια για ποιο εξελιγμένες και ευαίσθητες χρόνου εφαρμογές όπως: Video chat, Digital Video Broadcasting, Mobile TV, MMS και πολλές άλλες.

Ο πρώτος και κύριος στόχος που ικανοποιήθηκε από το πρότυπο του 4G είναι να αναπτυχθεί ένα δίκτυο το οποίο να είναι ποιο αποδοτικό σε σύγκριση με το 3G και η χωρητικότητα του συστήματος να είναι τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή του 3G. Στη συνέχεια δόθηκε αρκετή έμφαση στους υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Συγκεκριμένα η ταχύτητα για download φτάνει το 1Gbps και η ταχύτητα για upload φτάνει τα 500Mbps. Στην περίπτωση των κινούμενων οχημάτων, η ελάχιστη ταχύτητα φτάνει τα 100Mbps. Επομένως υπάρχει ένα κάτω όριο στους ρυθμούς μετάδοσης που είναι τουλάχιστον 100Mbps.

Επίσης στα δίκτυα 4G, έχει πραγματοποιηθεί καλύτερη κάλυψη δικτύου σε σύγκριση με τα 3G δίκτυα, πράγμα το οποίο βοηθάει στις ταχύτητες μετάδοσης. Δηλαδή καθώς οι ταχύτητες μετάδοσης αυξάνονται, αυξάνεται αναλογικά και το απαιτούμενο σήμα που λαμβάνουμε. Μέσω των 4G συστημάτων, μας δίνεται η δυνατότητα να συνδεόμαστε ομαλά σε άλλα δίκτυα όπως ασύρματα δίκτυα υπολογιστών (WLAN), σταθερά δίκτυα, σε συστήματα τρίτης γενιάς (3G). Γενικά είναι σημαντική η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και η δυνατότητα περιαγωγής σε πολλαπλά δίκτυα.

Για να πάρουν τα 4G δίκτυα τόσο μεγάλη άνθηση, βοήθησε σημαντικά το μικρότερο κόστος ανά δυαδικό ψηφίο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί η χρέωση και έτσι η χρήση του διαδικτύου σε κινητές συσκευές να πάρει ραγδαία αύξηση.

Μερικές από τις ποιο σημαντικές υπηρεσίες στα δίκτυα τέταρτης γενιάς που ξεχώρισαν είναι οι παρακάτω:

- Κινητά δίκτυα υπολογιστών: Τα κινητά δίκτυα υπολογιστών διευκολύνουν τις εξ' αποστάσεως οικονομικές συναλλαγές και τις επιχειρηματικές πράξεις.
- Εκπαίδευση μέσω Internet: Η εκπαίδευση μέσω Internet δίνει την δυνατότητα στους ανθρώπους κάθε ηλικίας από όλο τον κόσμο να παρακολουθούν μαθήματα σε διαδικτυακούς ιστοτόπους με πολύ χαμηλό κόστος.
- Εικονική περιήγηση: Η εικονική περιήγηση δίνει την δυνατότητα στους ανθρώπους να πλοηγούνται σε γραφικές αναπαραστάσεις δρόμων, κτιρίων από μια βάση δεδομένων. Η εφαρμογή αυτή κάνοντας χρήση της βάσης δεδομένων έχει την δυνατότητα να επιλέγει δρόμους με μικρότερη κίνηση, να εντοπίζει αξιοθέατα, μουσεία, εστιατόρια, ATM και να προβλέπει την μελλοντική διαδρομή που μπορεί ο χρήστης να ακολουθήσει.
- Τηλεϊατρική: Η τηλεϊατρική είναι μια υπηρεσία που δίνει την δυνατότητα σε πληρώματα ασθενοφόρων να έχουν πρόσβαση από απομακρυσμένες περιοχές σε ιατρικά αρχεία και να κάνουν τηλεδιασκέψεις με τους γιατρούς. Επιπλέον μπορούν τα πληρώματα ασθενοφόρων να μεταδίδουν την κατάσταση ενός ασθενή μέσα σε κεντρικά νοσοκομεία για να λαμβάνουν ανατροφοδότηση από αυτά για την εφαρμογή κάποιας θεραπείας σε κάποιο ασθενή.

1.1.5 Κίνητρα Ανάπτυξης Δικτύων 5ης Γενιάς

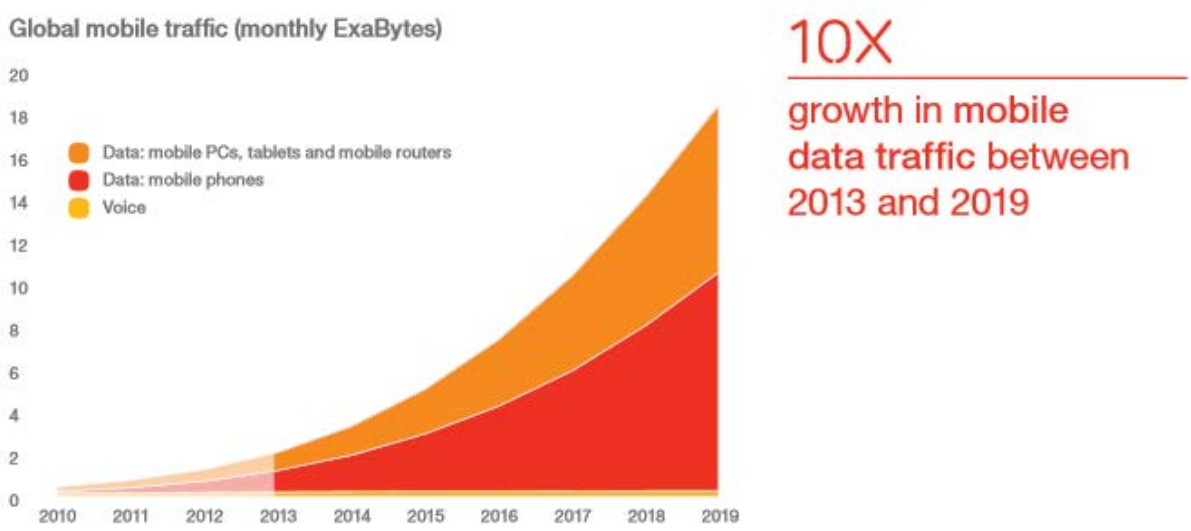
Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι κατασκευαστές κινητών συσκευών αναπτύσσουν όλο και ποιο δυνατές συσκευές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι χρήστες που τις αγοράζουν να έχουν απαιτήσεις για περισσότερες και ποιο ανεπτυγμένες υπηρεσίες με νέες πολυμεσικές εφαρμογές έχοντας παράλληλα αυστηρές απαιτήσεις στους ρυθμούς μετάδοσης μεγάλων όγκων δεδομένων με ελάχιστη έως και μηδενική ανεκτικότητα στις καθυστερήσεις. Ακολουθώντας αυτήν την ραγδαία εξέλιξη, στο μέλλον τα smartphones και τα tablets θα καταλάβουν το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς των κινητών συσκευών [2]. Αυτό γιατί προσφέρουν μια βελτιωμένη εμπειρία χρήση που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την μεγαλύτερη κίνηση δεδομένων ανά συνδρομητή. Το τρίπτυχο της λειτουργίας αυτών των συσκευών είναι τα εξής:

- Modem: Το modem είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία της συσκευής με τον σταθμό βάσης (access point). Σήμερα ο ρυθμός κατεβάσματος (downlink) σε συσκευές HSPA έχει βελτιωθεί από 3,6 Mbps έως 42 Mbps και σε συσκευές LTE από 100 Mbps έως 150 Mbps. Στο μέλλον οι συσκευές LTE Advanced αναμένεται να αγγίζουν τα 300 Mbps.
- Επεξεργαστής: Ο επεξεργαστής της συσκευής τρέχει το λειτουργικό σύστημα και τις εφαρμογές της συσκευής smartphone. Όσο αυξάνονται οι επιδόσεις της συσκευής τόσο αυξάνεται και η αρχιτεκτονική πολυπλοκότητα των πυρήνων του επεξεργαστή. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στην χωρητικότητα του δικτύου επηρεάζοντας τη διαστασιολόγηση του για να φέρει εις πέρας τις νέες απαιτήσεις που δημιουργούνται.

- Οθόνη συσκευής: Η οθόνη της έξυπνης συσκευής είναι ίσως το σημαντικότερο από όλα γιατί αφορά αφ' ενός την διεπαφή χρήστη και αφ' ετέρου είναι το μέσο για την προβολή του περιεχομένου της συσκευής. Επομένως όσο μεγαλύτερη είναι η οθόνη της συσκευής (περισσότερα pixels) τόσο περισσότερα δεδομένα και επομένως κίνηση παράγει ο χρήστης.

Επομένως μεγαλύτερες οθόνες συσκευών, με μεγαλύτερη ευκρίνεια, με καλύτερες αναλύσεις στις κάμερες των κινητών αυξάνουν τις πωλήσεις σε smartphones και tablets και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνουν την παραγόμενη κίνηση στο διαδίκτυο εξαιτίας του video streaming. Για παράδειγμα δίνεται η δυνατότητα στα σημερινά smartphones να ρυθμίσουν την ποιότητα λήψης video έως και ανάλυση 4K (ultra high definition). Ένα τέτοιο video μπορεί να μεταδοθεί με ρυθμούς μετάδοσης 10-15 Mbps μέσω δικτύου, όμως με την μορφή του υπάρχοντος δικτύου σήμερα είναι πολύ δύσκολο ένας χρήστης αν απολαύσει αυτό το υψηλής ευκρίνειας video.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ότι το video είναι μεγαλύτερο και το ταχέως αναπτυσσόμενο τμήμα κίνησης δεδομένων από τις κινητές συσκευές. Μέχρι το 2019 αναμένεται να αυξηθεί περίπου 13 φορές. Ακόμα αντιπροσωπεύει σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% της συνολικής κίνησης δεδομένων στην κινητή τηλεφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 2. Μελλοντική κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας

Το ποσοστό της κοινωνικής δικτύωσης αποτελεί περισσότερο από το 10% στις μέρες μας και αναμένεται να αυξηθεί 10 φορές στο διάστημα 2013 έως 2019.

Η κίνηση από δεδομένα ήχου (audio streaming) αναμένεται μέχρι το 2019 να αυξηθεί κατά 8 φορές. Σημαντικός παράγοντας στην διατήρηση αυτού του επιπέδου αποτελεί το caching περιεχομένου και η δυνατότητα αναπαραγωγής λιστών παραγωγής εκτός σύνδεσης.

Οι μέχρι τώρα προβλέψεις δείχνουν ότι σε παγκόσμιο επίπεδο αναμένεται αύξηση της κίνησης των δεδομένων στο 45% μέχρι και το 2019 πράγμα το οποίο σημαίνει ότι θα αυξηθεί η κίνηση των δεδομένων κατά 10 φορές. Ενώ κάτι αντίστοιχο δεν προβλέπεται για την κίνηση από φωνητικές συνδιαλέξεις. Αυτό γιατί οι φωνητικές συνδιαλέξεις όπως επίσης και τα SMS δεν είναι οι κυρίαρχες υπηρεσίες ειδικά για τους χρήστες smartphones γιατί σε καθημερινή χρήση οι υπηρεσίες τους βασίζονται σε κίνηση δεδομένων.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι οι πάροχοι βρίσκονται αντιμέτωποι με μια διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για κίνηση δεδομένων μέσω των δικτύων τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ωθούνται στην αύξηση των επιδόσεών τους με αντικειμενικό σκοπό τους καλύτερους ρυθμούς δεδομένων.

1.1.6 Δίκτυα 5ης Γενιάς (5G)

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) θα έρθουν για να άρουν τους περιορισμούς και τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι χρήστες των smartphones και tablets χρησιμοποιώντας εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις. Δυστυχώς, μια ακόμα εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι αναγκαία και αναπόφευκτη [3] αλλά αναμένεται όμως τα 5G δίκτυα να επικρατήσουν στο μέλλον. Τα 5G δίκτυα θα έχουν πολλές νέες δυνατότητες όπως τη δημιουργία νέων αγορών, έξυπνων πόλεων, συστήματα e-health, συστήματα ευφυών μεταφορών, εκπαίδευσης, ψυχαγωγίας και μέσων ενημέρωσης.

Επίσης η χωρητικότητα (capacity) των ασύρματων δικτύων τετραπλασιάζεται εξυπηρετώντας το δίκτυο τέσσερεις φορές περισσότερα άτομα ταυτόχρονα, δηλαδή πάνω από 7 δις. συσκευές. Η τεχνολογία 5G θα αλλάξει τα δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών που αποτελούνται από κυψέλες και θα βρίσκονται τα δίκτυα 5G σε μια σειρά διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων έχοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης. Το δίκτυο θα διαμορφώνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις δεδομένων της κάθε συσκευής.

Μελλοντικά θα κατασκευαστούν συσκευές οι οποίες θα έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν κατευθείαν με άλλες συσκευές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αισθητήρες οι οποίοι θα στέλνουν δεδομένα σε κάποιο εξυπηρετητή (server) απευθείας και όχι με χρήση κυψελών όπως γίνεται σήμερα. Άλλο παράδειγμα είναι ένα δίκτυο αισθητήρων με χιλιάδες συσκευές μετάδοσης δεδομένων θερμοκρασίας. Η μετάδοση τους θα είναι ευκολότερη αν τα δεδομένα στέλνονται χωρίς να παρεμβάλλεται ο σταθμός βάσης, το οποίο θα μπορεί να συμβεί με χρήση της νέας τεχνολογίας.

Ένα ακόμα σημαντικό επίτευγμα θα είναι η τεχνολογία MIMO (Multiple-in-Multiple-out). Συγκεκριμένα, οι σταθμοί βάσης θα εξοπλιστούν με πολλαπλές κεραίες που θα μεταδίδουν πολλαπλά σήματα ταυτόχρονα ενώ με μια τέτοια κεραία μπορεί να εξοπλίζεται μια συσκευή. Έτσι αντί τα σήματα να δρομολογούνται από τους σταθμούς βάσης, θα μπορούν να δρομολογούνται και από τις ίδιες τις συσκευές. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει στην αποδοτικότερη διαχείριση των συχνοτήτων του δικτύου.

Η χρονιά που όλοι οι κατασκευαστές εκτιμούν ότι θα έχουμε τις πρώτες 5G υλοποιήσεις αναμένεται να είναι το 2020 [4]. Η Ευρώπη επειδή έμεινε πίσω σχετικά στην ανάπτυξη του 4G σε σύγκριση με του Αμερικάνους και Ασιάτες, θέλει να κάνει απευθείας άλμα στο 5G δίκτυο για να ανακτήσει το χαμένο έδαφος. Οι στόχοι αυτής της γενιάς δικτύων είναι οι παρακάτω:

- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (data rate) σε σύγκριση με αυτούς του υπάρχοντος δικτύου. Συγκεκριμένα:
    - Αύξηση του συνολικού αριθμού δεδομένων (aggregate data rate) έως και χίλιες φορές από την ποσότητα δεδομένων που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο, δηλ. πόσα bits πληροφορίας ανά μονάδα χρόνου μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο σε μια περιοχή.
    - Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης (edge rate) θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 100Mbps για το 95% των χρηστών του διαδικτύου

    - Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (peak rate) θα πρέπει να αγγίζει τα δεκάδες Gbps.

- Ο χρόνος απόκρισης (latency) θα πρέπει να μειωθεί στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Συγκεκριμένα, στα σημερινά δίκτυα ο χρόνος που χρειάζεται ένα πλαίσιο για να πάει από την πηγή στον προορισμό είναι 15ms. Αυτός ο χρόνος απόκρισης στόχος είναι να πέσει στο 1ms.
- Ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μικρών αλλά και μεγάλων ρυθμών δεδομένων από μια μακροκυψέλη το οποίο απαιτεί αλλαγή στο κεντρικό πλάνο διαχείρισης δικτύου. Επιπλέον τα συστήματα πέμπτης γενιάς θα μπορούν να συνεργάζονται αρμονικά με εκείνα των προηγούμενων γενεών ενσωματώνοντας επιπροσθέτως και την τεχνολογία Wi-Fi.
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που χρειαζόμαστε να στείλουμε 1 bit πληροφορίας μέχρι και 100 φορές. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την μείωση των κυψελών. Τότε είναι φυσικό να μειωθεί και η ενέργεια που χρειάζεται μια κυψέλη να λειτουργήσει. Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, μειώνοντας το κόστος και επιβαρύνοντας λιγότερο το περιβάλλον.
- Μείωση του κόστους της λειτουργίας του δικτύου με χρήση της νέας τεχνολογίας mmWave όπου οι μικρές κυψέλες καθίστανται οικονομικά και ενεργειακά αποδοτικότερες συγκριτικά με τις μακροκυψέλες.
- Επίτευξη καλύτερης φασματικής απόδοσης με χρήση διαφορετικών, ποιο ενεργών κόμβων ανά συσκευή, περιοχή και συχνότητα. Εδώ μπορεί να φανεί χρήσιμη η τεχνολογία MIMO πετυχαίνοντας αύξηση της μεταδιδόμενης ποσότητας πληροφορίας ανά κόμβο. Επίσης η κυριαρχία του OFDMA σε συνδυασμό με το TDMA στη χρήση συχνοτήτων είναι σημαντικός παράγοντας στην αύξηση της φασματικής απόδοσης.

Μερικά από τα ποιο σημαντικά χαρακτηριστικά του 5G θα είναι τα παρακάτω:

- Διάχυτη χρήση δικτύων: Με την διάχυτη χρήση δικτύων δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να μπορούν να συνδέονται ταυτόχρονα σε διάφορες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης όπως 2.5G, 3G, 4G, δίκτυα 5G, Wi-Fi, WPAN καθώς επίσης και να τις εναλλάσσουν μεταξύ τους.
- Τεχνολογία smart-radio: Με την χρήση της τεχνολογίας smart-radio δίνεται η δυνατότητα σε διάφορες ραδιοτεχνολογίες να μοιράζονται το ίδιο αποτελεσματικά το φάσμα βρίσκοντας ποιο φάσμα μένει αχρησιμοποίητο και προσαρμόζοντας το σύστημα μετάδοσης στις απαιτήσεις των εκάστοτε τεχνολογιών.
- Δυναμικά Ad-hoc ασύρματα δίκτυα: Τα δυναμικά ad-hoc ασύρματα δίκτυα (DAWN) είναι ουσιαστικά ίδια αναλογία με το κινητό ad hoc (MANET) δίκτυο και το ασύρματο δίκτυο πλέγματος (WMN).
- Μαζικά MIMO συστήματα: Τα μαζικά MIMO συστήματα για να συμβάλουν στην αύξηση της απόδοσης και της ενέργειας εκπομπής παρέχουν επιπλέον κεραίες. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι περιλαμβάνουν χρήση φθηνών εξαρτημάτων χαμηλής ισχύος και απλοποιούν τον έλεγχο πρόσβασης μέσου. Ο ποιο κρίσιμος στόχος είναι να μπορέσουν να υποστηριχτούν αποτελεσματικά οι συσκευές για να είναι σε θέση να λειτουργήσει το διαδίκτυο με μεγάλο πλήθος συνδεδεμένων συσκευών και εφαρμογών όπως για παράδειγμα την αποστολή κρίσιμων σημείων ελέγχου για την ασφάλεια της κυκλοφορίας.

- Χρήση IPv6 πρωτοκόλλου: Με το IPv6 πρωτόκολλο διευθύνσεων μπορεί να εκχωρείται μια IP διεύθυνση κινητής συσκευής ανάλογα με την θέση που βρίσκεται στο δίκτυο.
- Ασύρματος παγκόσμιος ιστός: Ο ασύρματος παγκόσμιος ιστός (Wireless World Wide Web) βασίζεται στο ασύρματη εφαρμογή του δικτύου με ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές της προηγούμενης γενιάς.

1.2 Προτυποποίηση 5G Συστημάτων

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union) είναι ο αρμόδιος οργανισμός που ορίζει τις αρχές και που θα πρέπει να έχει μια νέα τεχνολογία προκειμένου να ικανοποιήσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των χρηστών. Στον τομέα των ραριο-διεπαφών δικτύων κινητών επικοινωνιών μέχρι σήμερα έχει αναπτύξει πρότυπα για τα συστήματα International Mobile Telecommunications (IMT-2000) και IMT-Advanced πάνω στα οποία βασίστηκαν τα συστήματα δικτύων τρίτης γενιάς (3G) και τέταρτης (4G) αντίστοιχα [5]. Το επόμενο πρότυπο που αναμένεται να αναπτύξει για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), αφού γίνουν οι απαραίτητες αξιολογήσεις και εγκριθούν τα standards, θα είναι γνωστό με το όνομα IMT-2020, το οποίο είναι εμπνευσμένο από την προβλεπόμενη ημερομηνία έναρξης χρήστης του 5G για εμπορικούς σκοπούς το 2020.

1.2.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU)

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) είναι ένας διεθνής οργανισμός που εξειδικεύεται στις τεχνολογίες της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών [6]. Εκτός από τα τεχνολογικά standards που ορίζει με σκοπό να συνεργάζονται αρμονικά τα δίκτυα μεταξύ τους, είναι υπεύθυνη για τον σωστό διαμερισμό του φάσματος των ραδιοκυμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο, προωθεί την συνεργασία των χωρών για την εγκατάσταση δορυφόρων στο διάστημα καθώς επίσης εργάζεται για την βελτίωση των υποδομών των τηλεπικοινωνιών στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Γενικά η ITU δραστηριοποιείται στο χώρο των Ασύρματων Επικοινωνιών, Ευζωνικών Δικτύων, της Αεροναυτικής και Θαλάσσιας πλοήγησης, Ραδιοαστρονομίας, Δορυφορικής Μετεωρολογίας και πολλούς άλλους. Αποτελείται από τους παρακάτω τομείς όπου κάθε ένας από αυτούς διαχειρίζεται αυτόνομα τις δραστηριότητες του οργανισμού:

- Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών (ITU-R)
- Τομέας Τυποποίησης (ITU-T)
- Τομέας Ανάπτυξης (ITU-D)
- Τομέας ITU Telecom

1.2.2 International Mobile Telecommunications – 2020 (IMT - 2020)

Το 2012 η ITU-R με το πρόγραμμα ITU towards “IMT for 2020 and beyond” που εισήγαγε έθεσε τις βάσεις για τις διαδικασίες έρευνας και προτυποποίησης των συστημάτων πέμπτης γενιάς (5G) [5]. Η διαδικασία προτυποποίησης ξεκίνησε σκιαγραφώντας το όραμα, τις απαιτήσεις και τις προσδοκίες των δικτύων πέμπτης γενιάς οι οποίες οδηγούν στον προσδιορισμό των στόχων ικανοποίησης. Ο στόχος είναι

τα δίκτυα πέμπτης γενιάς να έρθουν στον κόσμο μέχρι το 2020 φέρνοντας κοντά στους ανθρώπους νέες εφαρμογές και δεδομένα μεταβάλλοντας τις πόλεις σε έξυπνα δικτυωμένα περιβάλλοντα [7].

Πέρα από τον σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των προδιαγραφών των 5G δικτύων που έπαιξε η ITU-R, εξίσου σημαντικό ρόλο έχει και η ITU-T η οποία επικεντρώνεται στην αναγνώριση των αναγκών προτυποποίησης σχετικά με το ενσύρματο κομμάτι των 5G δικτύων.

Μέχρι σήμερα εργάζονται και θα συνεχίσουν να εργάζονται πολλές τεχνικές ομάδες στον κόσμο πάνω στην ανάπτυξη της 5G τεχνολογίας γιατί βάση πλάνου θα κατατεθούν τεχνολογικές λύσεις στην ITU μέχρι το τέλος του 2019. Χαρακτηριστικό παράδειγμα παρόμοιας διαδικασίας από το παρελθόν είναι η κατάθεση της πρότασης της 3rd Generation Partnership Project (3GPP) και WiMAX από το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) του Long Term Evolution (LTE) ως τεχνολογίες δικτύων που πληρούν τις προδιαγραφές IMT – Advanced (4G). Τις προτάσεις που θα λάβει η ITU ως τεχνολογικές λύσεις, θα εξετάσει σε τι βαθμό ικανοποιούνται οι 5G ανάγκες και προδιαγραφές.

1.2.3 Παράμετροι Ικανοποίησης IMT – 2020

Η ITU-R σε συνεργασία με ερευνητικές ομάδες, την κοινότητα κινητών επικοινωνιών και άλλων ενδιαφερόμενων μελών δουλεύουν πυρετωδώς και έχουν συμφωνήσει στις παρακάτω παραμέτρους που θα πρέπει να ικανοποιούνται από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς:

1) Σε αστικά περιβάλλοντα ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων θα είναι 100Mbps και σε κοντινότερες αποστάσεις από το σταθμό βάσης θα είναι 1Gbps
2) Η καθυστέρηση πλαισίου από την πηγή στον προορισμό θα είναι μικρότερη του 1ms
3) Ο μέγιστο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων θα είναι 20Gbps
4) Πλήρης κάλυψη ακόμα και εξυπηρέτηση εν κινήσει μέχρι και 500km/h
5) Οι κυψέλες θα είναι έως και 100 φορές ενεργειακά ποιο αποδοτικές σε σύγκριση με τα συστήματα IMT-Advanced
6) Οι κυψέλες θα έχουν 2, 3, ή 5 φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τα συστήματα IMT-Advanced
7) Η κάθε κυψέλη θα έχει χωρητικότητα 100Mbps/km^2

1.2.4 Ρυθμίσεις Φάσματος Στα Δίκτυα 5ης Γενιάς

Για την επίτευξη των στόχων και των αποδόσεων των 5G δικτύων πραγματοποιούνται έρευνες σχετικά με την απόδοση επιπρόσθετου φάσματος. Συγκεκριμένα στο WRC 2015 θα παρθεί μια απόφαση για τα IMT-2020 συστήματα σχετικά με την απόδοση περισσότερων από 500MHz επιπρόσθετου φάσματος κάτω από την συχνότητα των 6GHz. Δηλαδή στις περιπτώσεις:

- Μακροκυψελών θα χρησιμοποιηθεί ζώνη συχνοτήτων μικρότερη από 1GHz
- Μακροκυψελών και μικροκυψελών θα χρησιμοποιηθεί μεσαία ζώνη συχνοτήτων από 1 έως 3GHz

- Μικροκυψελών και πικοκυψελών θα χρησιμοποιηθεί υψηλή ζώνη συχνοτήτων από 3 έως 6GHz.

Ανάλογη συζήτηση αναμένεται να συζητηθεί στο WRC 2019 για τις περιπτώσεις λειτουργίας συστημάτων με συχνότητα μεγαλύτερη των 6GHz το οποίο αναμένεται να δημιουργήσει νέες προκλήσεις ως προς την μοντελοποίηση, την κάλυψη των ασύρματων καναλιών, την κινητικότητα ακόμα και την αλληλεπίδραση με τα υπάρχοντα δίκτυα. Αυτά τα σενάρια είναι υπό έρευνα από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών και από οργανισμούς όπως η 3GPP όμως είναι απαραίτητη η συνεργασία και με τις Εθνικές Ρυθμιστικές Αρχές επειδή είναι αρμόδιες για την απόδοση φάσματος σε κρατικό επίπεδο [3].

1.2.5 Ρυθμίσεις Wi-Fi Στα Δίκτυα 5ης Γενιάς

Μια από τις βασικότερες τεχνολογίες για την χρήση του ραδιοφάσματος σε δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι το Wi-Fi. Το Wi-Fi αναμένεται να συνεχίσει να εξελίσσεται στα δίκτυα 5G και συγκεκριμένα να κυριαρχήσει η τεχνολογία 802,11ax που είναι η μεταγενέστερη τεχνολογία του 802.11ac. Θα είναι βελτιωμένο τουλάχιστον τέσσερεις φορές η μέση απόδοση ανά σταθμό βάσης σε πυκνά δίκτυα στοχεύοντας τις ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 1 και 6 GHz.

Επιπρόσθετες βελτιώσεις αποτελούν την εισαγωγή OFDMA στο 802.11, εισαγωγή ελέγχου πρόσβασης στο 802.11, επεκτάσεις MIMO για το OFDMA, βελτιωμένο έλεγχο ισχύος και συμβατότητα με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες.

1.2.6 Ρυθμίσεις Video Στα Δίκτυα 5ης Γενιάς

Δεδομένου ότι η κίνηση που θα παράγεται μέσω δικτύου θα συνεχίζει να αυξάνεται, ο στόχος είναι να μην μειωθεί η ποιότητα του video αλλά να αυξηθεί [6]. Έτσι ο κύριος στόχος είναι να βελτιωθεί η κωδικοποίηση στο διπλάσιο σε σχέση με την υπάρχουσα κωδικοποίηση καθώς επίσης να βελτιωθεί και η κωδικοποίηση που ευθύνεται για την οπτικοποίηση του αποτελέσματος στην συσκευή του τελικού χρήστη.

Στόχος των δικτύων είναι να υποστηρίζουν όλους τους τύπους των συσκευών των χρηστών και να επιτρέπουν την αδιάλειπτη μετάδοση δεδομένων.

1.2.7 Ρυθμίσεις Επικοινωνίας M2M Στα Δίκτυα 5ης Γενιάς

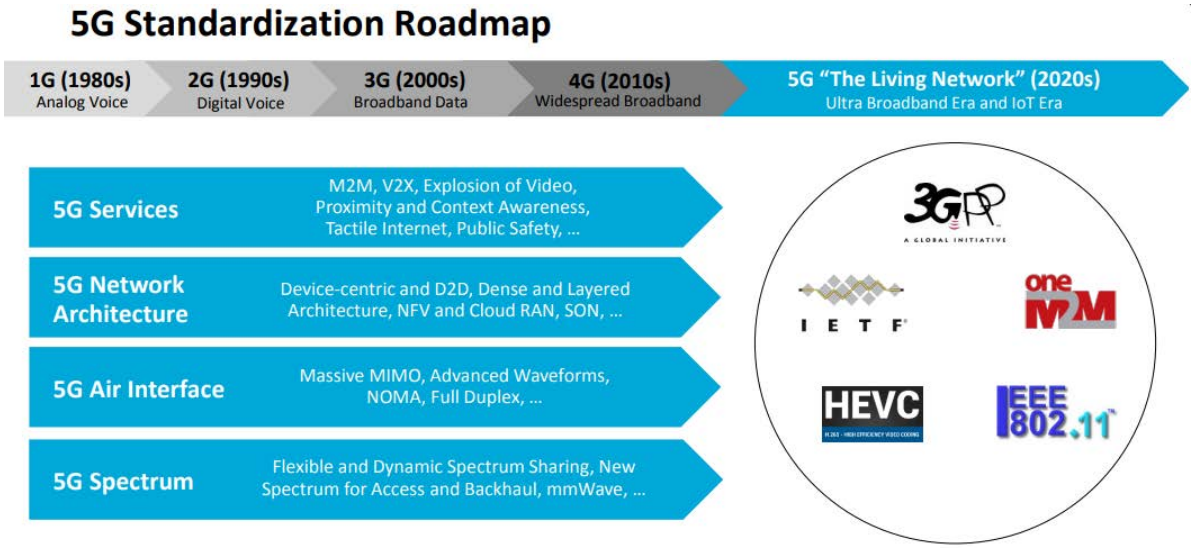
Η επικοινωνία M2M στηρίζεται στην ανάπτυξη του Internet of Things (IoT) στα δίκτυα πέμπτης γενιάς και αναμένεται να επιφέρει σημαντικό φόρτο στο δίκτυο. Από πλευράς προτυποποίησης θα πρέπει να υποστηρίζονται τα παρακάτω:

- Να υπάρχει ανεξάρτητη πρόσβαση σε υπηρεσίες από άκρο σε άκρο
- Να δημιουργηθούν διεπαφές, πρωτόκολλα και APIs ανοιχτού κώδικα
- Παροχή ασφάλειας στην επικοινωνία με έμφαση στην ιδιωτικότητα
- Να υπάρχει διαλειτουργικότητα και προσδιορισμός συσκευών και εφαρμογών
- Δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης οντοτήτων

1.2.8 Ερευνητικές Ομάδες Ανάπτυξης Δικτύων 5ης Γενιάς

Για την ανάπτυξη και υλοποίηση του "οράματος" των δικτύων 5ης γενιάς, έχει εγκαθιδρυθεί σε ολόκληρο τον κόσμο πληθώρα ερευνητικών ομάδων και οργανισμών [8]. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω:

- 3GPP: Ο οργανισμός 3GPP στο παρελθόν με την λύση που πρότεινε για την 4G τεχνολογία, δηλαδή με το LTE-Advanced σύστημα, κυριάρχησε. Έτσι αναμένεται να καταθέσει την λύση της στην ITU που να πληρεί τις προδιαγραφές IMT-2020 για τα 5G συστήματα τον Ιούνιο του 2019 και μια ποιο λεπτομερή περιγραφή το Φθινόπωρο του 2020.
- Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance: Η Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance ερευνά από την πλευρά των παρόχων δικτύων τις απαιτήσεις που δημιουργούνται έτσι ώστε να τις ικανοποιήσει από το 2020 και μετά.
- Small Cell Forum: Το Small Cell Forum αποτελείται από ένα σύνολο ομάδων που εργάζονται και ερευνούν την περιοχή των Wi-Fi συστημάτων, την εξέλιξή τους, την εικονικοποίηση των δικτύων και τα αυτό-οργανούμενα δίκτυα.
- ETSI Industry Specification Groups (ISGs): Τα ETSI Industry Specification Groups ασχολούνται με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως το millimeter Wave Transmission (mWT), το Mobile-Edge Computing (MEC) και το Network Function Virtualization (NFV).
- Open Network Foundation (ONF): Το Open Network Foundation αποτελείται από ομάδες που εστιάζουν τις έρευνές τους στις απατήσεις των Software Defined-Networks (SDNs) και ερευνά νέα πρότυπα για την καλύτερη αξιοποίηση των SDNs. Ακόμα αναπτύσσει το OpenFlow πρότυπο για την ικανοποίηση των μελλοντικών εμπορικών αναγκών.
- Open Daylight: Το Open Daylight είναι ένα έργο ανοιχτού κώδικα που έχει ως στόχο την υιοθέτηση του λογισμικού στις SDN και NFV τεχνολογίες.
- Large Scale Industry-Academic Research Projects: METIS-2020, 5GPPP, 5G Forum και άλλα.



Εικόνα 3. Χάρτης τυποποίησης 5G δικτύων

1.2.9 Σύμπραξη Δημοσίου Ιδιωτικού Τομέα για Υποδομές Πέμπτης Γενιάς

Η Σύμπραξη Δημοσίου Ιδιωτικού Τομέα για Υποδομές Πέμπτης Γενιάς (5G Infrastructure Public Private Partnership, 5G-PPP) είναι μια κοινή πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της Ευρωπαϊκής ICT βιομηχανίας (ICT κατασκευαστές, φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιών, πάροχοι υπηρεσιών, Μικρές και Μεσαίες Επιχειρήσεις (Small and Medium-sized Enterprises, SMEs) και ερευνητικά ιδρύματα). Το 5G-PPP είναι τώρα στην 2η φάση όπου 21 καινούρια έργα ξεκίνησαν στις Βρυξέλλες τον Ιούνιο 2017. Το 5G-PPP θα προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για τις πανταχού παρούσες υποδομές επικοινωνίας επόμενης γενιάς για την προσεχή δεκαετία. Η πρόκληση για το 5G-PPP είναι να προστατέψει την ηγεσία της Ευρώπης σε συγκεκριμένους τομείς όπου η Ευρώπη είναι δυνατή ή όπου υπάρχει η δυνατότητα για δημιουργία νέων αγορών όπως έξυπνες πόλεις, ηλεκτρονική υγεία, ευφυείς μεταφορές, εκπαίδευση ή ψυχαγωγία και media. Η 5G PPP πρωτοβουλία στοχεύει στην ενίσχυση της ευρωπαϊκής βιομηχανίας για να ανταγωνιστεί επιτυχώς στις παγκόσμιες αγορές και να ανοίξει νέες ευκαιρίες καινοτομίας. Θα “ανοίξει μια πλατφόρμα που θα μας βοηθήσει να επιτύχουμε τον κοινό μας στόχο να διατηρήσουμε και να ενισχύσουμε το παγκόσμιο τεχνολογικό προβάδισμα“ [9].

Η σύμπραξη 5G PPP θέτει τους ακόλουθους στόχους απόδοσης:

- Παροχή 1000 φορές μεγαλύτερη ασύρματη χωρητικότητα περιοχής και ποικίλες δυνατότητες υπηρεσιών σε σύγκριση με το 2010
- Εξοικονόμηση έως και 90% ενέργεια ανά παρεχόμενη υπηρεσία. Η κύρια εστίαση θα είναι στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας όπου η κυρίαρχη κατανάλωση ενέργειας προέρχεται από το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης
- Μείωση του μέσου κύκλου χρόνου δημιουργίας υπηρεσίας από 90 ώρες σε 90 λεπτά
- Δημιουργία ενός ασφαλούς, αξιόπιστου και φερέγγυου Internet με “μηδενική” διακοπή λειτουργίας παροχής υπηρεσιών
- Διευκόλυνση πολύ πυκνών υλοποιήσεων ασύρματων ζεύξεων επικοινωνίας για σύνδεση πάνω από 7 τρισεκατομμύρια ασύρματων συσκευών εξυπηρετώντας πάνω από 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους
- Εξασφάλιση για όλους και παντού την πρόσβαση σε ένα ευρύτερο πλαίσιο υπηρεσιών και εφαρμογών σε χαμηλότερο κόστος

1.2.10 Προκλήσεις

Οι ερευνητές, οι κατασκευαστές και όλοι όσοι δουλεύουν για την προτυποποίηση των 5G δικτύων έχουν να αντιμετωπίσουν μπροστά τους πολλές προκλήσεις τις οποίες καλούνται να φέρουν εις πέρας. Οι ποιο σημαντικές από αυτές είναι η διαλειτουργικότητα, η δυναμικότητα και η πλήρης κάλυψη που υπόσχονται να υποστηρίζουν τα 5G δίκτυα. Ακόμη μεγαλύτερη πρόκληση όμως είναι η συνύπαρξη πολλών και διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών κάτω από την ομπρέλα των 5G δικτύων.

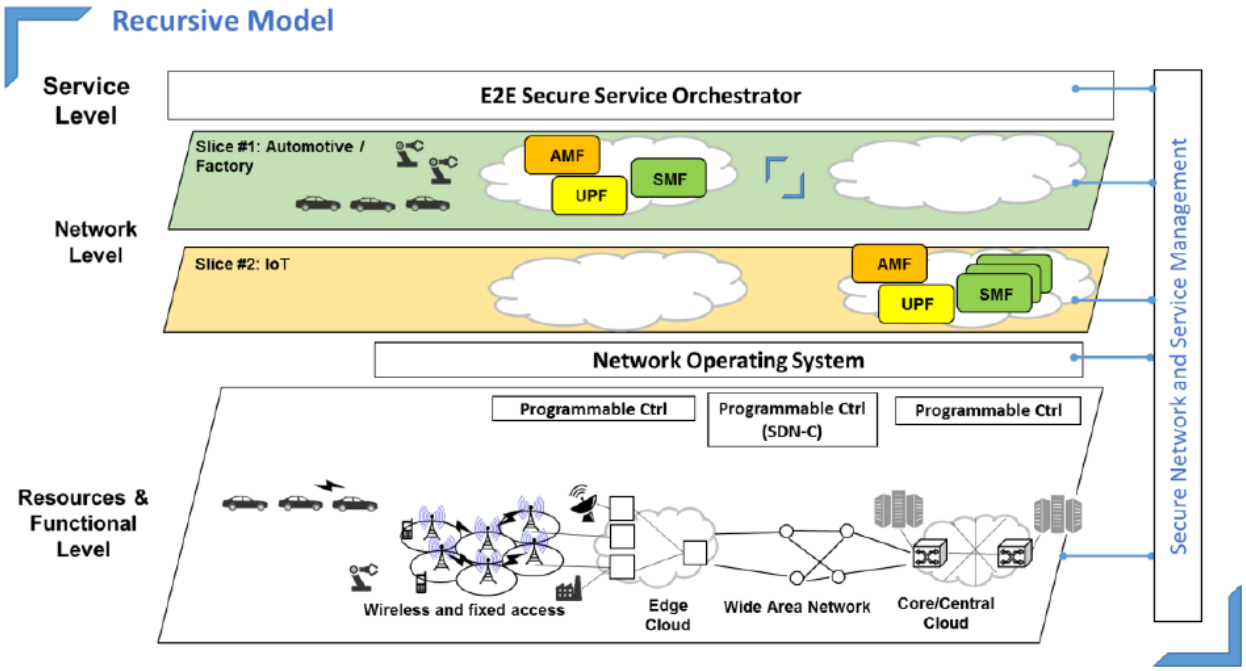
Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων θα πρέπει να υπάρχει συγκεκριμένη δομή στα 5G δίκτυα έχοντας ως κύριο μέλημα να απολαμβάνουν οι τελικοί χρήστες την απόλυτη εμπειρία χρήσης των δικτύων 5G.

Τέλος, μεγάλη πρόκληση αποτελεί η αύξηση ρυθμών μετάδοσης δεσμεύοντας επιπρόσθετο φάσμα συχνοτήτων για την 5G τεχνολογία το οποίο δημιουργεί θέματα και προβληματισμούς που αφορούν την διαχείριση των ραδιο-διεπαφών και την κινητικότητα των χρηστών.

1.3 Αρχιτεκτονική 5G Συστημάτων

1.3.1 Συνολική αρχιτεκτονική

Σύμφωνα με τη σύμπραξη 5G-PPP τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) θα πληρούν τις απαιτήσεις μιας ιδιαίτερα κινητής και πλήρως διασυνδεδεμένης κοινωνίας. Η μεγάλη αύξηση των διασυνδεδεμένων αντικειμένων και συσκευών θα ανοίξει το δρόμο σε ένα ευρύ φάσμα νέων υπηρεσιών και σχετικών επιχειρησιακών μοντέλων επιτρέποντας την αυτοματοποίηση σε διάφορους τομείς βιομηχανίας και νέων αγορών (π.χ. ενέργεια, ηλεκτρονική υγεία, έξυπνη πόλη, διασυνδεδεμένα αυτοκίνητα, βιομηχανική παραγωγή, κ.λ.π). Επιπλέον, σε πιο διαδεδομένες άνθρωπο-κεντρικές εφαρμογές, π.χ. εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας, 4k βίντεο ροή, κ.λ.π., τα 5G δίκτυα θα υποστηρίξουν τις ανάγκες επικοινωνίας μεταξύ μηχανής προς μηχανή και μηχανής προς άνθρωπο για να κάνουν την ζωή μας πιο ασφαλή και πιο βολική. Η συνύπαρξη των άνθρωπο-κεντρικών και εφαρμογών τύπου μηχανής θα επιβάλουν πολύ διαφορετικές λειτουργικές και βασικό δείκτη απόδοσης (KPI)/απαιτήσεις απόδοσης τις οποίες τα 5G δίκτυα θα πρέπει να υποστηρίξουν. Το όραμα της τμηματοποίησης του δικτύου (network slicing) θα ικανοποιήσει επομένως την απαίτηση των κατακόρυφων τομέων οι οποίοι απαιτούν αποκλειστικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες παρέχοντας κατ' απαίτηση "πελατο-κεντρικές" περιγραφές των απαιτήσεων τους στους φορείς εκμετάλλευσης όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4. Συνολική αρχιτεκτονική

Γίνεται προφανής η ανάγκη για αντιστοίχιση τέτοιων πελατο-κεντρικών συμφωνιών επιπέδου υπηρεσίας (service level agreements, SLAs) σε προσανατολισμένους-πόρους περιγραφών τμήματος δικτύου, οι οποίοι διευκολύνουν την αρχικοποίηση και την ενεργοποίηση των τμημάτων στιγμιοτύπων. Στο παρελθόν, οι φορείς εκμετάλλευσης εκτελούσαν αυτή τη αντιστοίχιση με χειροκίνητο τρόπο σε ένα τύπο

υπηρεσιών/τμημάτων (κυρίως κινητών ευρείας ζώνης (mobile broad band - MBB), υπηρεσίας φωνής και SMS) περιορισμένου αριθμού. Με ένα αυξανόμενο αριθμό τέτοιων αιτημάτων των πελατών και ανάλογα με τα τμήματα δικτύου, η διαχείριση του κινητού δικτύου και το πλαίσιο ελέγχου θα πρέπει να παρουσιάζουν ένα σημαντικά αυξανόμενο επίπεδο αυτοματισμού για την ολική διαχείριση του κύκλου ζωής των στιγμιοτύπων των δικτυακών τμημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, η αυτοματοποίηση του κύκλου ζωής του τμήματος πρέπει να πραγματοποιηθεί από μια αρχιτεκτονική και να περιλαμβάνει λειτουργίες και εργαλεία τα οποία υλοποιούν γνωστικές διαδικασίες για όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής: φάση προετοιμασίας, αρχικοποίησης, ρύθμισης και φάση ενεργοποίησης, φάση χρόνου εκτέλεσης και φάση αποδέσμευσης. Δυο θεμελιώδη τεχνολογικοί συντελεστές περιλαμβάνουν λογισμικό όπως π.χ. εικονικοποίηση των λειτουργιών δικτύου, καθώς επίσης ορισμένες από λογισμικό προγραμματιζόμενες λειτουργίες δικτύου και πόροι υποδομής. Περισσότερα βασικά στοιχεία συνιστούν τις διαδικασίες αποτελεσματικής διαχείρισης & ενορχήστρωσης και πρωτοκόλλων. Τέλος, κλιμακούμενοι, υπηρεσιο-κεντρικοί αλγόριθμοι ανάλυσης δεδομένων που εκμεταλλεύονται πόρους δεδομένων πολλαπλών τομέων, που συμπληρώνονται με αξιόπιστους μηχανισμούς ασφάλειας, θα ανοίξουν το δρόμο για ανάπτυξη προσαρμοσμένων υπηρεσιών δικτύου με διαφορετικά εικονικοποιημένα NFs (virtualised NF, VNF) σε μια κοινή υποδομή με αξιόπιστο τρόπο.

Η αναδρομική δομή στο πλαίσιο του 5G μπορεί να οριστεί ως μια σχεδίαση, κανόνας ή διαδικασία η οποία μπορεί να εφαρμοστεί επαναληπτικά [10]. Στο πλαίσιο της υπηρεσίας δικτύου, αυτή η αναδρομική δομή μπορεί είτε να είναι συγκεκριμένο μέρος μιας δικτυακής υπηρεσίας ή ένα επαναλαμβανόμενο μέρος της πλατφόρμας ανάπτυξης και μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα να δομηθεί μια υπηρεσία από τις υπάρχουσες υπηρεσίες. Μια συγκεκριμένη υπηρεσία μπορεί να κλιμακωθεί αναδρομικά, με την έννοια ότι ένα συγκεκριμένο μοτίβο (pattern) θα αντικαταστήσει ένα μέρος του. Όπως και με τον ορισμό της αναδρομικής υπηρεσίας, μια αναδρομική δομή μέσα στην 5G αρχιτεκτονική (λογισμικού) μπορεί να αρχικοποιηθεί και να συνδεθεί επαναληπτικά. Αυτό βελτιώνει την επεκτασιμότητα, μιας και το ίδιο στιγμιότυπο μπορεί να αναπτυχθεί πολλές φορές, σε διαφορετικά μέρη στην ίδια στιγμή. Η αναδρομικότητα επίσης οδηγεί σε μια ευκολότερη διαχείριση της ελαστικότητας, της αλλαγής και της επεκτασιμότητας. Η αναδρομικότητα με την ανάθεση μέρους της υπηρεσίας σε πολλαπλά στιγμιότυπα του ίδιου μπλοκ λογισμικού, είναι ένας φυσικός τρόπος για να χειριστεί πιο περίπλοκο και μεγαλύτερο φόρτο εργασίας. Αν αυτή η αναδρομικότητα ληφθεί υπόψη από την αρχή της ανάπτυξης του 5G, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης θα έρθουν με το ελάχιστο κόστος.

Στο πλαίσιο της εικονικής υποδομής, αυτή η αναδρομική δομή επιτρέπει την λειτουργία ενός τμήματος στιγμιοτύπου στην κορυφή των πόρων υποδομής που παρέχονται από το παρακάτω τμήμα στιγμιότυπου. Ο μισθωτής (ο ιδιοκτήτης του τμήματος στιγμιοτύπου) μπορεί να ελέγξει την εικονική υποδομή του όπως αυτή λειτουργεί φυσικά, δεσμεύοντας και μεταβιβάζοντας μέρος των πόρων σε άλλους μισθωτές. Αυτό σημαίνει, κάθε μισθωτής μπορεί να κατέχει και να αναπτύξει το δικό του MANO σύστημα. Για να υποστηριχθεί η αναδρομή, ένα σύνολο από ομοιογενή APIs χρειάζονται για να παρέχουν ένα επίπεδο αφαίρεσης για την διαχείριση κάθε τμήματος και να ελέγχουν τους υποκείμενους εικονικούς πόρους οι οποίοι είναι διαφανείς στο επίπεδο της ιεραρχίας όπου λειτουργεί ο μισθωτής. Οι διάφοροι μισθωτές ζητούν την παροχή των τμημάτων μέσω αυτών των APIs. Μέσω ενός προτύπου, blueprint ή SLA, κάθε μισθωτής καθορίζει όχι μόνο τα χαρακτηριστικά του τμήματος (τοπολογία, QoS, κ.α.) αλλά επίσης και κάποια πρόσθετα χαρακτηριστικά όπως το επίπεδο ανθεκτικότητας (resiliency), διαχείρισης και επιθυμητού ελέγχου. Ο πάροχος πρέπει να

λαμβάνει υπόψη του την σημασία των απαιτήσεων και να διαχειρίζεται τους διαθέσιμους πόρους

1.3.2 Υπηρεσίες Πέμπτης Γενιάς, Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης

Κατά τον προσδιορισμό των απαιτήσεων για την υποδομή δικτύων πέμπτης γενιάς ένας μεγάλος αριθμός περιπτώσεων χρήσης έχουν περιγραφεί και αναλυθεί στο πλαίσιο των οργανισμών τυποποίησης, όπως 3GPP και ITU-T, στα βιομηχανικά φόρουμ όπως το NGMN (Next Generation Mobile Networks) και τέλος τα έργα της φάσης 1 της σύμπραξης 5G-PPP. Αυτά τα έργα περιγράφουν περιπτώσεις χρήσης οι οποίες βοηθούν την έρευνα και την καινοτομία σε αυτά τα έργα προς απόδειξη των επιστημονικών και τεχνολογικών επιτευγμάτων.

Μέσα από την αλληλεπίδραση με την κοινότητα της βιομηχανίας έχουν οριστεί ορισμένες πρόσθετες περιπτώσεις χρήσης. Πολλές διαθέσιμες περιπτώσεις χρήσης είναι παραλλαγές ενός μικρού συνόλου των 5G υπηρεσιών, οι οποίες έχουν ενοποιηθεί και συμφωνηθεί στα πλαίσια του 5GPPP και διαφορετικών Standards Developing Organizations (SDOs) όπως ακολούθως:

- Enhanced Mobile Broadband (eMBB) – επίσης καλείται Extreme Mobile Broadband
- Ultra-Reliable και Low Latency Communications (URLLC), και
- Massive Machine Type Communications (mMTC)

Επιπρόσθετες περιπτώσεις χρήσης είναι πιθανό να προκύψουν και οι οποίες δεν είναι προβλέπονται σήμερα. Για τα μελλοντικά 5G συστήματα, είναι απαραίτητη η ευελιξία για να προσαρμοστούν σε νέες περιπτώσεις χρήσης με ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων.

Προς το παρόν πέντε βιομηχανίες έχουν περιγράψει τις απαιτήσεις τους στα αντίστοιχα white paper τους [11]. Οι απαιτήσεις που έχουν εκφραστεί στο φόρουμ της βιομηχανικών περιπτώσεων χρήσης, τα οποία έχουν αναλυθεί περισσότερο στο 5G white paper *αυτονόμηση βιομηχανιών κατακόρυφης δομής* του 5G οράματος και της ομάδας εργασίας κοινωνικών προκλήσεων [12]. Σε αυτό το white paper οι περιπτώσεις χρήσης συνδυάζονται με τις τεχνικές δυνατότητες του 5G οι οποίες αντιστοιχούν στους κύριους βασικούς δείκτες απόδοσης του 5GPPP προγράμματος, που προσδιορίζονται στη 5GPPP συμβατική ρύθμιση και επεκτείνονται στο 5G έγγραφο *Οράματος* [13].

Από μια τεχνική αρχιτεκτονική προοπτική έκδοσης 1 της 5G αρχιτεκτονικής [14] από την αρχιτεκτονική ομάδα εργασίας 5GPPP εισάγουν τις κύριες απαιτήσεις για τα 5G δίκτυα και παρουσιάζουν τους στόχους σχεδιασμού για αυτή την αρχιτεκτονική.

Το έγγραφο για τις 5GPPP περιπτώσεις χρήσης και της αξιολόγησης απόδοσης [15] παρέχει μια επισκόπηση των περιπτώσεων χρήσης οι οποίες χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση διαφορετικών 5G θεμάτων ράδιο πρόσβασης δικτύου. Βελτιώνει τις περιπτώσεις χρήσης που προβλέπονται παραπάνω, καθορίζοντας ομάδες περιπτώσεων χρήσης για να αντικατοπτρίζουν καλύτερα τη χρήση τους στα έργα της φάσης 1 της 5GPPP. Οι ομάδες είναι:

- Πυκνές πόλεις (Dense urban)
- Ευρυζωνικότητα (50+ Mbps) παντού (Broadband everywhere)
- Διασυνδεδεμένα Οχήματα (Connected vehicles)
- Μελλοντικά έξυπνα γραφεία (Future smart offices)

- IoT χαμηλού εύρους ζώνης (Low bandwidth IoT)
- Διαδίκτυο υψηλής απόδοσης / αυτοματοποίηση (Tactile internet / automation)

Η ομαδοποίηση αυτή βασίζεται σε δηλωμένα εύρη τιμών για τις μετρήσεις κάθε ενός από τα σχετικά KPIs για την εξυπηρέτηση του πελάτη, ονομαστικά:

- Πυκνότητα συσκευής (Device density)
- Κινητικότητα (Mobility)
- Υποδομή (σχετιζόμενη με την τοπολογία) (Infrastructure (related to topology))
- Τύπος κίνησης (Traffic type)
- Ποσοστό δεδομένων χρήστη (User data rate)
- Καθυστέρηση (Latency)
- Αξιοπιστία (Reliability)
- Διαθεσιμότητα (σχετικά με την κάλυψη) (Availability (related to coverage))
- Τύπος υπηρεσίας 5G (5G service type (eMBB, URLLC, mMTC))

Επιπρόσθετες περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με τα KPIs αναγνωρίζονται ότι είναι σχετικά με την ανάπτυξη και την προοπτική ελέγχου λειτουργίας δικτύου, και συγκεκριμένα:

- Τμηματοποίηση δικτύου (Network slicing), η οποία έχει την ικανότητα να δημιουργεί τμήματα από-άκρο-σε-άκρο με την ίδια υποδομή για ετερογενείς υπηρεσίες
- Πολλαπλή μίσθωση (Multi-tenancy), η οποία είναι σε θέση να προσφέρει υπηρεσίες συνδεσιμότητας σε πολλαπλούς μισθωτές και να συνδυάσει πόρους από διαφορετικούς φορείς
- Ευελιξία (Flexibility), η οποία έχει την δυνατότητα να διαμορφώνει δυναμικά δίκτυα σε χώρο και χρόνο, ανάλογα με προβλεπόμενα ή απρόβλεπτα γεγονότα

Τέλος οι ακόλουθες δυνατότητες, αν και αναφέρθηκαν από την πλευρά των κατακόρυφων τομέων, είναι καίριας σημασίας για την επιτυχή εμπορευματοποίηση:

- Χρόνος ανάπτυξης υπηρεσίας (Service deployment time), ορίζεται ως την διάρκεια που απαιτείται για την εγκαθίδρυση από άκρο-σε-άκρο λογικών δικτυακών τμημάτων που χαρακτηρίζονται από τις αντίστοιχες εγγυήσεις επιπέδου δικτύου
- Όγκος δεδομένων (Data Volume), ορίζεται ως η ποσότητα της πληροφορίας που μεταφέρεται ανά ώρα σε μια συγκεκριμένη περιοχή
- Αυτονομία (Autonomy), ορίζεται ως η χρονική διάρκεια για ένα στοιχείο στο να είναι λειτουργικό χωρίς παροχή τροφοδοσίας. Πρόκειται για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, την χωρητικότητα φόρτου της μπαταρίας και την ενεργειακή αποδοτικότητα.
- Ασφάλεια (Security), ορίζεται ως ένα χαρακτηριστικό συστήματος το οποίο εξασφαλίζει συνολικά την προστασία των πόρων και περιλαμβάνει πολλές διαστάσεις όπως, μεταξύ άλλων, έλεγχο ταυτότητας, εμπιστευτικότητα των δεδομένων, ακεραιότητα των δεδομένων και έλεγχο πρόσβασης
- Ταυτότητα (Identity), ορίζεται ως το χαρακτηριστικό της αναγνώρισης πόρων περιεχομένου και αναγνωριστικών οντοτήτων στο σύστημα

1.3.3 Σενάρια Αρχιτεκτονικής

1.3.3.1 Επισκόπηση Των Ήδη Υπαρχουσών Τεχνολογιών Και Λύσεων

Η δεύτερη γενιά (2G) δικτύων εμφανίστηκε το 1991 και χρησιμοποιούσε GSM [21]. Χρησιμοποιούσε πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου μαζί με διαίρεση συχνότητας και είχε την δυνατότητα της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας και ασυνεχών εκπομπών. Στη συνέχεια ήρθε η τρίτη γενιά δικτύων (3G), δηλαδή το UMTS που μετά επεκτάθηκε στο HSPA όπου σ' αυτό το σύστημα πλήθος χρηστών καλούνται να εξυπηρετηθούν από μια κυψέλη. Τα δίκτυα τρίτης γενιάς έκαναν χρήση πολυπλεξίας κώδικα (CDMA) και ήταν το εφαλτήριο για την σωστή διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας. Αργότερα ήρθαν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G), τα LTE/LTE Advanced. Εδώ κάθε κυψέλη μπορεί να αποτελείται από πολλές μικρότερες και χρησιμοποιείται η πολυπλεξία σήματος (OFDMA), τεχνολογία MIMO, CoMP και Relaying.

1.3.3.2 Αρχιτεκτονικές Βασισμένες Στην Πυκνοποίηση Του Δικτύου

Στο σενάριο της αρχιτεκτονικής βασισμένη στην πυκνοποίηση του δικτύου έχουμε κυψέλες που γίνονται πολύ μικρότερες υποστηρίζοντας παράλληλα ένα πολύ μεγάλο αριθμό από συσκευές. Δημιουργούνται ιεραρχίες που διαχειρίζονται τις προγραμματισμένες ή όχι συνδέσεις καθώς επίσης τα μικροκύματα και τα mmWave. Στην υποδομή του δικτύου χρησιμοποιούνται πολλές ζώνες φάσματος της τάξεως των 1800GHz, 2100GHz, 3.5GHz έως 60GHz από πολλούς κόμβους (UE συσκευές).

Επίσης σχηματίζονται UDN (Ultra Dense Network) δίκτυα, δηλαδή δίκτυα από πολλές και μικρές κυψέλες που καλύπτουν περιοχές μικρής κλίμακας και διαφόρων είδους επικοινωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι όταν μια κυψέλη θα ανατεθεί να υποστηρίξει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D) ή μεταξύ μηχανών (M2M).

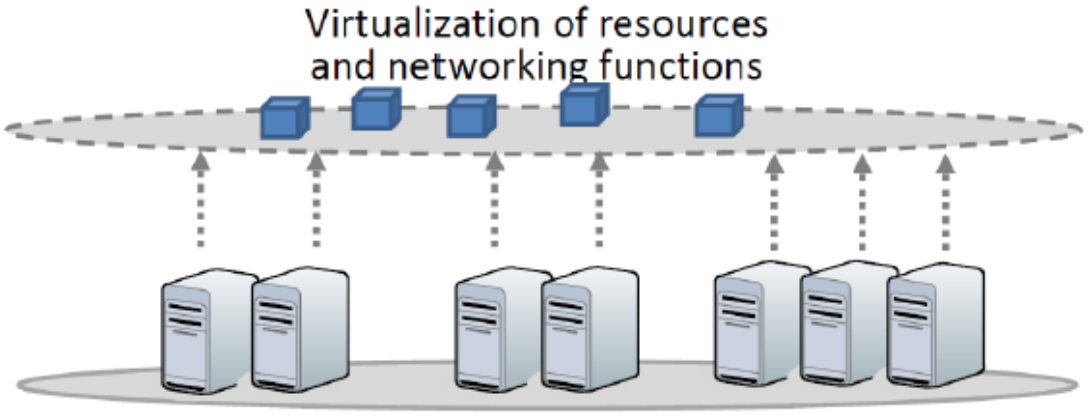
1.3.3.3 Αρχιτεκτονικές Βασισμένες Στην Κεντρική Διαχείριση Πόρων Και Στις Ετερογενείς Τεχνολογίες

Στο σενάριο της αρχιτεκτονικής βασισμένη στην κεντρική διαχείριση πόρων και στις ετερογενείς τεχνολογίες έχουμε κομμάτια του δικτύου τα οποία δουν σε κάθε χρήστη ανεξάρτητα αν είναι συσκευή ή άνθρωπος με σκοπό να απολαμβάνει το μέγιστο, δηλαδή το 100%, του ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να του προσφέρει το δίκτυο [21]. Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια της ασύρματης τεχνολογίας Distributed-Input-Distributed-Output (DIDO) η οποία εξαλείφει τις παρεμβολές από τους γειτονικούς πομπούς για να μπορεί να προσφέρει στον τελικό χρήστη το δίκτυο το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

1.3.3.4 Αρχιτεκτονικές Βασισμένες Στην Εικονικοποίηση Του Δικτύου

Στο σενάριο της αρχιτεκτονικής βασισμένης στην εικονικοποίηση του δικτύου έχουμε στροφή προς το Cloud Computing για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε πραγματικό χρόνο. Οι βασικότερες τεχνολογίες για την εικονικοποίηση των πόρων και των συναρτήσεων του δικτύου είναι η Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό (SDN) και η Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (NFV). Το SDN είναι μια διεπαφή που λειτουργεί ως ένα ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ των οντοτήτων διαχείρισης και των δεδομένων. Το NFV μέσω της εικονικοποίησης συναρτήσεων μπορεί να διαχειρίζεται έξυπνα και να δημιουργεί διεπαφές γι' αυτές. Επομένως δημιουργείται ένα δίκτυο που με την βοήθεια

του λογισμικού συνδυάζει ευέλικτα τις μικρές τοποθετημένες οντότητες μεταφοράς δεδομένων με απώτερο σκοπό την μείωση του κόστους των λειτουργικών δαπανών των παρόχων και την έξυπνη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού.



Εικόνα 5. Αρχιτεκτονική εικονικοποίησης δικτύου

1.3.4 Τεχνολογίες 5G Συστημάτων

Τα συστήματα πέμπτης γενιάς αναμένεται η εμπορική διάθεσή τους το 2020. Αυτό σημαίνει ότι αυτή τη στιγμή βρίσκονται υπό συνεχή έρευνα και μελέτη προκειμένου να μπορέσουν να αντιμετωπίσουν με επιτυχία τις απαιτήσεις που θα δημιουργήσει η τεράστια αύξηση της κίνησης δεδομένων. Αυτή η κίνηση δεδομένων θα προέρχεται κυρίως από την χρήση video και επιπλέον λαμβάνοντας υπόψιν την ανοδική πορεία των πωλήσεων σε συσκευές όπως smartphones, tablets και laptops, αυτό προμηνύει ότι θα δημιουργηθεί επίσης μεγάλη ποσότητα κίνησης ακόμα και από την μεταξύ τους επικοινωνία.

Η έρευνα που πραγματοποιείται σήμερα για τα συστήματα πέμπτης γενιάς για την αντιμετώπιση της κίνησης δεδομένων συνεπάγεται ότι η δομή της αρχιτεκτονικής των 5G συστημάτων δεν είναι ακόμα πλήρως καθορισμένη. Παρ' όλα αυτά υπάρχει μια γενική μορφή της με τις απαιτήσεις που μπορεί να καλύπτει ενώ παράλληλα συνεχίζονται οι έρευνες για τεχνολογίες που θα μπορούν να την εξυπηρετήσουν. Πρακτικά η αρχιτεκτονική των 5G συστημάτων θα οικοδομηθεί από τις τεχνολογίες που θα έχει στην διάθεσή της. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από τις εν λόγω τεχνολογίες:

- Massive Multiple Input – Multiple Output (MIMO): Η τεχνολογία MIMO αξιοποιεί μεγαλύτερο αριθμό κεραιών που συνδέονται τερματικά συστήματα ή ακόμα και κόμβων που παρέχουν πρόσβαση σ' αυτά. Επίσης αυξάνει τον ρυθμό δεδομένων παρέχοντας μεγαλύτερη φασματική απόδοση.
- Caching: Το caching είναι μια τεχνική που θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο μέλλον δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης δεδομένων θα δημιουργείται από την χρήση video. Αρκετά συχνά συναντάμε αιτήσεις που αφορούν το ίδιο περιεχόμενο και απαντώνται εξατομικευμένα σε κάθε χρήστη. Με την βοήθεια του caching το περιεχόμενο θα έρχεται ποιο κοντά στον τελικό χρήστη με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος απόκρισης και ο φόρτος του δικτύου.

- Cloud Computing: Το Cloud Computing είναι μια τεχνολογία που διαμοιράζει τους πόρους του δικτύου μεγιστοποιώντας την αποτελεσματικότητά τους. Συγκεκριμένα οι πόροι του cloud διαμοιράζονται μεταξύ πολλών χρηστών αλλά πραγματοποιείται και δυναμική ανακατανομή βάση ζήτησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η υπολογιστική ισχύ καθώς επίσης να μειώνεται το ενεργειακό κόστος. Οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση και να ανακτούν τα δεδομένα τους από ένα μόνο εξυπηρετητή χωρίς να χρειάζεται να προμηθευτούν με άδειες για διαφορετικές εφαρμογές. Έτσι γίνεται αξιοποίηση των κατανεμημένων υπολογιστικών πόρων με κεντρικό τρόπο διεκπεραιώνοντας λειτουργίες που αφορούν τη σωστή διαχείριση των διαδικτυακών συνδέσεων [16].
- Fog Networking και Computing: Το Fog Networking και Computing είναι μια αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί πλήθος τερματικών συσκευών για αποθήκευση πληροφορίας, επικοινωνίας, ελέγχου και διαχείρισης δικτύου. Η τεχνολογία Fog σε σύγκριση με το Cloud Computing είναι κοντά στους τερματικούς χρήστες, δεν υπόκεινται σε κεντρική διαχείριση και έχει ως κύριο σκοπό την τοπική συγκέντρωση πόρων και μείωση της καθυστέρησης που αντιλαμβάνονται οι τελικοί χρήστες αυξάνοντας έτσι την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας. Ακόμα το Fog υποστηρίζει το IoT το οποίο αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς [17].
- Multipoint transmission: Η τεχνολογία Multipoint transmission αφορά την μεταφορά δεδομένων μεταξύ ενός χρήστη και πολλαπλών δικτυακών σημείων πρόσβασης.
- Coordinated multipoint transmission/reception (CoMP): Η τεχνολογία CoMP αφορά μια ποιο κεντρική διαχείριση μέσω ενός καναλιού για την λήψη των δεδομένων μέσω δικτύου. Οι δέκτες μπορούν να λάβουν και να στείλουν δεδομένα μεταξύ τους αντί να γίνεται εξατομηκευμένη αποστολή δεδομένων σε κάθε χρήστη αυξάνοντας έτσι την απόδοση.
- Μικρές κυψέλες – Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (Small cells - Ultra Dense Networks - UDNs): Αυτή η μέθοδος αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου μειώνοντας το μέγεθος των κυψελών. Έτσι τα δίκτυα αποτελούνται από πικοκυψέλες (με εμβέλεια μικρότερη των 100 μέτρων) και φεμπτοκυψέλες (με παρόμοια εμβέλεια σαν του Wi-Fi) [3]. Έτσι επεκτείνοντας και αναπτύσσοντας αυτούς τους μικρούς κόμβους πρόσβασης, δημιουργείται ένα Ultra Dense Network (UDN) [18].
- Υποστήριξη διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technologies - RATs): Με την τεχνολογία της υποστήριξης διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης τα τερματικά συστήματα θα μπορούν την ίδια στιγμή να έχουν πρόσβαση σε διαφορετικές τεχνολογίες συνδυάζοντας διαφορετικές ροές, όπως να συνδέονται σε πολλές 5G RATs ή ταυτόχρονα σε ζώνες συχνότητες.
- Ετερογενή κυψελωτά δίκτυα (Heterogeneous Cellular Networks - HCNs): Τα ετερογενή κυψελωτά δίκτυα αποτελούνται από Ν βαθμίδες με τυχαία κατανεμημένους σταθμούς βάσης όπου κάθε βαθμίδα μπορεί μα διαφέρει από τις άλλες ως προς τη μέση μετάδοση ισχύος όπως επίσης μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους και οι σταθμοί βάσης.
- Νέο Physical Layer: Το Νέο Physical Layer αποτελείται από νέους τρόπους συγχρονισμού, διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης του σήματος που είναι μακριά από το OFDM

- Machine-to-Machine (M2M): Η τεχνολογία M2M αφορά κεντρικοποιημένα συστήματα τα οποία διαχειρίζονται από ένα κεντρικό σταθμό βάσης. Οι συσκευές μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους αποφορτώνοντας έτσι το δίκτυο.
- Νέες μέθοδοι εντοπισμού δικτυακών κόμβων: Οι νέες μέθοδοι εντοπισμού δικτυακών κόμβων δίνουν την ακριβή θέση των κινητών τερματικών και των κόμβων δικτύου το οποίο είναι πολύ σημαντικό για τα δίκτυα νέας γενιάς.
- Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό (Software Defined Networking - SDN), Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (Network Functions Virtualization - NFV): Η τεχνολογία του SDN και του NFV με χρήση λογισμικού διαμοιράζει πόρους εξοπλισμού και φυσικού επιπέδου. Το δίκτυο εικονικοποιείται απομονώνοντας έτσι το υλικό από το λογισμικό το οποίο επιτρέπει την βέλτιστη χρήση διαθέσιμων πόρων του δικτύου.
- Millimeter Wave (mmWave): Με χρήση της τεχνολογίας mmWave, τα ραδιοκύματα έχουν μήκος κύματος από 1 έως 10 millimeter το οποίο επιτρέπει την χρήση μικρότερων κεραιών μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας το κέρδος. Ακόμα χρησιμοποιείται ποιο αποτελεσματικά το φάσμα για εφαρμογές point-to-multipoint και επίσης θα μπορούσε αυτό το φάσμα να αντικαταστήσει ή να συμπληρώσει τη λειτουργία των οπτικών ινών εξαιτίας της χρήσης περισσότερων καναλιών φωνής ή υψηλότερης συχνότητας για μετάδοση ευρυζωνικής πληροφορίας [19].
- Carrier Aggregation: Η τεχνική Carrier Aggregation χρησιμοποιείται για την αύξηση του εύρους ζώνης που θα έχει ως σκοπό την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δεδομένων. Οι χρήστες και οι σταθμοί βάσης θα μπορούν να χρησιμοποιούν περισσότερες από μια φέρουσες και έτσι θα αυξηθεί το συνολικό εύρος ζώνης για την μετάδοση [20].

1.4 Κυρίαρχες τεχνολογίες

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται με περισσότερη λεπτομέρεια ορισμένες από τις ποιο σημαντικές τεχνολογίες όπως οι mmWave, Massive MIMO, Network Function Virtualization (NFV), Software Defined Networking (SDN), Cloud Computing και Mobile Edge Computing οι οποίες θα ενορχηστρώσουν τα συστήματα πέμπτης γενιάς.

1.4.1 mmWave

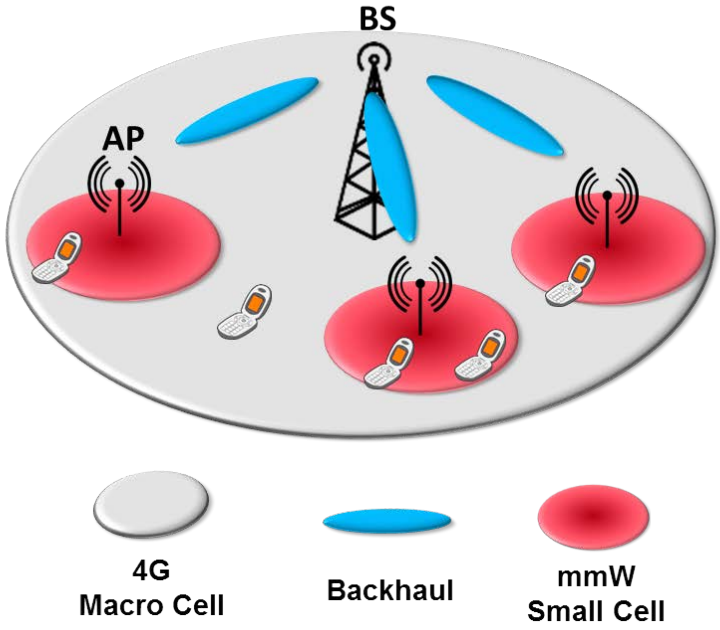
1.4.1.1 Ορισμός και αναγκαιότητα

Η φασματική ζώνη η οποία ονομάζεται “beachfront spectrum” έχει σχετικά μικρό φάσμα μικροκυματικών (microwave) συχνοτήτων το οποίο έχει έκταση από εκατοντάδες MHz έως μερικά GHz και αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από μερικά εκατοστά μέχρι και ένα μέτρο. Σε αυτή τη φασματική ζώνη έχουν περιορίσει τα σημερινά ασύρματα συστήματα επικοινωνιών η οποία είναι πλήρως απασχολημένη τις ώρες αιχμής.

Επομένως είναι αναγκαίο να αυξηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης αξιοποιώντας νέα τμήματα του φάσματος υψηλότερων συχνοτήτων [3]. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, υπάρχουν μεγάλα ποσά αδρανούς φάσματος στη ζώνη που ονομάζονται mmWave και είναι από 30 έως 300GHz [3], [19]. Η ITU χαρακτηρίζει την ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από 30 έως 300GHz ως Ζώνη

Εξαιρετικά Υψηλών Συχνοτήτων (Extremely high frequency - EHF) όπου εκεί τα μήκη κύματος κυμαίνονται από 1 έως 10mm γι' αυτό και ονομάζεται millimeter wave band ή mmWave.

Τα mmWave δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά έχουν μικρή εμβέλεια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για επίγεια επικοινωνία σε εφαρμογές μικρής απόστασης [19]. Ο λόγος είναι ότι έχουν υψηλή ατμοσφαιρική εξασθένηση και απορροφώνται από τον αέρα της ατμόσφαιρας στις περιπτώσεις βροχής, χιονιού εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων τους.



Εικόνα 6. Κυψελωτό σύστημα mmWave

1.4.1.2 Πλεονεκτήματα mmWave

Οι υψηλές συχνότητες των mmWave υπόσχονται υπηρεσίες υψηλής ποιότητας και αύξηση του ρυθμού των δεδομένων. Αναμένεται να αποτελέσουν σημαντικό μέρος των 5G κινητών δικτύων γιατί θα προσφέρουν υπηρεσίες επικοινωνιών πολλών Gigabit το δευτερόλεπτο και επίσης video πολύ μεγάλης ανάλυσης [22], [23].

Όλες οι έρευνες έχουν επικεντρωθεί στις ζώνες των 28GHz, 38GHz, 60GHz και στην E-ζώνη των 71 έως 76GHz και 81 έως 86GHz. Αυτές οι ζώνες αυτές θα μπορούσαν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν και ως συμπληρωματικές στην λειτουργία των οπτικών ινών ή ακόμα και να τις αντικαταστήσουν [19].

Τέλος η mmWave τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί και ως μια ενεργειακά αποδοτική λύση για τις ασύρματες επικοινωνίες το οποίο είναι σημαντικό προσόν για τα συστήματα πέμπτης γενιάς.

1.4.1.3 Προκλήσεις mmWave

Μπορεί η τεχνολογία mmWave να παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όμως υπάρχουν κάποιοι προβληματισμοί σχετικά με την αποδοτικότητά τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αυτοί οι προβληματισμοί και οι προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα κυψελωτά συστήματα mmWave προκειμένου να μπορέσουν να

αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματά τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στα 5G συστήματα:

1) Αναφορικά με την μετάδοση mmWave για την κυψελωτή επικοινωνία τα θέματα που προβληματίζουν είναι τα παρακάτω:
    - Απώλειες διαδρομής: Με την αύξηση της συχνότητας, οι κεραίες θα συρρικνώνονται όμως ως αντιστάθμισμα θα πρέπει να προστίθενται όλο και περισσότερες από αυτές στην αρχική θέση και στη συνέχεια να συγχρονιστούν οι φάσεις όλων αυτών των κεραιών για να συλλέγουν/κατευθύνουν ενέργεια παραγωγικά.
    - Απώλειες μετάδοσης από την ατμόσφαιρα και βροχή: Οι mmWave επικοινωνίες αντιμετωπίζουν μεγάλες απώλειες μετάδοσης από την ατμόσφαιρα και τη βροχή σε σχέση με άλλα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν ποιο χαμηλές συχνότητες. Λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση μικρότερων μεγεθών κυψέλες όπου βελτιώνεται η φασματική απόδοση χωρίς να επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες.
2) Οι στενές και εστιασμένες δέσμες είναι πολύ σύνηθες στην δημιουργία ενός κυψελωτού συστήματος αλλάζοντας βασικές παραμέτρους των κυψελωτών συστημάτων. Για παράδειγμα οι ακτίνες mmWave είναι υψηλά κατευθυντικές πράγμα που αλλάζει εντελώς την συμπεριφορά ως προς τις παρεμβολές.
3) Η εγκατάσταση συνδέσεων μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης κατά την αρχική πρόσβαση και κατά τις μεταπομπές είναι μια πολύ σημαντική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Αυτό γιατί για να εντοπίσει ο χρήστης τον σταθμό βάσης και αντίστροφα για να υλοποιήσουν την μετάδοσή τους, μπορεί ο κάθε ένας να χρειαστεί να σαρώσει πολλές γωνιακές θέσεις προκειμένου να βρεθεί μια στενή δέσμη ή ακόμα και ευρύτερη δέσμη που να περιορίζεται σταδιακά.
4) Η αξιοποίηση των “phantom cells” ή “soft cells” θα μπορούσε να βοηθήσει για να ξεπεραστούν κάποια από τα παραπάνω προβλήματα. Συγκεκριμένα οι mmWave συχνότητες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μεταδίδουν δεδομένα ωφέλιμου φορτίου από σταθμούς βάσης μικρών κυψελών, ενώ το control plane θα λειτουργεί σε μικροκυματικές συχνότητες από μακροσταθμούς βάσης. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζονται σταθερές συνδέσεις ελέγχου με πολύ γρήγορη μετάδοση δεδομένων μέσω συνδέσεων mmWave μικρής εμβέλειας. Έτσι οι συνδέσεις ελέγχου θα παραμένουν σε ισχύ και όσα δεδομένα χάνονται θα μπορούν να ανακτηθούν με επαναμεταδώσεις.
5) Οι mmWave συνδέσεις είναι κατευθυντικές. Για να μπορέσει ο πομπός και ο δέκτης να κατευθύνουν τις ακτίνες τους ο ένας προς την κατεύθυνση του άλλου απαιτείται διαδικασία κατευθυντικότητας της δέσμης και έχουν δημοσιοποιηθεί διάφοροι αλγόριθμοι που μειώνουν τον απαιτούμενο χρόνο υλοποιώντας αυτή τη διαδικασία.
6) Τα σήματα mmWave είναι ευπαθή στη σκιά. Αυτό εγείρει μεγάλο προβληματισμό γιατί για παράδειγμα ορισμένα υλικά όπως το τούβλο μπορεί να προκαλέσει εξασθένιση του σήματος από 40 έως και 80dB [24].
7) Το χρονικό διάστημα που ένα κανάλι μπορεί να διατηρήσει την σταθερότητά του για μια δεδομένη ταχύτητα κίνησης είναι γραμμικό στη φέρουσα συχνότητα, δηλαδή πολύ μικρό στο mmWave φάσμα. Ακόμα δεδομένου ότι τα mmWave συστήματα θα αποτελούνται από μικρές κυψέλες, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα απώλειες διαδρομής. Επομένως η συνδεσιμότητα θα είναι διακοπτόμενη και η επικοινωνία θα πρέπει να προσαρμόζεται γρήγορα.

8) Τα μικρά μήκη κύματος, οι συνδέσεις στην ζώνη των 60GHz παρουσιάζουν μεγάλη ευπάθεια στον αποκλεισμό από εμπόδια. Δεδομένης της ανθρώπινης κινητικότητας και δεδομένου ότι οι συνδέσεις παρουσιάζουν διακοπές, η αξιόπιστη σύνδεση σε εφαρμογές ευαίσθητες καθυστέρησης είναι από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στα mmWave συστήματα.

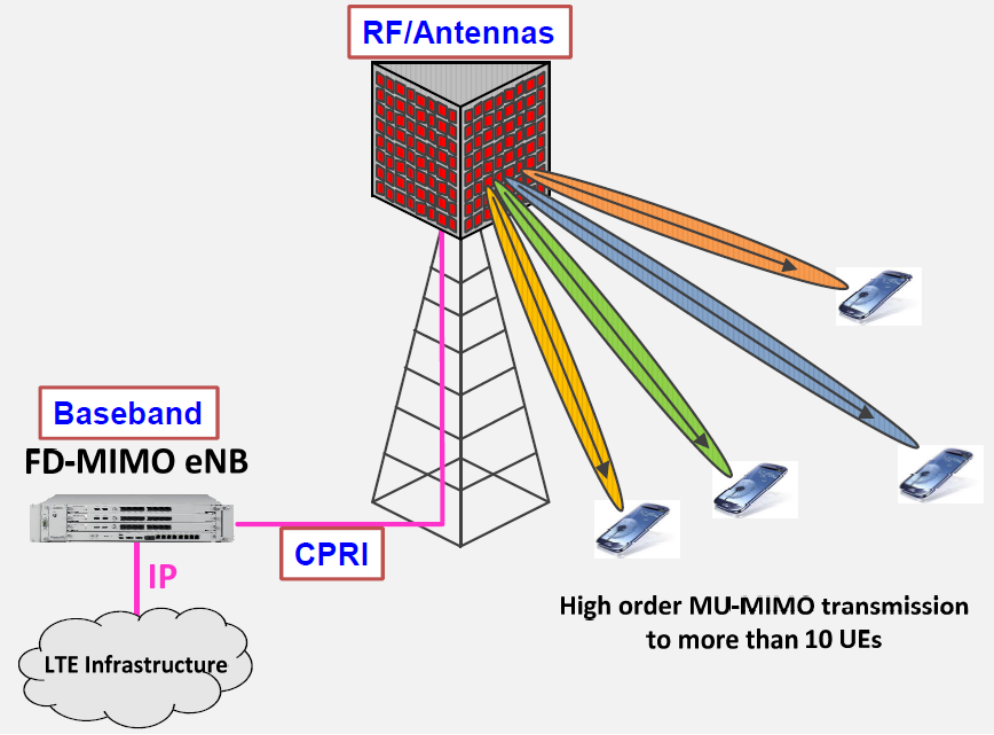
1.4.2 Massive MIMO

1.4.2.1 Ορισμός

Η τεχνολογία Massive MIMO εξοπλίζει τους κυψελωτούς σταθμούς βάσης με ένα μεγάλο αριθμό από κεραίες, με τον αριθμό να ανέρχεται σε εκατοντάδες ανά σταθμό βάσης [3], με σκοπό να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλούς χρήστες βελτιώνοντας έτσι την φασματική απόδοση του συστήματος, μειώνοντας την ισχύ μετάδοσης του και καθιστώντας το ενεργειακά περισσότερο αποδοτικό [25]. Με την χρήση του Massive MIMO, το δίκτυο επωφελείται γιατί μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερους χρήστες με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και μεγαλύτερη αξιοπιστία [26].

Τα συστήματα MIMO μπορεί να είναι:

- MIMO ενός χρήστη (single user MIMO ή SU-MIMO): Στα συστήματα MIMO ενός χρήστη, το πόσες κεραίες μπορούν να φιλοξενηθούν σε μια φορητή συσκευή περιορίζει ανάλογα και τις διαστάσεις της επικοινωνίας.
- MIMO πολλών χρηστών (multiuser MIMO ή MU-MIMO): Στα συστήματα MIMO πολλών χρηστών, κάθε σταθμός βάσης επικοινωνεί με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα και μπορεί το σύστημα να συγκεντρώσει τις κεραίες σε αυτούς τους χρήστες ξεπερνώντας τον περιορισμό της διάστασης της επικοινωνίας.



Εικόνα 7. Σύστημα MIMO πολλών χρηστών

Το Massive MIMO σύστημα είναι ένα είδος συστήματος MIMO πολλών χρηστών με τον αριθμό των κεραιών στο σταθμό βάσης σε σύγκριση με τον αριθμό των συσκευών ανά πόρο σηματοδοσίας να είναι πολύ μεγαλύτερος. Γενικά το σύστημα Massive MIMO αποτελείται από το σταθμό βάσης και τους κινητούς χρήστες ή τον εξοπλισμό χρήστη (user equipment - UE) και υποστηρίζει έως και 20MHz εύρος ζώνης το οποίο αναλογεί σε 64 έως 128 κεραίες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλά UE [26].

1.4.2.2 Πλεονεκτήματα Massive MIMO

Το σύστημα Massive MIMO με την χρήση μεγάλου αριθμού κεραιών, πάνω από 64, θα προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στους ρυθμούς των δεδομένων ασύρματης κίνησης. Επωφελείται όλα τα προνόμια των συμβατικών MIMO συστημάτων και επιπλέον αυξάνει την φασματική και ενεργειακή απόδοση ενώ παράλληλα μειώνει την εκπεμπόμενη ισχύ κατευθύνοντας την ενέργεια σε συγκεκριμένους κινητούς χρήστες το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται και οι παρεμβολές στους άλλους χρήστες.

Επίσης το σύστημα Massive MIMO πλεονεκτεί στο γεγονός ότι κάνει χρήση οικονομικών συστατικών, απλοποιεί το επίπεδο ζεύξης, έχει ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, μειώνει την καθυστέρηση μετατρέποντας τα μελλοντικά 5G δίκτυα ακόμα ποιο γρήγορα και ποιο αξιόπιστα.

1.4.2.3 Προκλήσεις Massive MIMO

Το σύστημα Massive MIMO αναδεικνύει νέες προκλήσεις οι οποίες είναι πολύ σημαντικές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πρόκληση της δημιουργίας πολλών συστατικών χαμηλού κόστους και ακριβείας, λόγω των πολλών στοιχείων κεραιών που θα απαρτίζεται, τα οποία θα συνεργάζονται αποτελεσματικά. Άλλη πρόκληση είναι ο συγχρονισμός των τερματικών που έχουν ενταχθεί πρόσφατα, η μείωση της κατανάλωσης ισχύος για να επιτευχθεί μείωση κατανάλωση ενέργειας συνολικά [26], η κλιμάκωση των διαύλων δεδομένων και κατανεμημένος συγχρονισμός του μεγάλου αριθμού των πομποδεκτών.

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικότερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η τεχνολογία Massive MIMO:

1) Στο σύστημα Massive MIMO σε κάθε τερματικό εκχωρείται μια πιλοτική ακολουθία. Όμως το πόσες πιλοτικές ακολουθίες θα εκχωρηθούν έχει κάποιο όριο το οποίο σημαίνει ότι είναι εύκολο αυτές οι ακολουθίες να εξαντληθούν σ' ένα σύστημα πολλών κυψελών. Έτσι αν επαναχρησιμοποιούνται από την μια κυψέλη στην άλλη (πιλοτική μόλυνση ή pilot contamination) θα δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ των πιλοτικών ακολουθιών πράγμα το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί.
2) Το σύστημα Massive MIMO βασίζεται στο favorable propagation το οποίο σημαίνει ότι οι αποκρίσεις από το σταθμό βάσης του καναλιού μετάδοσης είναι διαφορετικές σε διαφορετικά τερματικά συστήματα. Οπότε οι μετρήσεις καναλιού θα πρέπει να γίνονται με ρεαλιστικές διατάξεις κεραιών για την μελέτη της συμπεριφοράς του Massive MIMO.
3) Η αρχιτεκτονική του συστήματος Massive MIMO είναι ίσος η ποιο σοβαρή πρόκληση γιατί πρέπει να διευθετηθούν θέματα όπως επεκτασιμότητα, συσχετίσεις κεραιών και το κόστος.
4) Τα μοντέλα καναλιού είναι μια ακόμα πρόκληση για το Massive MIMO σύστημα μιας και απαιτούν εκτενείς μετρήσεις για να προσδιοριστούν κατάλληλα. Δηλαδή

θα πρέπει να μοντελοποιηθεί με σχετικές τοπολογίες η συσχέτιση των κεραιών και των μαζικών διατάξεων.

5) Οι σταθμοί βάσης των Massive MIMO συστημάτων ενδεχομένως να μπορούν να συνυπάρξουν με μικρές κυψέλες. Παρόλο που θα μπορούσε να γίνει ο διαχωρισμός των μεταδόσεων με βάση τη συχνότητα, εντούτοις ο μεγάλος αριθμός κεραιών στους σταθμούς βάσης Massive MIMO ενδεχομένως να βοηθήσει στην αποφυγή παρεμβολών. Αυτό όμως για να επιβεβαιωθεί πλήρως απαιτείται να δημιουργηθούν ολοκληρωμένα μοντέλα καναλιού.

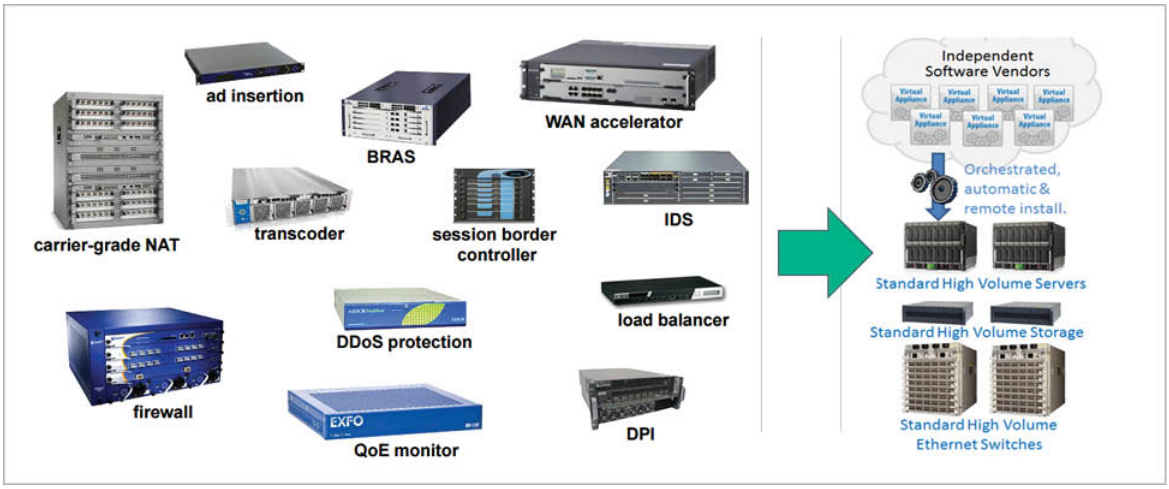
1.4.3 Network Function Virtualization (NFV)

1.4.3.1 Ορισμός

Η αυξανόμενη κίνηση δεδομένων, η ανάπτυξη νέων καινοτόμων υπηρεσιών ανεβάζουν κατά πολύ τις απαιτήσεις δικτύου σε υλικό εξοπλισμό προκειμένου να υποστηριχθούν αυτές οι νέες λειτουργίες. Αυτό έχει αποτέλεσμα τα δίκτυα να γίνονται ποιο περίπλοκα οδηγώντας τους παρόχους να προβούν σε πολύ μεγάλες επενδύσεις προκειμένου να τα αναπτύξουν και να τα επεκτήνουν. Η αύξηση όμως στο πλήθος των συσκευών συνεπάγεται και αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη από τους παρόχους από πλευράς εξόδων, καθώς επίσης και εύρεση του απαραίτητου χώρου για να εγκατασταθούν όλες αυτές οι συσκευές [27], [28].

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προτάθηκε μια νέα τεχνολογική λύση που ονομάζεται Network Function Virtualization (NFV) στο παγκόσμιο συνέδριο για τα Software Defined Networks και το OpenFlow [28].

Το Network Function Virtualization (NFV) αξιοποιεί την τεχνολογία εικονικοιποίησης αντικαθιστώντας δικτυακές συσκευές όπως δρομολογητές, μεταγωγείς, εξισορροπητές φόρτου (load balancers) και τείχη προστασίας (firewalls) με αντίστοιχες εικονικές μηχανές (virtual machines) εκτελώντας τις ίδιες ακριβώς λειτουργίες. Αυτές οι εικονικές μηχανές (VMs) φιλοξενούνται σε εξυπηρετητές (servers), σε αποθηκευτικές μονάδες που βρίσκονται σε Κέντρα Δεδομένων (Data Centers), σε δικτυακούς κόμβους ακόμα και στον εξοπλισμό των τελικών χρηστών [27].



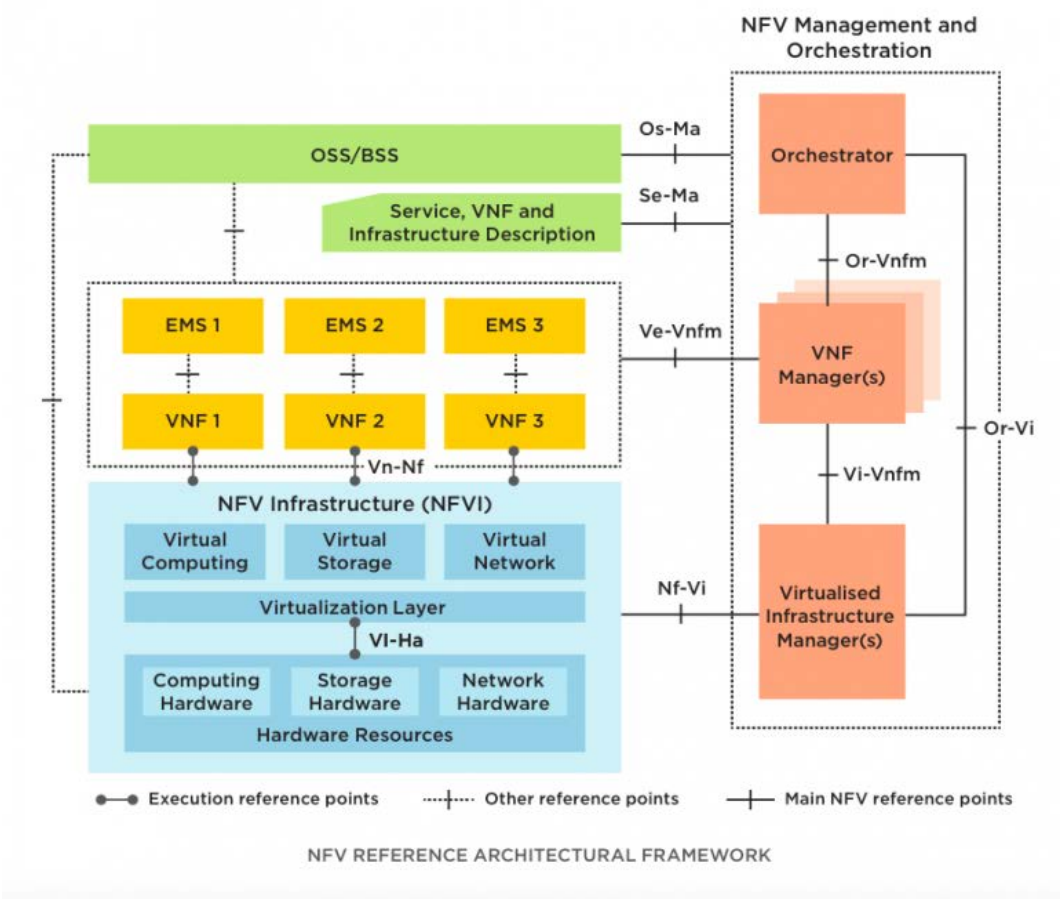
Εικόνα 8. Προσέγγιση NFV δικτύου

Επίσης το NFV μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε δίκτυα κινητών όσο και σταθερών επικοινωνιών, τόσο στο πεδίο ελέγχου (control plane, δηλαδή στο σύστημα που παίρνει τις αποφάσεις για την κατανομή της κίνησης) όσο και στο πεδίο δεδομένων (data plane,

δηλαδή τα υποκείμενα συστήματα που προωθούν την κίνηση στον επιλεγμένο προορισμό) μειώνοντας έτσι σημαντικά τον απαιτούμενο υλικό εξοπλισμό των δικτυακών υποδομών. Πρακτικά οι εκάστοτε υπηρεσίες θα υποστηρίζονται από λογισμικό το οποίο θα εκτελείται σε εξοπλισμό μεγάλης υπολογιστικής ισχύος.

1.4.3.2 Αρχιτεκτονική NFV

Η NFV αρχιτεκτονική για να υποστηρίζει το περιβάλλον της εικονικοποίησης βασίζεται σε εξοπλισμό λογισμικού (software) και υλικού (hardware). Το περιβάλλον εικονικοποίησης περιλαμβάνει τεχνικές όπως containers (εικονικές μηχανές που συνίστανται από σύνολο άλλων εικονικών μηχανών), εικονικές Μονάδες Κεντρικής Επεξεργασίας (vCPUs), εικονικές μονάδες αποθήκευσης (vStorage) και εικονικούς μεταγωγείς (vSwitches). Ακόμα η NFV αρχιτεκτονική περιλαμβάνει το απαραίτητο πλαίσιο προκειμένου να παραπάνω στοιχεία να μπορούν τόσο να συνεργάζονται μεταξύ τους όσο και με άλλα εκτός του δικτυακού περιβάλλοντος NFV.



Εικόνα 9. Αρχιτεκτονική NFV

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την αρχιτεκτονική NFV η οποία αποτελείται από τα παρακάτω μέρη [27], [28], [29], [30]:

- Network Functions Virtualization Infrastructure (NFVI): Το NFVI αποτελείται από τμήματα υλικού και λογισμικού και μέσω αυτών παρέχει όλες τις Εικονικές Δικτυακές Λειτουργίες (Virtualized Network Functions, VNF). Το τμήμα υλικού περιλαμβάνει servers, μεταγωγείς και μονάδες αποθήκευσης ενώ το τμήμα λογισμικού είναι υπεύθυνο για την εικονικοποίηση των πόρων υλικού.

- Virtualized Network Function (VNF): Το VNF εκτελείται πάνω από το NFVI και αποτελεί την υλοποίηση των δικτυακών λειτουργιών μέσω λογισμικού. Δηλαδή, μπορεί να λαμβάνει τον ρόλο ενός δικτυακού κόμβου με την διαφορά ότι αποτελείται από λογισμικό και όχι υλικό.
- Network Functions Virtualization Management and Orchestration: Το NFV Management και Orchestration διαχειρίζεται και συντονίζει τόσο τους φυσικούς όσο και τους εικονικούς πόρους που συνθέτουν το NFV εστιάζοντας στις λειτουργείες εικονικοποίησης του υλικού εξοπλισμού. Επίσης αποτελεί την γέφυρα μεταξύ του δικτύου NFV και του δικτύου του παρόχου μέσω του Operations Support System (OSS) και του Business Support System (BSS). Το NFV Management και Orchestration αποτελείται από τις εξής λειτουργικές μονάδες:
    - Orchestrator: Ο Orchestrator είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των Δικτυακών Υπηρεσιών και τον συντονισμό των NFVI μέσω των εκάστοτε Virtual Infrastructure Managers (VIMs)
    - Virtualized Network Function Managers (VNFM): Ο VNFM είναι υπεύθυνος για την διαχείριση του κύκλου ζωής των Εικονικών Δικτυακών Λειτουργιών (VNFs)
    - Virtual Infrastructure Manager (VIMs): Ο VIM είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του NFVI εντός του δικτύου του παρόχου σε θέματα υπολογιστικών, αποθηκευτικών και δικτυακών πόρων

1.4.3.3 Σενάρια Χρήσης

Τα σενάρια χρήσης του NFV καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα το οποίο ξεκινάει από τα δίκτυα κινητών έως τα δίκτυα σταθερών και από το control plane έως το data plane. Συγκεκριμένα, ορισμένα από τα σενάρια χρήστης είναι τα εξής:

- Εικονικοποίηση κόμβων Δικτύου Κορμού των κινητών επικοινωνιών: Το σενάριο αυτό αποτελεί το επικρατέστερο γιατί η εικονικοποίηση των κόμβων δικτύου κορμού των κινητών επικοινωνιών οδηγεί σε αποτελεσματική χρήση των δικτυακών πόρων, πιο ευέλικτη διαχείρισή τους, αφού δεν θα υπάρχει απαίτηση για μεταβολές στο υλικό σε τυχόν αναβαθμίσεις κόμβων, ρύθμιση νέων υπηρεσιών πιο γρήγορα και άμεσα και τέλος στη μείωση του υλικού (hardware) το οποίο συνεπάγεται σε εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους συντήρησης από την πλευρά των παρόχων. Η δέσμευση των πόρων για την εξυπηρέτηση των λειτουργιών δικτύου πραγματοποιείται μέσω μιας κεντρικής δεξαμενής πόρων (resource pooling) καθώς επίσης και η εγκαθίδρυση εικονικών μηχανών [27], [29], [31].
- Εικονικοποίηση κόμβων Δικτύου Πρόσβασης των κινητών επικοινωνιών: Το σενάριο αυτό, όμοια με το δίκτυο κορμού, με την εφαρμογή της NFV τεχνολογίας εστιάζει στους σταθμούς βάσεις πραγματοποιώντας ολόκληρης της λειτουργίας τους με χρήση λογισμικού. Επίσης με αυτή την τεχνολογία θα μπορούν να συνυπάρξουν λειτουργίες διαφορετικών τεχνολογιών όπως π.χ 2G, 3G, LTE, 5G στο ίδιο υλικό [27], [29].
- Εικονικοποίηση λειτουργιών Δικτύου Πρόσβασης σταθερών επικοινωνιών: Το σενάριο αυτό αφορά δίκτυα πρόσβασης σταθερών επικοινωνιών καθώς θα μπορούν να εικονικοποιηθούν κόμβοι που τοποθετούνται πάνω σε πυλώνες ρεύματος, κάτω από το έδαφος κ.λ.π μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας

και τον απαιτούμενο εξοπλισμό και κάνοντας ευκολότερη τη διαχείριση τους. Επίσης θα μπορούσε να συνυπάρξει κάτω από το ίδιο υλικό λειτουργίες σταθερών και ασύρματων δικτύων πρόσβασης ίδιου ή και διαφορετικού παρόχου [29].

- Εικονικοποίηση δικτύων Διανομής Περιεχομένου: Το σενάριο αυτό αφορά την εικονικοποίηση των δικτύων Διανομής Περιεχομένου (Content Delivery Networks, CDN). Γενικά οι πάροχοι των CDNs τοποθετούν cache servers κοντά στα τελικά δίκτυα με το δημοφιλέστερο περιεχόμενο έτσι ώστε να βελτιώσουν τις υπηρεσίες τους και την εμπειρία χρήστη. Εικονικοποιώντας τις CDN caches κάτω από το ίδιο hardware, είναι δυνατόν να γίνεται διαμοιρασμός των πόρων του υλικού μεταξύ το ίδιου ή και πολλών διαφορετικών CDN παρόχων το οποίο οδηγεί σε εξοικονόμηση πόρων ακόμα και σε βελτίωση της διεκπραιωτικής ικανότητας τους CDN δικτύου εξασφαλίζοντας ακόμα μικρότερες καθυστερήσεις και πολύ καλύτερη εμπειρία χρήστη [27], [29], [31].
- Εικονικοποίηση οικιακού περιβάλλοντος: Το σενάριο αυτό αφορά την εικονικοποίηση του οικιακού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, σε οικιακά ή και επαγγελματικά περιβάλλοντα με την εφαρμογή του NFV στόχος είναι να μετατοπιστούν ορισμένες λειτουργίες εκτός αυτών όπως για παράδειγμα routers, residential gateways, Wi-Fi hotspots κ.α και να εκτελούνται στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Έτσι αντιμετωπίζονται προβλήματα εγκατάστασης, αναβάθμισης, συντήρησης εξοπλισμού και θα μπορεί να οδηγεί σε ομαλότερη μετάβαση νέων πρωτοκόλλων όπως για παράδειγμα το IPv6 [27], [29].
- Χρήση του VNFs για παροχή υπηρεσιών Ασφάλειας και Ανάλυσης κίνησης: Το NFV μέσω των Virtualized Network Functions μπορεί να προσφέρει αντίστοιχες υπηρεσίες όπως Firewalls, Secure Socket Layer (SSL), Virtual Private Network (VPN) gateways, virus scanners για τυχόν ανιχνεύσεις ιών κ.α.

1.4.3.4 Οφέλη και Προκλήσεις της NFV τεχνολογίας

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά ορισμένα από τα οφέλη που έχει η χρήση της NFV τεχνολογίας και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι πάροχοι δικτύων σε τεχνικό επίπεδο κατά την εφαρμογή της. Συγκεκριμένα, έχουμε τα παρακάτω οφέλη:

1) Μέσω της χρήσης υλικού υψηλών επιδόσεων αντί για μεμονωμένων συσκευών ανά δικτυακή λειτουργία, μειώνεται το κόστος εξοπλισμού του παρόχου καθώς επίσης και η κατανάλωση ενέργειας
2) Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της ίδιας υποδομής/πλατφόρμας για πολλές διαφορετικές εφαρμογές και λειτουργίες καθώς επίσης και διαφορετικούς παρόχους.
3) Υπάρχει η δυνατότητα για γρηγορότερη αναβάθμιση των κόμβων δικτύου καθώς επίσης οποιεσδήποτε νέες δικτυακές καινοτομίες θα μπορούν να είναι σε λιγότερο χρόνο διαθέσιμες προς χρήση
4) Ευελιξία στην διαχείριση του δικτύου
5) Κλιμάκωση των υπηρεσιών βάση ζήτησης

Οι προκλήσεις είναι οι ακόλουθες:

1) Υλοποίηση συσκευών υψηλών επιδόσεων για εικονικοποίηση με δυνατότητες φορητότητας υλικού μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών καθώς επίσης ανθεκτικότητα από τυχόν βλάβες του υλικού και του λογισμικού
2) Δυνατότητα εγκατάστασης συσκευών NFV δικτύων διαφορετικών κατασκευαστών
3) Συνεργασία των εικονικοποιημένων κόμβων ενός δικτύου με τους ήδη εγκατεστημένους κόμβους για ομαλή σταδιακή μετάβαση σε ένα εικονικοποιημένο δίκτυο
4) Διαχείριση εικονικών συσκευών με έμφαση στην προστασία αυτών από οποιεσδήποτε επιθέσεις
5) Αυτοματοποίηση των λειτουργιών του NFV συνεπάγεται κλιμάκωση αυτού

1.4.4 Software Defined Networking (SDN)

1.4.4.1 Ορισμός

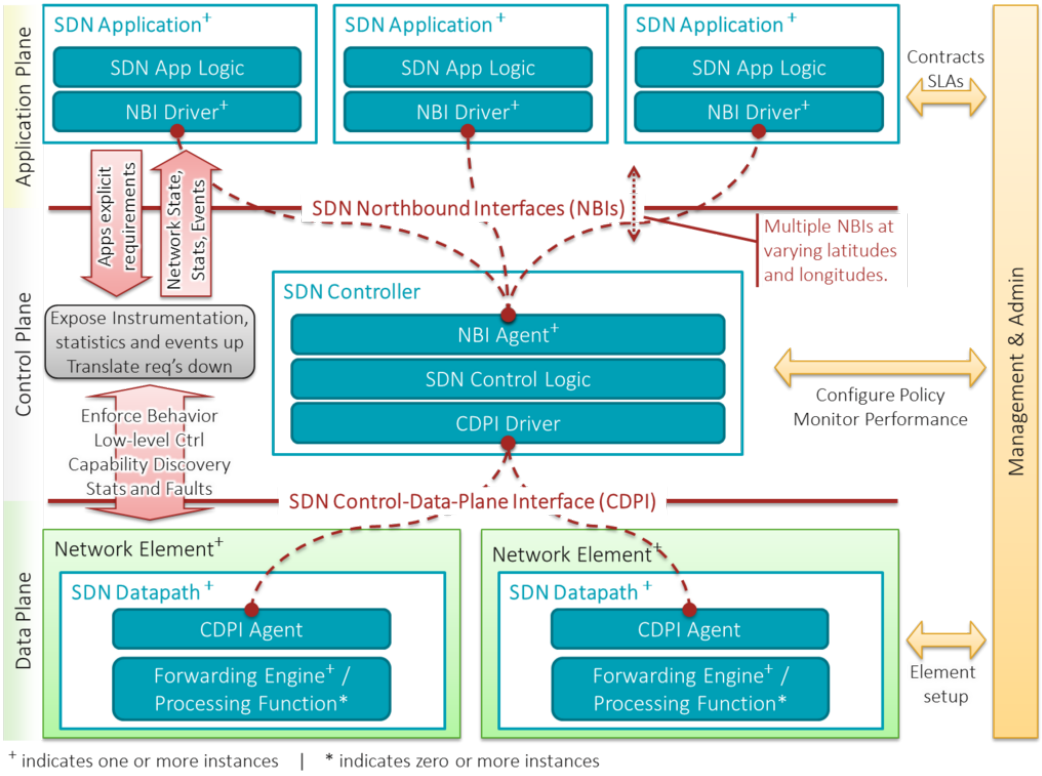
Για να εξυπηρετηθεί η ολοένα και αυξανόμενη κίνηση δεδομένων, τα δίκτυα αναγκάζονται να γίνουν πιο πυκνά ή και πιο περίπλοκα. Ακόμα εκτός των φυσικών συσκευών εγκαθίστανται και εικονικές συσκευές στα πλαίσια της εικονικοποίησης του δικτύου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διαχείριση του δικτύου να δυσκολεύει όλο και περισσότερο τόσο από άποψη ασφάλειας όσο και από άποψη πολιτικής διαχείρισης. Λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνει η ανάπτυξη της Δικτύωσης Οριζόμενης από Λογισμικό (Software Defined Networking, SDN).

Το SDN κάνει ποιο ευέλικτα και πιο οικονομικά τα σημερινά στατικά δίκτυα καταργώντας την πολυπλοκότητά τους. Με την αρχιτεκτονική προσέγγιση του SDN γίνεται ο διαχωρισμός του control plane από το data plane και δίνεται η δυνατότητα στο control plane να είναι προγραμματίσιμο. Το control plane στη συνέχεια μεταφέρεται από τις δικτυακές συσκευές σε κεντρικές υπολογιστικές μονάδες δημιουργώντας έτσι μια αφαίρεση στο δίκτυο (abstraction). Στην SDN αρχιτεκτονική, όλη η λογική του δικτύου είναι συγκεντρωμένη σε μια οντότητα λογισμικού που ονομάζεται SDN Controller και με βάση αυτή την κεντρικοποιημένη αρχιτεκτονική, γίνεται ευκολότερος ο σχεδιασμός και η διαχείριση του δικτύου. Επίσης το SDN απλοποιεί όλες τις δικτυακές συσκευές γιατί δεν χρειάζεται πλέον η κάθε μια να διαχειρίζεται πολλαπλά πρωτόκολλα δικτύου, αλλά αρκεί μόνο να παίρνει εντολές από τον SDN Controller και να τις εκτελεί.

Με την κεντρικοποίηση του control plane που παρέχει το SDN δίνει την δυνατότητα στους διαχειριστές δικτύου να διαχειριστούν, να ρυθμίσουν και να βελτιώσουν την απόδοση των δικτυακών πόρων μέσω προγραμμάτων τα οποία είναι δυνατόν να αναπτυχθούν και από τους ίδιους.

1.4.4.2 Αρχιτεκτονική SDN

Η αρχιτεκτονική SDM σύμφωνα με το Open Networking Foundation (ONF) αποτελείται από τα επίπεδα: 1) επίπεδο εφαρμογής (application plane), 2) επίπεδο ελέγχου (control plane) και 3) το επίπεδο δεδομένων (data plane) όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 10. Αρχιτεκτονική SDN

Από τα παραπάνω επίπεδα, τα βασικότερα συστατικά στοιχεία τους παρουσιάζονται στη συνέχεια και είναι τα εξής [32]:

- SDN Εφαρμογές (SDN Application): Οι SDN εφαρμογές αποτελούν το επίπεδο της εφαρμογής και είναι προγράμματα τα οποία μέσω των NBIs επικοινωνούν με τον SDN Controller για να ενημερώσουν σχετικά με τις δικτυακές τους απαιτήσεις.
- SDN Ελεγκτής (SDN Controller): Ο SDN Controller είναι η βασικότερη μονάδα στο επίπεδο ελέγχου. Αποτελείται από ένα ή περισσότερους NBI Agents (πράκτορες) και ένα CDPI driver. Τα καθήκοντα του SDN Controller είναι τα παρακάτω:
    - Να μεταφράζει τις δικτυακές απαιτήσεις των SDN εφαρμογών και να τις μεταβιβάσει στο ποιο κάτω επίπεδο, δηλ στα SDN Datapaths
    - Να παρέχει αφαίρεση (abstraction) του δικτύου από το επίπεδο εφαρμογής παρέχοντας τα κατάλληλα στατιστικά και γεγονότα από τη πλευρά του δικτύου προς το πιο πάνω επίπεδο

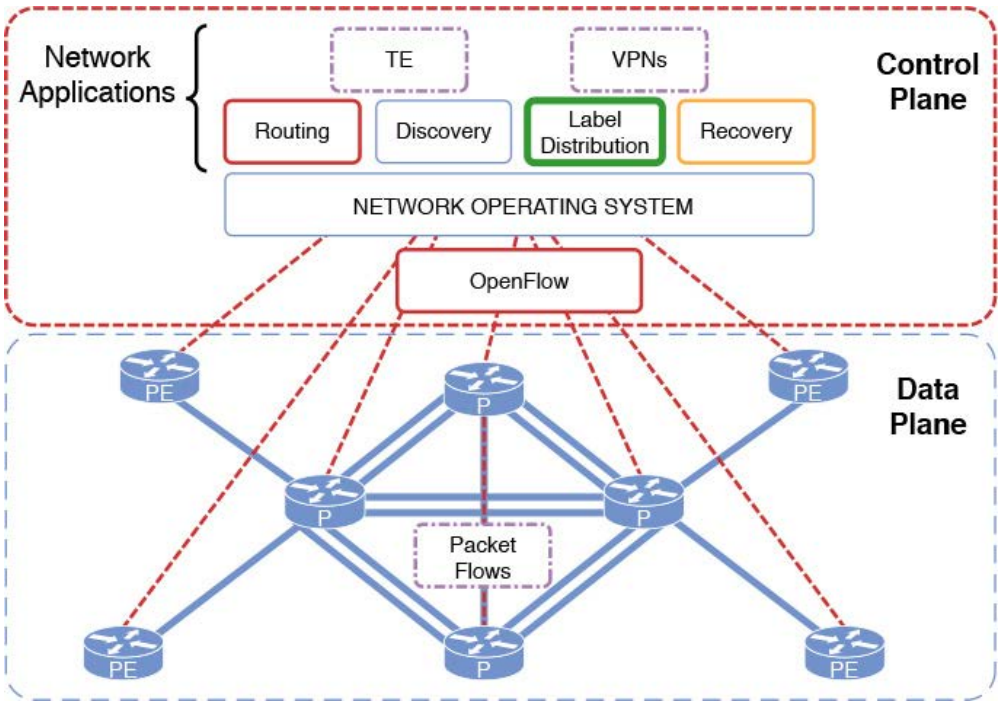
  Τέλος ο SDN Controller μπορεί να είναι τόσο κεντρικοποιημένος όσο και να έχει ιεραρχική δομή από πολλούς SDN Controllers.
- Μονοπάτι δεδομένων SDN (SDN Datapath): Το SDN Datapath αποτελείται από ένα CDPI agent καθώς και από ένα σύνολο λειτουργιών επεξεργασίας και προώθησης και δρομολόγησής της κίνησης δεδομένων καθιστώντας το μια λογική συσκευή δικτύου. Μέσα σε μια φυσική δικτυακή συσκευή ή σε πολλές κατανεμημένα μπορεί να είναι υλοποιημένα ένα ή περισσότερα SDN Datapaths.
- Διεπαφή SDN μεταξύ ελέγχου και δεδομένων (SDN Control to Data-Plane Interface, CDPI): Η SDN CDPI διεπαφή βρίσκεται μεταξύ του του SDN Controller

και του SDN Datapath, είναι ανοιχτού λογισμικού και προφέρει μεγάλη ευελιξία στο δίκτυο. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι το πρωτόκολλο Openflow. Το SDN CDPI παρέχει τα εξής:

- Έλεγχο όλων λειτουργιών προώθησης
- "Διαφήμιση" των υπηρεσιών του SDN Datapath
- Αναφορά δικτυακών στατιστικών
- Ενημέρωση γεγονότων δικτύου

- Διεπαφές SDN ανωτέρου επιπέδου (SDN Northbound Interfaces, NBI): Η SDN NBI διεπαφή βρίσκεται μεταξύ του SDN Application επιπέδου και του SDN Controller. Γνωστοποιεί τις απαιτήσεις των εφαρμογών στον SDN Controller και παρέχει μια αφαίρεση της κατάστασης του δικτύου στο επίπεδο της εφαρμογής.
- Οδηγοί διασύνδεσης και πράκτορες (Interface Drivers and Agents): Οι διεπαφές αποτελούνται από τους drivers και του agents τους με τον driver να αναπαριστά το κατώτερο επίπεδο και τον agent το ανώτερο επίπεδο.

1.4.4.3 Πρωτόκολλο Openflow



Εικόνα 11. Το Openflow στην SDN αρχιτεκτονική

Το πρωτόκολλο Openflow όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα, είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του control plane και του data plane. Δηλαδή συνδέει την επικοινωνία του επιπέδου που λαμβάνονται οι αποφάσεις για την λειτουργία του δικτύου και του επιπέδου που υλοποιούνται αυτές. Το Openflow παρέχει σε όλες τις συσκευές του δικτύου από οποιοδήποτε προμηθευτή και αν προέρχονται αποδοτικό έλεγχο στη κίνηση των δεδομένων. Για να αναγνωρίζει αυτή την δικτυακή κίνηση χρησιμοποιεί την τεχνική των ροών βάση ορισμένων κανόνων που του προσδιορίζει ο SDN Controller. Μπορεί να εκτελεστεί τόσο στην πλευρά του SDN Controller όσο και στην πλευρά του SDN Datapath έχοντας άμεση πρόσβαση και διαχείριση των δικτυακών συσκευών όπως μεταγωγείς επιπέδου ζεύξης και δρομολογητές είτε είναι

εικονικές είτε φυσικές συσκευές. Έτσι επιτυγχάνεται σε μια κεντρικοποιημένη μονάδα που βασίζεται σε λογισμικό να συγκεντρώνονται όλες οι λειτουργίες ελέγχου. Το Openflow παρέχει μεγάλη ευελιξία στους διαχειριστές δικτύων γιατί παρέχει δυναμικό τρόπο προγραμματισμού του δικτύου. Για παράδειγμα μπορεί να καθορίζει το μέγιστο ποσό κίνησης που μπορεί να δέχεται κάθε δικτυακή συσκευή [33].

1.4.4.4 Σενάρια Χρήσης

Τα σενάρια χρήσης της τεχνολογίας SDN καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα το οποίο περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω. Συγκεκριμένα η τεχνικές SDN μπορούν να εφαρμοστούν στα εξής [33], [34]:

- Σε κέντρα δεδομένων: Η αρχιτεκτονική SDN επιτρέπει στα κέντρα δεδομένων την αύξηση της κλιμάκωσης μεταβαίνοντας σε εικονικές μηχανές (VMs), βέλτιστη αξιοποίηση των servers, του εύρους ζώνης και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας
- Στο WAN (Wide Area Networks) και LAN (Local Area Networks): Η αρχιτεκτονική SDN στο σενάριο των WAN και LAN δίνει τις παρακάτω δυνατότητες στα ασύρματα δίκτυα:
    - Για την υποστήριξη μιας ασύρματης σύνδεσης είναι δυνατή η δέσμευση επιπρόσθετου φάσματος κατά απαίτηση
    - Η απόδοση σε μια SDN αρχιτεκτονική μπορεί να προσφέρεται ως υπηρεσία και το δίκτυο να ελέγχει και να διασφαλίζει δυναμικά την απαραίτητη χωρητικότητα για τις εφαρμογές τηρώντας βέβαια το επίπεδο απόδοσης που έχει προσυμφωνηθεί
    - Αποφόρτιση του δικτύου δίνοντας την δυνατότητα στη κίνηση δεδομένων να διέρχεται μόνο από τις συσκευές που τις αφορά εξοικονομώντας έτσι πόρους
    - Δυναμική εγκατάσταση εικονικών δικτυακών στοιχείων για την ενίσχυση μιας δικτυακής υποδομής προκειμένου να υποστηρίζεται επιπρόσθετη κίνηση
    - Τμηματοποίηση του φυσικού δικτυακού εξοπλισμού προκειμένου να εγκαθιδρύονται εικονικά δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών που υποστηρίζουν διαφορετικά πρωτόκολλα προσφέροντας διαφορετικές υπηρεσίες
- Στους Παρόχους υπηρεσιών: Η αρχιτεκτονική SDN στο σενάριο των παρόχων υπηρεσιών τους παρέχει κλιμάκωση, αυτοματοποίηση και τους εξασφαλίζει ότι οι πόροι δεσμεύονται και χρησιμοποιούνται με το βέλτιστο δυνατό τρόπο μειώνοντας έτσι το κόστος των παρόχων.
- Στο Cloud: Η αρχιτεκτονική SDN στο σενάριο του Cloud επιτρέπει την ελαστική δέσμευση δικτυακών πόρων καθιστώντας δυνατή την πρόβλεψη των υπηρεσιών του

1.4.4.5 Πλεονεκτήματα της SDN Αρχιτεκτονικής

Η SDN αρχιτεκτονική προσφέρει σε ένα δίκτυο μια κεντρικοποιημένη διαχείριση των διαδικασιών ελέγχου του καθώς επίσης δίνεται η δυνατότητα στην δικτυακή κίνηση να είναι εύκολα προγραμματίσιμη παρέχοντας μεγάλη αυτοματοποίηση, απλοποίηση και

ευελιξία στη συνολική επίβλεψη του δικτύου. Το σημαντικότερο είναι ότι η SDN αρχιτεκτονική μπορεί να συμβαδίσει με τις ταχύτατες αλλαγές της τεχνολογίας που αφορούν την μελλοντική δικτύωση. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που αφορούν την χρήση της SDN αρχιτεκτονικής [49], [50]:

- Επειδή η λειτουργίες του SDN βασίζονται σε λογισμικό, είναι ποιο εύκολη η επεκτασιμότητα του συστήματος
- Οι τεχνικές SDN μέσω του SDN Controller παρέχουν κεντρικές υπηρεσίες ασφάλειας. Ο SDN Controller μπορεί γρήγορα και αποτελεσματικά να παρέχει όλες τις αναγκαίες πληροφορίες σχετικά με τις πολιτικές ασφαλείας. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ σημαντική γιατί σε περιβάλλοντα που εφαρμόζεται η εικονικοποίηση το να εφαρμόζονται φίλτρα και firewalls σε εικονικές μηχανές που δεσμεύονται δυναμικά είναι πολύ δύσκολο
- Με το διαχωρισμό του control plane από το data plane, η διαχείριση των εικονικών και φυσικών συσκευών γίνεται ποιο ευέλικτη και απλούστερη. Επίσης με την SDN αρχιτεκτονική έχοντας μια κεντρική μονάδα για το συνολικό έλεγχο του δικτύου είναι ευκολότερη η διαχείριση του και οι λήψη αποφάσεων
- Οι διαχειριστές δικτύων με την χρήση των SDN τεχνικών μπορούν να πραγματοποιήσουν κεντρικά τις απαραίτητες ρυθμίσεις δικτύου χωρίς να χρειάζεται να ρυθμίσουν κάθε μια συσκευή ξεχωριστά. Έτσι μπορεί να πραγματοποιηθεί η αναβάθμιση του δικτύου μέσα σε λίγες μόνο ώρες ή και μέρες δίνοντας την δυνατότητα να υποστηρίζονται άμεσα οι νέες υπηρεσίες και εφαρμογές
- Οι πάροχοι δικτυακών υπηρεσιών κάνοντας χρήση των SDN τεχνικών έχουν καλύτερο έλεγχο των εικονικών τους συσκευών και αποτελεσματικότερη χρήση αυτών το οποίο οδηγεί σε μείωση λειτουργικών εξόδων τους. Ακόμα μπορούν να εγκαταστήσουν στην ίδια υποδομή τόσο διαφορετικών τύπων δικτύων όσο και να τοποθετήσουν εξοπλισμό με περιορισμένες δυνατότητες από άποψη λογισμικού γιατί όλη η πολυπλοκότητα και η λογική του δικτύου βρίσκεται στον Controller
- Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του SDN είναι η παροχή εγγυήσεων στη διάθεση υπηρεσιών περιεχομένου. Αυτό επιτυγχάνεται με την δυνατότητα του SDN να ρυθμίζει και να ελέγχει τις ροές δεδομένων καθώς επίσης και με την δέσμευση κατά απαίτηση φάσματος και χωρητικότητας προκειμένου να παρέχει εγγυήσεις υπηρεσίας (QoS) σε εφαρμογές ευαίσθητες χρόνου όπως πολυμεσικές υπηρεσίες, live streaming και VoIP.

1.4.4.6 Προκλήσεις

Μπορεί η SDN αρχιτεκτονική να έχει πολλά πλεονεκτήματα, όμως έχει να αντιμετωπίσει και σημαντικές προκλήσεις στους ακόλουθους τομείς [51]:

- Κλιμάκωση: Η συγκέντρωση όλου του control plane σε μια κεντρική μονάδα αποτελεί από μόνο του μεγάλη πρόκληση. Η κλιμάκωση μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ιεραρχίας ή φάρμας από controllers οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για αυτό το επίπεδο
- Απόδοση: Στο χώρο της δικτύωσης η απόδοση είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα αλλά και ο τελικός στόχος γιατί μπορεί εξαιτίας του διαχωρισμού του control plane από το data plane να έχουμε καθυστερήσεις σε μεγάλα δίκτυα

- Διαλειτουργικότητα: Η μετάβαση από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική στην αρχιτεκτονική SDN δεν μπορεί να γίνει ακαριαία, αλλά θα χρειαστεί να υπάρξει μια μεταβατική περίοδος όπου θα πρέπει να υπάρχει αλληλεπίδραση των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών με το SDN.
- Ασφάλεια: Σε μια SDN αρχιτεκτονική, ο SDN Controller είναι υπεύθυνος για τις πολιτικές ασφαλείας του δικτύου και κατά συνέπεια θα πρέπει κάθε εφαρμογή πριν ξεκινήσει να κάνει χρήση των πόρων του δικτύου, να αυθεντικοποιείται στον SDN Controller

1.4.5 Cloud Computing

Η Υπολογιστική Νέφους (Cloud Computing) είναι ένα παράδειγμα τεχνολογίας πληροφοριών (IT) το οποίο επιτρέπει την πανταχού παρούσα πρόσβαση σε διαμοιραζόμενες δεξαμενές ρυθμιζόμενων πόρων συστήματος και υψηλού-επιπέδου υπηρεσίες οι οποίες μπορούν να καθοριστούν γρήγορα με ελάχιστη διαχειριστική προσπάθεια, συχνά πάνω από το Διαδίκτυο. Η υπολογιστική νέφους βασίζεται πάνω σε διαμοιραζόμενους πόρους για να πετύχει συνοχή και οικονομικά οφέλη, παρόμοια με μια δημόσια υπηρεσία [16].

Εικόνα 12. Αφαιρετική Δομή του Cloud Computing

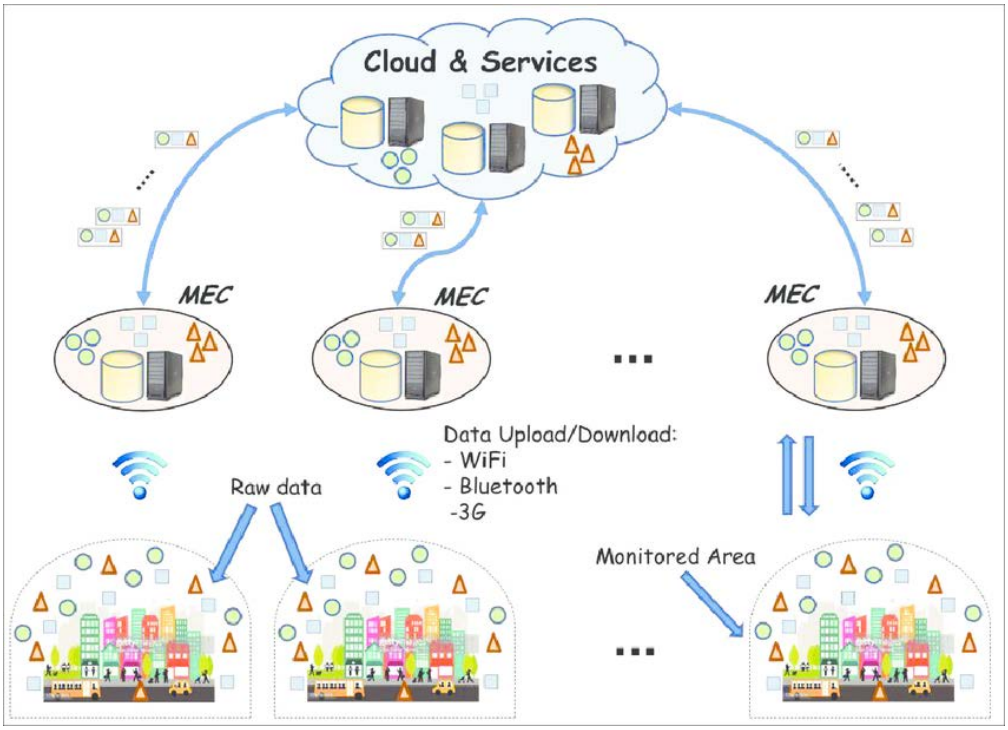
Τα νέφη τρίτων (third-party) παρόχων επιτρέπουν στους οργανισμούς να εστιάσουν στις βασικές επιχειρησιακές τους δραστηριότητες αντί να ξοδεύουν πόρους σε υποδομή και στη συντήρηση υπολογιστών [35]. Οι υποστηρικτές σημειώνουν ότι η υπολογιστική νέφους επιτρέπει σε εταιρίες να αποφύγουν ή να ελαχιστοποιήσουν τα πρώτα έξοδα της IT υποδομής. Επίσης οι υποστηρικτές ισχυρίζονται ότι η υπολογιστική νέφους επιτρέπει στις επιχειρήσεις να προωθήσουν τις εφαρμογές τους γρηγορότερα, με βελτιωμένη διαχείριση και λιγότερη συντήρηση, και αυτό δίνει την δυνατότητα στις ομάδες IT να προσαρμόζουν ταχύτερα τους πόρους για να ανταποκρίνονται σε κυμαινόμενη και απρόβλεπτη ζήτηση [35], [36], [37]. Οι παροχείς νέφους τυπικά

χρησιμοποιούν ένα μοντέλο “ pay-as-you-go” το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες δαπάνες λειτουργίας αν οι διαχειριστές δεν είναι εξοικειωμένα με την χρέωση των cloud μοντέλων [38].

Με την κυκλοφορία του Amazon EC2 το 2006, την διαθεσιμότητα των δικτύων υψηλής χωρητικότητας, οι υπολογιστές χαμηλού-κόστους και οι αποθηκευτικές συσκευές καθώς επίσης και η ευρεία υιοθεσία της εικονικοποίησης υλικού, της αρχιτεκτονικής προσανατολισμένης στην υπηρεσία και η αυτόνομη και η υπολογιστική χρησιμότητα (utility computing) οδήγησαν στην ανάπτυξη της υπολογιστικής νέφους [39], [40], [41]. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται πιο αναλυτικά η υπολογιστική νέφους παρουσιάζοντας μοντέλα παροχής υπηρεσιών νέφους, μοντέλα πρόσβασης υπολογιστικών νεφών, αρχιτεκτονικά μοντέλα νεφών, πλατφόρμες υπολογιστικών νεφών καθώς επίσης και θέματα ασφαλείας υπολογιστικού νέφους. Τέλος γίνεται αναφορά στο πως μπορεί να φανεί χρήσιμη η υπολογιστικού νέφους στα δίκτυα πέμπτης γενιάς παρουσιάζοντας την αρχιτεκτονική C-RAN.

1.4.6 Mobile Edge Computing

Η Κινητή Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (Mobile Edge Computing (MEC)) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που δίνει τις δυνατότητες της υπολογιστικής νέφους και ενός περιβάλλον IT στις άκρες ενός κυψελωτού δικτύου [42], [43]. Η βασική ιδέα πίσω από το MEC είναι ότι τρέχει εφαρμογές και πραγματοποιεί εργασίες επεξεργασίας κοντά στον χρήστη κυψέλης, η συμφόρηση δικτύου μειώνεται και οι εφαρμογές έχουν καλύτερη απόδοση.



Εικόνα 13. Κινητή Υπολογιστική στα άκρα του Δικτύου (MEC)

Η τεχνολογία MEC σχεδιάστηκε για να εφαρμοστεί σε κυψελωτούς σταθμούς βάσης, και έχει την ικανότητα να αναπτύσσει νέες εφαρμογές ευέλικτα και γρήγορα καθώς επίσης και νέες υπηρεσίες προς τους χρήστες. Συνδυάζοντας στοιχεία της τεχνολογίας

πληροφοριών και της δικτύωσης τηλεπικοινωνιών, το MEC επιτρέπει επίσης στους φορείς κινητής τηλεφωνίας να ανοίξουν το δίκτυο ράδιο πρόσβασής τους (RAN) για να εξουσιοδοτούν τρίτους όπως προγραμματιστές εφαρμογών και παρόχους περιεχομένου [44].

Τα τεχνικά πρότυπα για το MEC έχουν αναπτυχθεί από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) το οποίο έχει δημιουργήσει ένα τεχνικό white paper πάνω σε αυτό το θέμα [45].

Πρόσφατα, μια νέα έννοια προτάθηκε από την Cisco ως μια γενική μορφή του MEC όπου ο ορισμός των συσκευών άκρων διευρύνεται, που κυμαίνεται από smartphones μέχρι set-top boxes [123]. Αυτό οδηγεί σε μια νέα ερευνητική περιοχή που ονομάζεται Υπολογιστική Ομίχλης και Δικτύωση (Fog Computing and Networking) [46], [47], [48]. Ωστόσο οι περιοχές του Fog Computing και του MEC αλληλεπικαλύπτονται και οι ορολογίες χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται πιο αναλυτικά η Κινητή Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου παρουσιάζοντας την αρχιτεκτονική της κινητής υπολογιστικής, τα πλεονεκτήματά της, την διαφορά της κινητής υπολογιστικής από την υπολογιστική νέφους καθώς επίσης και πως συνδυάζεται η κινητή υπολογιστική με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Επίσης περιγράφεται η Υπολογιστική Νέφους παρουσιάζοντας επίσης την αρχιτεκτονική της, τα χαρακτηριστικά της, το πως συνδυάζεται με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς αλλά και ποια είναι η διαφορά της υπολογιστικής ομίχλης από την κινητή υπολογιστική.

1.5 Ερευνητικά έργα για ανάπτυξη 5G συστημάτων

1.5.1 Horizon 2020

Το πλαίσιο χρηματοδότησης Horizon 2020 είναι από τα μεγαλύτερα ευρωπαϊκά προγράμματα έρευνας και καινοτομίας διάρκειας από το 2014 έως το 2020 και η χρηματοδότησή του ανέρχεται σε ογδόντα δισεκατομμύρια Ευρώ. Το έργο αυτό υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και είναι στο επίκεντρο της γιατί θα αποτελεί επένδυση για το μέλλον υποσχόμενο περισσότερες καινοτομίες, ανακαλύψεις και φυσικά νέες θέσεις εργασίας.

Στόχος αυτού του έργου είναι να ξεπεραστούν οτιδήποτε εμπόδια υπάρχουν προς την καινοτομία, προς τις κοινωνικές προκλήσεις και να συνεργαστούν ιδιωτικοί και δημόσιοι φορείς προκειμένου να υλοποιήσουν και να παραδώσουν τις καινοτομίες [52].

1.5.2 METIS

Το ερευνητικό έργο METIS εστιάζει στην έρευνα και ανάπτυξη των κινητών και ασύρματων επικοινωνιών στα πλαίσια του έβδομου προγράμματος (FP7) το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Θα οδηγήσει σε αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται σήμερα τα ασύρματα και κινητά συστήματα επικοινωνίας αποτελώντας μια σημαντική πλατφόρμα για μελλοντική τυποποίηση. Οι εφαρμογές που θα χρησιμοποιούνται θα περιλαμβάνουν τομείς όπως μέσα μαζικής μεταφοράς, δημόσια ασφάλεια, αυτοκινητοβιομηχανία και οι υπηρεσίες όπως e-banking, e-learning, e-health θα πολλαπλασιαστούν και θα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο εν κινήσει.

Ο στόχος αυτού του έργου είναι να αναπτυχθεί ένα πλαίσιο για το μέλλον του συστήματος κινητών και ασύρματων επικοινωνιών το οποίο να παρέχει ριζικά νέες λύσεις που θα συναντούν τις ανάγκες μετά το 2020. Η έρευνα θα επικεντρωθεί σε τοπολογίες δικτύων, σε τεχνικές χρήσης του ραδιοφάσματος, σε ραδιοζύξεις και σε πολλαπλούς κόμβους με κύριο στόχο την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και το χαμηλό κόστος.

1.5.3 5GNOW

Το ερευνητικό έργο 5GNOW έχει ως σκοπό να αμφισβητήσει την ικανότητα του LTE και LTE-Advanced αναφορικά με τον αυστηρό συγχρονισμό και την ορθογωνικότητα. Το έργο αυτό θα αναπτύξει νέες έννοιες PHY και MAC επιπέδου που προσαρμόζονται καλύτερα στις μελλοντικές ανάγκες. Επίσης θα βασιστεί στις νέες δυνατότητες επεξεργασίας που προσφέρει το πυρίτιο.

Μετά τα αποτελέσματα της έρευνας του 5GNOW θα μπορούν να ανταποκριθούν τα ασύρματα δίκτυα μετάδοσης στις διάφορες κατηγορίες συσκευών, στις πολλαπλές υπηρεσίες και στις ρυθμίσεις μετάδοσης με σκοπό την δημιουργία των έξυπνων πόλεων. Στο MTC θα βασιστεί σε μεγάλο βαθμό η ενοποίηση των συστημάτων και αυτό θα διευκολύνει για παράδειγμα τα δίκτυα αισθητήρων μέσα στο δίκτυο επικοινωνίας και η εμπειρία του χρήστη θα είναι ικανοποιητική και σταθερή σε όλο το δίκτυο.

1.5.4 iJOIN

Το έργο iJOIN είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα στα πλαίσια του έβδομου προγράμματος (FP7) της Ευρωπαϊκής Ένωσης το οποίο ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2012. Βασίζεται στο RAN-as-a-Service (RANaaS) το οποίο το RAN είναι μια λειτουργικότητα κεντρικοποιημένη μέσω μιας ανοιχτής πλατφόρμας που έχει ως βάση του το cloud. Με την ενσωμάτωση μικρών κυψελών και κεντρική επεξεργασία, το έργο αυτό στοχεύει στη βελτιστοποίηση της πρόσβασης και του backhaul μέσω ενός κοινού σχεδιασμού και στην λειτουργία αλγορίθμων και διαχείριση αρχιτεκτονικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα αυτού του έργου θα έχουν ως σκοπό να βελτιστοποιήσουν το σύστημα RAN παρέχοντας υπηρεσίες όταν προκύπτει ανάγκη άμεσα, γρήγορα και αποτελεσματικά και με μικρό κόστος και κατανάλωση ενέργειας.

1.5.5 TROPIC

Το έργο TROPIC είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα στα πλαίσια του έβδομου προγράμματος (FP7) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το οποίο στοχεύει να φέρει ένα κοινό πλαίσιο προκειμένου να ικανοποιήσει τους διαχειριστές δικτύων, τους προγραμματιστές, τους κατασκευαστές μικρών κυψελών και τους τερματικούς χρήστες από άποψη χρόνων εκτέλεσης και εξοικονόμησης ενέργειας [53].

Για τις συνεχώς αυξανόμενες ασύρματες απαιτήσεις κυκλοφορίας, τα δίκτυα φεμπτοκυψελών (femtocell) θεωρούνται ως μια νέα λύση επικοινωνίας. Τα HeNBs με την προϋπόθεση ότι είναι εξοπλισμένα με υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους θα μπουν να χειρίζονται τις cloud computing υπηρεσίες που απαιτούν τα smartphones αντί για μεγάλες φάρμες από servers. Έτσι βελτιώνεται κατά πολύ η εμπειρία του χρήστη ως προς το ανέβασμα και το κατέβασμα δεδομένων στο δίκτυο και ως προς το latency. Αυτό το ερευνητικό έργο αντιμετωπίζει το παραπάνω σενάριο με χρήση του

συστήματος επικοινωνιών MP2MP, με προηγμένες διαδικασίες εικονικοποίησης και με μια cross-layer κατανομή πόρων ως προς το φάσμα, την χωρητικότητα, την υπολογιστική ισχύ και τέλος την ενέργεια.

1.5.6 Mobile Cloud Networking

Το έργο Mobile Cloud Networking (MCN) είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα στα πλαίσια του έβδομου προγράμματος (FP7) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2012 και είχε διάρκεια 36 μήνες.

Μέχρι σήμερα δεν έχει αξιοποιηθεί πλήρως η οικονομική δύναμη του Cloud computing από την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών παρά το γεγονός ότι μειώνει το φόρτο δικτύωσης.

Σκοπός του MCN έργου είναι να προσφέρει τα παρακάτω:

- Να επεκτείνει το Cloud Computing προς τον κινητό τερματικό χρήστη από τα κέντρα δεδομένων
- Να χρησιμοποιήσει την αρχιτεκτονική του κινητού δικτύου προς αξιοποίηση του Cloud Computing
- Να αξιοποιηθεί η ιδέα για ένα από άκρη σε άκρη Cloud κινητό δίκτυο για νέες εφαρμογές
- Να δημιουργήσει μια ενιαία υπηρεσία που περιλαμβάνει κινητό δίκτυο, computing και αποθηκευτική ικανότητα
- Να δημιουργήσει τον Mobile Cloud Provider ως ένα νέο επιχειρηματικό παράγοντα [54].

1.5.7 COMBO

Το έργο COMBO είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα στα πλαίσια του έβδομου προγράμματος (FP7) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το οποίο ξεκίνησε από την 1/1/2013 και είχε διάρκεια περίπου τριάμισι χρόνια με χρηματοδότηση πάνω από 9 εκατομμύρια Ευρώ.

Ο σκοπός αυτού του έργου ήταν να ερευνήσει για διάφορες περιπτώσεις δικτύων (αστικά δίκτυα, πυκνά αστικά δίκτυα και δίκτυα προαστίων) νέες προσεγγίσεις για Σταθερή, Κινητή ευρυζωνική πρόσβαση [55].

1.5.8 CROWD

Το έργο CROWD είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα το οποίο ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2013 με την επίβλεψη του IMDEA Networks Institute. Σκοπός αυτού του έργου είναι η δημιουργία λύσεων λογισμικού για την ανάπτυξη πολύ πυκνών ετερογενών (από την ραδιοκάλυψη έως τις εγκαταστάσεις όπως προγραμματισμένη κατανομή σταθμών βάσης και hot spots) ασύρματων δικτύων πρόσβασης και η σχεδίαση ολοκληρωμένων ασύρματων και ενσύρματων δικτύων κορμού.

Το έργο αυτό ορίζει τους παρακάτω βασικούς στόχους προς επίτευξη:

- Η Παροχή χωρητικότητας να είναι ανάλογη της πυκνότητας όπου χρειάζεται

- Παροχή μηχανισμών βελτιστοποίησης του MAC που λειτουργεί σε πολύ πυκνές εγκαταστάσεις
- Η κατανάλωση ενέργειας να είναι ανάλογη της κίνησης
- Εγγύηση της ποιότητας εμπειρίας του χρήστη που είναι εν κινήσει δημιουργώντας βελτιστοποιημένες λύσεις για διαχείριση συνδεσιμότητας [56].

1.5.9 PHYLAWS

Το έργο PHYLAWS (PHYsical LAyer Wireless Security) ξεκίνησε την 1η Νοεμβρίου του 2012 με διάρκεια 48 μηνών και σκοπός του είναι να ερευνήσει θέματα όπως την ενίσχυση της ιδιωτικότητας στις παρεμβολές των ασύρματων δικτύων, την απόρρητη κωδικοποίηση και ασφάλεια του φυσικού επιπέδου και την αξιόπιστη σχεδίαση κυματομορφών και πρωτοκόλλων ραδιοπρόσβασης.

Οι στόχοι του παραπάνω έργου είναι να σχεδιάσει και να εφαρμόσει στην πράξη τις νέες ιδέες περί ιδιωτικότητας των ασύρματων επικοινωνιών που χρησιμοποιούν τα χαρακτηριστικά διάδοσης των ραδιοκαναλιών. Ακόμα αναφορικά με τις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RAT) θα πρέπει να ερευνηθούν ρεαλιστικές εφαρμογές σε αυτές ή στης μελλοντικές.

Οι τρέχουσες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης παρουσιάζουν διαρροές ασφαλείας το οποίο έχει σοβαρό αντίκτυπο στην κοινωνία. Αυτό γιατί η ασφάλεια κρυπτογραφείται με διάφορες τεχνικές σε επίπεδο bit καθώς επίσης και σε άλλα επίπεδα της στοίβας επεξεργασίας δεδομένων. Η τυποποιημένη προστασία δεν έχει μεγάλη ασφάλεια σε δημόσια ασύρματα δίκτυα παρόλο που υπάρχουν πρωτόκολλα με ισχυρή κρυπτογράφηση τα οποία δυστυχώς κοστίζουν περισσότερο στους χρήστες των δημοσίων δικτύων αλλά έχουν επίσης και σημαντικούς περιορισμούς. Έτσι το έργο PHYLAWS θα ερευνήσει τους κόμβους επικοινωνίας και τις συσκευές που λειτουργούν στην ραδιοδιεπαφή και θα βελτιώσει την ιδιωτικότητα στα ασύρματα δημόσια δίκτυα με τρόπο αποδοτικό, ευέλικτο και οικονομικό.

1.5.10 SESAME

Το έργο SESAME (Small cEllS coordinAtion for Multi-tenancy and Edge services) ξεκίνησε την 1η Ιουλίου του 2015 με διάρκεια 30 μηνών και στοχεύει καινοτομίες γύρω από τα τρία κεντρικά στοιχεία στο 5G:

- Την τοποθέτηση των πληροφοριών του δικτύου και των εφαρμογών στην άκρη του δικτύου μέσω της Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (Network Functions Virtualisation, NFV) και της Edge Υπολογιστικής Νέφους
- Την σημαντική εξέλιξη της έννοιας της Μικρής Κυψέλης (Small Cell concept), ήδη κυριαρχεί στο 4G αλλά αναμένεται να αξιοποιήσει πλήρως το δυναμικό της στα προκλητικά υψηλής πυκνότητας 5G σενάρια
- Την ενοποίηση της πολλαπλής μίσθωσης σε υποδομές επικοινωνιών, επιτρέποντας σε πολλούς φορείς εκμετάλλευσης / παρόχους υπηρεσιών να συμμετάσχουν σε νέα διαμοιραζόμενα μοντέλα τόσο στην ικανότητα πρόσβασης όσο και των δυνατοτήτων υπολογιστικής άκρης.

Το SESAME προτείνει την έννοια της Μικρής Κυψέλης με Δυνατότητα Νέφους (Cloud-Enabled Small Cell, CESC), μια νέα Μικρή Κυψέλη πολλαπλής διαχείρισης η οποία

ενσωματώνει μια πλατφόρμα εικονικής εκτέλεσης (δηλ., το Light DC) για ανάπτυξη Εικονικοποιημένων Λειτουργιών Δικτύου (NFVs), υποστηρίζοντας ισχυρή αυτό-x διαχείριση και εκτέλεση καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών στο εσωτερικό της υποδομής του δικτύου πρόσβασης. Το Light DC θα διαθέτει επεξεργαστές χαμηλής ισχύος και επιταχυντές υλικού για κρίσιμες λειτουργίες χρόνου και θα χτίσει μια υποδομή συμπλέγματος υπολογιστικής άκρων υψηλής διαχείρισης. Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέπει σε νέους ενδιαφερόμενους να εισέλθουν δυναμικά στην αλυσίδα αξίας ενεργώντας ως φορείς παροχής υπηρεσιών 'ουδέτεροι-υπολογιστή' (host-neutral) σε υψηλές περιοχές κίνησης όπου δεν είναι πρακτικό η πύκνωση των πολλαπλών δικτύων. Η βέλτιστη διαχείριση της CESC ανάπτυξης είναι μια πρόκληση κλειδί για το SESAME, για το ποια νέα ενορχήστρωση, NFV διαχείριση, εικονικοποίηση της διαχείρισης όψεων ανά μισθωτή, αυτό-x χαρακτηριστικά και τεχνικές ράδιο πρόσβασης θα αναπτυχθούν.

Μετά το σχεδιασμό, τον προσδιορισμό και την ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής και όλα τα συμμετέχοντα CESC χαρακτηριστικά, το SESAME θα καταλήξει με ένα πρωτότυπο με όλες τις λειτουργικότητες για να αποδείξει την έννοια στις αντίστοιχες περιπτώσεις χρήσης. Εκτός από το ότι το CESC θα διαμορφωθεί σταθερά και συνεργατικά με άλλα 5G-PPP συστατικά μέσω συντονισμού με τα αντίστοιχα έργα.

1.5.11 5G ESSENCE

Το έργο 5G ESSENCE ξεκίνησε την 1η Ιουνίου 2017 με διάρκεια 30 μηνών και αντιμετωπίζει τα παραδείγματα της Edge Υπολογιστικής Νέφους και της Μικρής Κυψέλης-ως-υπηρεσία (Small Cell-as-a-Service, SCaaS) τροφοδοτώντας τους οδηγούς και καταργώντας τα εμπόδια στην αγορά των Έξυπνων Κυψελών (Small Cell, SC), που προβλέπεται να αυξηθεί με εντυπωσιακό ρυθμό μέχρι το 2020 και μετέπειτα να παίξει το ρόλο κλειδί στο 5G οικοσύστημα.

Το 5G ESSENCE παρέχει μια εξαιρετικά ευέλικτη και κλιμακούμενη πλατφόρμα, ικανή να υποστηρίξει νέα επιχειρησιακά μοντέλα και ροές εσόδων δημιουργώντας μια ουδέτερη αγορά υποδοχής και μειώνοντας τα λειτουργικά κόστη παρέχοντας νέες ευκαιρίες ιδιοκτησίας, ανάπτυξης, λειτουργίας και απόσβεσης. Το 5G ESSENCE μοχλεύει γνώση, συστατικά λογισμικού (SW modules) και πρότυπα για ποικίλα 5G-PPP έργα φάσης1, όπως το SESAME που είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Μεταξύ των βασικών στόχων του 5G ESSENCE είναι:

- Πλήρης προδιαγραφή των σημαντικών αρχιτεκτονικών βελτιώσεων
- Ορισμός της αρχικής αρχιτεκτονικής του συστήματος και διασυνδέσεις για την παροχή ενός ενσωματωμένο στο σύννεφο πολλαπλής-μίσθωσης SC δίκτυο και ένα προγραμματιζόμενο ελεγκτή RRM
- Ανάπτυξη ενός κεντρικοποιημένου SD-RAN ελεγκτή για να προγραμματίζει τη χρήση των ράδιο πόρων με ενοποιημένο τρόπο για όλα τα CESCs (Cloud-Enabled Small Cells)
- Αξιοποίηση της υψηλής απόδοσης και χρήση αποδοτικών τεχνικών εικονικοποίησης για καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων, μεγαλύτερη διεκπεραιωτή ικανότητα και μικρότερη καθυστέρηση στην ώρα δημιουργίας της υπηρεσίας δικτύου
- Ανάπτυξη των βελτιώσεων των ενορχηστρών (orchestrator's enhancements) για την κατανεμημένη διαχείριση υπηρεσίας

- Επίδειξη και αξιολόγηση του ενσωματωμένου στο σύννεφο πολλαπλής-μίσθωσης SC δικτύου
- Διεξαγωγή ανάλυση της αγοράς και εγκαθίδρυση νέων επιχειρησιακών μοντέλων και τέλος μεγιστοποίηση του αντίκτυπου στην υλοποίηση του 5G οράματος.

2. CLOUD COMPUTING

2.1 Ορισμός Υπολογιστικού Νέφους

Ένα νέφος (cloud) αναφέρεται σ' ένα διακριτό περιβάλλον Τεχνολογίας Πληροφοριών (IT) που σχεδιάζεται για να παρέχει κλιμακούμενους και μετρήσιμους IT πόρους (resources) εξ' αποστάσεως. Ο όρος προέρχεται από το Internet, το οποίο είναι ένα δίκτυο δικτύων που παρέχει απομακρυσμένη πρόσβαση σ' ένα σύνολο αποκεντρωμένων IT πόρων.

Σύμφωνα με μια έκθεση της Gartner που ανέφερε το υπολογιστικό νέφος στην κορυφή της λίστας των περιοχών στρατηγικών τεχνολογιών, επιβεβαίωσε αυτή την εξέχουσα θέση ως μια τάση της βιομηχανίας δίνοντας τον παρακάτω ορισμό: "*Υπολογιστικό νέφος είναι ένα στυλ υπολογιστικής με βάση το οποίο κλιμακούμενες και ελαστικές δυνατότητες ενεργοποίησης της IT τεχνολογίας παραδίδονται ως μια υπηρεσία σε εξωτερικούς πελάτες, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες Internet.*" [57]. Ο ορισμός αυτός αναγνωρίζει την σημαντικότητα της κλιμάκωσης, σε σχέση με την δυνατότητα κατακόρυφης κλιμάκωσης (δηλαδή της αντικατάστασης ενός IT πόρου από ένα άλλο με υψηλότερη ή χαμηλότερη δυναμικότητα) και όχι απλώς σε σχέση με τις τεράστιες διαστάσεις της.

Η Forrester Research επίσης έδωσε το δικό τη ορισμό του υπολογιστικού νέφους ως εξής: "Υπολογιστικό νέφος είναι μια τυποποιημένη IT δυνατότητα (υπηρεσίες, λογισμικό ή υποδομή), που παραδίδεται μέσω τεχνολογιών Internet με πληρωμή με βάση την χρήση και με αυτοεξυπηρέτηση" [58].

Εικόνα 14. Τι είναι το Cloud Computing

Ο ορισμός που έγινε ευρέως αποδεκτός από την βιομηχανία δόθηκε από το National Institute of Standards and Technology (NIST) όπου δημοσίευσε τον αρχικό του ορισμό το 2009 και τον Σεπτέμβριο του 2011 δημοσίευσε μια αναθεωρημένη έκδοση οποία είναι η εξής: "*Υπολογιστικό νέφος είναι ένα μοντέλο για ενεργοποίηση πανταχού παρούσας βολικής, κατ' απαίτηση πρόσβασης στο δίκτυο από μια διαμοιρασμένη δεξαμενή διαμορφώσιμων υπολογιστικών πόρων (π.χ. δικτύων, εξυπηρετητών,*

αποθήκευσης, εφαρμογών και υπηρεσιών), που μπορούν να παρέχονται και να αποδεσμεύονται γρήγορα, με ελάχιστη προσπάθεια διαχείρισης ή αλληλεπίδρασης απ' τον πάροχο της υπηρεσίας. Αυτό το μοντέλο νέφους αποτελείται από πέντε ουσιώδη χαρακτηριστικά, τρία μοντέλα υπηρεσίας και τέσσερα μοντέλα ανάπτυξης" [59].

Ένας ποιο απλοποιημένος ορισμός που συμφωνεί με όλες τις προηγούμενες παραλλαγές των ορισμών που δόθηκαν παραπάνω οργανισμούς της βιομηχανίας του υπολογιστικού νέφους είναι ο παρακάτω: "*Υπολογιστικό νέφος είναι μια εξειδικευμένη μορφή κατανεμημένης υπολογιστικής, που εισάγει μοντέλα χρησιμοποίησης για απομακρυσμένους κλιμακούμενους και μετρήσιμους πόρους*" [60].

2.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα της υπολογιστικής μέσα σ' ένα «νέφος» μπορεί να αναφέρεται σε καταστάσεις και προϊόντα που ξεκίνησαν τον 21ο αιώνα, όμως η ιδέα πάνω στην οποία βασίστηκαν υπήρχε πολλά χρόνια πριν.

Η αρχή έγινε το 1950 με την χρήση των mainframes όπου πολλοί χρήστες είχαν την δυνατότητα να έχουν πρόσβαση σε ένα κεντρικό υπολογιστή μέσω απλών τερματικών, τα οποία παρείχαν πρόσβαση στο mainframe. Λόγω του μεγάλου κόστους αγοράς και συντήρησης του mainframe δεν υπήρχε η δυνατότητα ενός οργανισμού να παρέχει ένα mainframe σε κάθε χρήστη. Εκτός του μεγάλου κόστους, δεν χρειαζόταν ένας μέσος χρήστης τόσο μεγάλο αποθηκευτικό χώρο και τόσο μεγάλη υπολογιστική ισχύ ενός mainframe. Επομένως, η βέλτιστη λύση που εφαρμοζόταν τότε ήταν η κοινή χρήση των υπολογιστικών πόρων ενός κεντρικού mainframe από όλους τους υπαλλήλους.

Στη συνέχεια το 1961 ο John McCarthy πρότεινε δημόσια την έννοια της κοινωφελούς υπολογιστικής ως εξής: "Αν οι υπολογιστές του είδους του οποίου είμαι εγώ υπέρμαχος γίνουν οι υπολογιστές του μέλλοντος, τότε η υπολογιστική κάποια μέρα θα οργανώνεται ως μια δημόσια κοινωφελής υπηρεσία, όπως το τηλεφωνικό σύστημα. …Ο υπολογιστής κοινωφελούς υπηρεσίας θα μπορούσε να γίνει η βάση μιας νέας και σημαντικής βιομηχανίας" [63]. Ο Douglas Parkhill στη συνέχεα ανέλυσε διεξοδικά χαρακτηριστικά όπως ελαστικότητα, παροχή υπολογιστικού κόστους ως υπηρεσίας, πρόσβαση μέσω διαδικτύου και ψευδαίσθηση απεριόριστων πόρων. Ακόμα ο Herb Grosh, περίπου την ίδια περίοδο, ισχυρίστηκε ότι ολόκληρος ο κόσμος θα μπορούσε να δουλέψει με τερματικά που τροφοδοτούνται από 15 μεγάλα datacenters.

Το 1969, ο Leonard Kleinrock, ένας επιστήμονας διευθυντής του Advanced Research Projects Agency Network ή έργου ARPANET, που ήταν ο πρόγονος του Internet, δήλωσε: "Μέχρι τώρα, τα δίκτυα υπολογιστών είναι σε νηπιακή ηλικία, αλλά καθώς θα μεγαλώνουν και γίνονται σύνθετα, πιθανώς να δούμε τη διάδοση των υπολογιστών κοινωφελούς υπηρεσίας…" [64].

Στη συνέχεια περίπου στη δεκαετία του 1970, δημιουργήθηκε το concept των εικονικών μηχανών (virtual machines) με την κυκλοφορία του λειτουργικού συστήματος VM από την IBM. Με την χρήση του λογισμικού εικονικοποίησης ήταν δυνατό η ταυτόχρονη εκτέλεση περισσότερων του ενός λειτουργικών συστημάτων σε ένα απομονωμένο περιβάλλον. Η εικονικοποίηση έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του cloud όπως το γνωρίζουμε σήμερα.

Τη δεκαετία του 1990 οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών άρχισαν να παρέχουν και υπηρεσίες εικονικών ιδιωτικών δικτύων, εκτός από το ότι παρείχαν συνδέσεις σημείου-προς-σημείο. Έτσι μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν το συνολικό εύρος ζώνης ποιο αποτελεσματικά κάνοντας κατάλληλη ρύθμιση της κυκλοφορίας των δεδομένων για να χρησιμοποιείται ο κάθε εξυπηρετητής κατά το βέλτιστο δυνατό. Εκείνη την περίοδο

εισήχθη μια κάπως διαφορετική έννοια του όρου «Νέφος» ή «Νέφος Δικτύου». Αυτή αναφερόταν σε ένα στρώμα αφαίρεσης που παρεχόταν στις μεθόδους παράδοσης δεδομένων μέσω ετερογενών δημόσιων και ημιδημόσιων δικτύων, τα οποία ήταν κυρίως δίκτυα μεταγωγής πακέτου, αν και τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας χρησιμοποιούσαν επίσης τον όρο «Νέφος». Η μέθοδος δικτύωσης εκείνη την εποχή υποστήριζε την μετάδοση δεδομένων από ένα άκρο (τοπικό δίκτυο) στο «Νέφος» (δίκτυο ευρείας περιοχής) και μετά σε ένα άλλο άκρο. Αυτή η έννοια είναι σχετική γιατί η βιομηχανία δικτύωσης συνεχίζει να χρησιμοποιεί αυτό τον όρο και θεωρείται μια πρόωρη υιοθέτηση των αρχών που βασίστηκε η κοινωφελής υπολογιστική. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η Salesforce.com πρωτοπόρησε στην εισαγωγή απομακρυσμένα παρεχόμενων υπηρεσιών μέσα στην επιχείρηση.

Το 2002, η Amazon.com εκκίνησε την πλατφόρμα Amazon Web Services (AWS), ένα πακέτο προσανατολισμένο στην επιχείρηση υπηρεσιών, που παρέχουν σε μια επιχείρηση απομακρυσμένη αποθήκευση, υπολογιστικούς πόρους και λειτουργικότητα. Η Amazon με τον εκσυγχρονισμό των datacenter της έπαιζε πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του νέφους αφού αυτά χρησιμοποιούσαν μόλις το 10% συνολικά από την μέγιστη δυνατότητά τους αφήνοντας περιθώρια για περιστασιακές ανάγκες.

Το 2006 πρωτοεμφανίστηκε ο όρος «υπολογιστικό νέφος» στο χώρο των επιχειρήσεων και εκείνη την εποχή η Amazon ξεκίνησε τις υπηρεσίες της Elastic Compute Cloud (EC2) που επέτρεπαν σε οργανισμούς να «εκμισθώνουν» υπολογιστική δυναμικότητα και ισχύ επεξεργασίας για να εκτελούν τις επιχειρησιακές τους εφαρμογές. Τον ίδιο χρόνο, το Google Apps άρχισε επίσης να παρέχει επιχειρησιακές εφαρμογές που βασιζόταν στο πρόγραμμα πλοήγησης και τρία χρόνια αργότερα, το Google App Engine έγινε ένα άλλο ιστορικό ορόσημο.

Το 2007 η IBM άρχισε να χαράσσει μια σαφή στρατηγική για το υπολογιστικό νέφος έχοντας ως σκοπό την κατασκευή υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους για επιχειρήσεις.

2.1.2 Τεχνολογικές Καινοτομίες

Οι καθιερωμένες τεχνολογίες συχνά χρησιμοποιούνται ως έμπνευση και πολλές φορές ως θεμέλιο για να παραχθούν και να δημιουργηθούν νέες τεχνολογικές καινοτομίες. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες προϋπάρχουσες τεχνολογίες που επηρεάζουν την δημιουργία υπολογιστικού νέφους.

2.1.2.1 Συσταδοποίηση

Μια συστάδα είναι μια ομάδα ανεξάρτητων IT πόρων που διασυνδέονται μεταξύ τους και λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα. Τα ποσοστά αστοχίας συστήματος μειώνονται, ενώ η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία αυξάνονται εφόσον τα χαρακτηριστικά πλεονασμού και αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρικό σύστημα είναι ενσωματωμένα (built-in) στη συστάδα.

Ένα γενικό προαπαιτούμενο της συσταδοποίησης υλικού είναι ότι τα συστατικά του συστήματα έχουν σχετικά πανομοιότυπο υλικό και λειτουργικό σύστημα, ώστε να παρέχουν παρόμοια επίπεδα απόδοσης, όταν ένα συστατικό το οποίο αστοχεί αντικαθίσταται από ένα άλλο. Οι συσκευές που απαρτίζουν μια συστάδα τηρούνται σε συγχρονισμό μέσω αποκλειστικής χρήσης, υψηλής ταχύτητας συνδέσεις επικοινωνίας. Η βασική αρχή του ενσωματωμένου πλεονασμού και της αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρικό είναι ένα ουσιώδες κομμάτι σε πλατφόρμες νέφους.

2.1.2.2 Υπολογιστικό Πλέγμα

Ένα υπολογιστικό πλέγμα παρέχει μια πλατφόρμα μέσα στην οποία οι υπολογιστικοί πόροι οργανώνονται σε μια ή περισσότερες λογικές δεξαμενές. Αυτές οι δεξαμενές συντονίζονται ώστε να παρέχουν ένα κατανεμημένο πλέγμα υψηλής απόδοσης, που μερικές φορές αναφέρεται ως «υπερ εικονικός υπολογιστής». Το υπολογιστικό πλέγμα διαφέρει από την συσταδοποίηση κατά το ότι τα συστήματα πλέγματος είναι χαλαρότερα συνδεδεμένα και κατανεμημένα. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα υπολογιστικού πλέγματος μπορούν να περιλαμβάνουν υπολογιστικούς πόρους, που είναι ετερογενείς και γεωγραφικά διασκορπισμένοι κάτι που γενικά δεν είναι δυνατό με συστήματα που βασίζονται σε υπολογιστική συστάδα.

Το υπολογιστικό πλέγμα είναι το θέμα έρευνας στην επιστήμη των υπολογιστών από τις αρχές της δεκαετίας του ’90. Οι τεχνολογικές εξελίξεις που επετεύχθησαν από τα έργα υπολογιστικού πλέγματος έχουν επηρεάσει διάφορα στοιχεία των πλατφορμών και των μηχανισμών υπολογιστικού νέφους, ειδικά ότι αφορά στα κοινά σύνολα χαρακτηριστικών, όπως είναι η δικτυωμένη πρόσβαση, η συνεκμετάλλευση πόρων και η κλιμάκωση και η ανθεκτικότητα. Αυτοί οι τύποι χαρακτηριστικών μπορούν να εγκαθιδρυθούν τόσο από το υπολογιστικό πλέγμα, όσο και απ’ το υπολογιστικό νέφος, με τις δικές τους διακριτές προσεγγίσεις.

Για παράδειγμα, το υπολογιστικό πλέγμα βασίζεται σ’ ένα στρώμα μεσαίας βαθμίδας, που αναπτύσσεται επάνω σε υπολογιστικούς πόρους. Αυτοί οι IT πόροι συμμετέχουν σε μια δεξαμενή πλέγματος, που υλοποιεί μια σειρά λειτουργιών διανομής φόρτου εργασίας και συντονισμού. Αυτή η μεσαία βαθμίδα μπορεί να περιέχει λογική εξισορρόπησης φορτίου, ελέγχους αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρικό και διαχείριση αυτόνομης συγκρότησης, όπου κάθε μια απ’ αυτές τις λειτουργίες διαθέτει προηγουμένως υλοποιημένες και αρκετές φορές πιο περίτεχνες υπολογιστικές τεχνολογίες. Γι’ αυτό το λόγο ορισμένοι κατατάσσουν το υπολογιστικό νέφος ως ένα απόγονο προηγούμενων πρωτοβουλιών υπολογιστικού πλέγματος.

2.1.2.3 Εικονικοποίηση

Η εικονικοποίηση αντιπροσωπεύει μια τεχνολογική πλατφόρμα, που χρησιμοποιείται για την δημιουργία εικονικών στιγμιότυπων IT πόρων. Ένα στρώμα λογισμικού εικονικοποίησης επιτρέπει σε φυσικούς IT πόρους να παρέχουν πολλαπλές εικονικές εικόνες των εαυτών τους έτσι ώστε οι υποκείμενες δυνατότητες επεξεργασίας τους να μπορούν να διαμοιράζονται από πολλαπλούς χρήστες.

Πριν την έλευση των τεχνολογιών εικονικοποίησης, το λογισμικό περιοριζόταν ώστε να εδρεύει σε στατικά περιβάλλοντα υλικού και να συνδέεται με αυτά. Η διεργασία εικονικοποίησης διακόπτει αυτή την εξάρτηση λογισμικού-υλικού, επειδή οι απαιτήσεις υλικού μπορούν να προσομοιώνονται από λογισμικό εξομοίωσης που εκτελείται σε εικονικοποιημένα περιβάλλοντα.

Οι καθιερωμένες τεχνολογίες εικονικοποίησης μπορούν να βρεθούν σε αρκετά χαρακτηριστικά νέφους και σε μηχανισμούς υπολογιστικού νέφους που έχουν εμπνεύσει πολλά από τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Καθώς εξελίσσεται το υπολογιστικό νέφος, εμφανίστηκε μια νέα γενιά μοντέρνων τεχνολογιών εικονικοποίησης ώστε να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς απόδοσης, αξιοπιστίας και κλιμάκωσης των παραδοσιακών πλατφορμών εικονικοποίησης.

2.1.3 Πλεονεκτήματα Υπολογιστικού Νέφους

Τα οφέλη από την χρήση του υπολογιστικού νέφους είναι τεράστια τόσο για τους τελικούς χρήστες, όσο και για τις επιχειρήσεις. Οι εταιρίες που παράσχουν τους υπολογιστικούς πόρους προσφέρουν πολλά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να ωφελήσουν τους πελάτες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία cloud για να γίνουν αποτελεσματικές.

Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι υπάρχει η κατάλληλη τεχνογνωσία στους παρόχους ώστε να μπορούν να αναπτύξουν και να διατηρήσουν τις υποδομές και το περιβάλλον ανάπτυξης ή εφαρμογής. Έτσι η ευθύνη για το παραπάνω βρίσκεται στους παρόχους και όχι στις επιχειρήσεις για να είναι σε θέση να επικεντρωθούν στις επιχειρηματικές τους δραστηριότητες μακριά από τα προβλήματα που έχουν να κάνουν με την υποδομή των πληροφοριακών τους συστημάτων

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από τα πιο σημαντικότερα πλεονεκτήματα του Cloud Computing [65], [66], [67], [68], [69]:

- **Μικρό κόστος (Low Cost)**: Όταν η Amazon ξεκίνησε τις cloud υπηρεσίες της προσέφερε on-line storage σε ένα data center. Σήμερα προσφέρει περισσότερες υπηρεσίες σε πολύ χαμηλότερες τιμές γιατί πλέον στο χώρο δραστηριοποιούνται εταιρίες κολοσσοί όπως Microsoft και Google που διαθέτουν και αυτές υπηρεσίες cloud στο καταναλωτικό κοινό. Έτσι από αυτό τον ανταγωνισμό, κέρδος έχει ο τελικός πελάτης και οι επιχειρήσεις γιατί οι προσφερόμενες επιλογές αυξάνονται συνεχώς έχοντας μικρό κόστος
- **Τιμολόγηση υπηρεσίας (Service pricing)**: Οι χρήστες καταναλώνουν υπολογιστικούς πόρους on-demand πληρώνοντας ανάλογα με την χρήση που κάνουν. Οι εταιρίες πληρώνουν χρήματα από τον προϋπολογισμό για τις λειτουργικές δαπάνες αντί να πληρώνουν πόρους που θα ανήκαν στις δαπάνες κεφαλαίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι αρκετά ελκυστικό στις νέες επιχειρήσεις γιατί μπορούν να διαθέτουν υπολογιστικούς πόρους που δεν θα είχαν διαφορετικά. Αυτή η προσέγγιση, δηλαδή η pay-per-use, προσελκύει μικρομεσαίες επιχειρήσεις που δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα να επενδύσουν σε πολύπλοκες και δαπανηρές υποδομές. Έτσι τους δίνεται η δυνατότητα να αγοράζουν μόνο τις υπηρεσίες που χρειάζονται καταβάλλοντας το σχετικό αντίτιμο αποφεύγοντας μεγάλα έξοδα που θα οδηγούσαν εκτός προϋπολογισμού
- **Ευελιξία (Flexibility)**: Η ενοικίαση server υπηρεσιών είναι πολύ ευέλικτη από άποψη υπολογιστικών πόρων γιατί δίνεται πλήθος επιλογών στις εταιρίες αναφορικά με την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Μπορούν να αποφασίσουν τον ακριβή υπολογιστικό χώρο προς χρήση και το μέγεθος της επεξεργαστικής δύναμης που θα τους δοθεί. Ακόμα οι διαχειριστές μπορούν σε πραγματικό χρόνο να αποφασίσουν για ενημέρωση των εφαρμογών λογισμικού αποφασίζοντας για το πόσο θα επενδύσουν για την ασφάλεια των υπολογιστικών τους συστημάτων. Τα σύννεφα μπορούν να ανταποκριθούν με μεγάλη ευελιξία στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των πληροφοριακών συστημάτων
- **Επεκτασιμότητα (Extensibility)**: Η τεχνολογία cloud δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να διαχειρίζονται μικρό όγκο δεδομένων και όποτε χρειάζεται να έχουν άμεση πρόσβαση σε μεγάλο όγκο δεδομένων σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Οπότε μπορούν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων και μόλις τελειώσει αυτό το διάστημα να επιστρέφουν στη φυσιολογική ροή δεδομένων. Αυτή η λύση συμφέρει περισσότερο τις επιχειρήσεις και έτσι νοικιάζουν ποσότητα υπολογιστικής ισχύς, με χρέωση ανά

gigabyte, από το να αγοράσουν εξοπλισμό και πολύπλοκα μηχανήματα. Έτσι το cloud computing επιτρέπει στις επιχειρήσεις να προσαρμόζονται εύκολα στις νέες ανάγκες που προκύπτουν επεκτείνοντας τις δυνατότητες των πληροφοριακών τους συστημάτων

- **Γρήγορη ανάπτυξη (Fast deployment)**: Σε μια εγκατάσταση ενός νέου πληροφοριακού συστήματος υπάρχουν διάφορες χρονοβόρες εργασίες που απαιτούνται όπως καθορισμός προδιαγραφών, παραγγελία, παραλαβή, εγκατάσταση, ρυθμίσεις κ.α τα οποία απαιτούν μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στο cloud οι αντίστοιχες υποδομές μπορούν να αρχίσουν να λειτουργούν μέσα σε λίγα λεπτά μόνο
- **Φορητότητα / Πρόσβαση από παντού (Portability / Access from everywhere)**: Οι διαδικτυακές εφαρμογές παρέχουν τη δυνατότητα πρόσβασης από οποιοδήποτε σημείο χωρίς την χρήση VPN. Το cloud computing υπόσχεται πρόσβαση σε υψηλής ισχύος υπολογιστικούς πόρους σε οποιονδήποτε διαθέτει μια συσκευή με πρόσβαση στο διαδίκτυο το οποίο διευκολύνει αφ' ενός τις ανάγκες των χρηστών σε διαφορετικές ζώνες ώρας και γεωγραφικές τοποθετήσεις επιτρέποντας τις εταιρίες να είναι ανταγωνιστικές σε παγκόσμιο επίπεδο και αφ' ετέρου την εργασία από το σπίτι, αυξάνοντας την παραγωγικότητα των χρηστών και την διάθεσή τους για εργασία
- **Απεριόριστη αποθήκευση (Unlimited storage)**: Η αποθήκευση πληροφοριών στο cloud δίνει σχεδόν απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας τόσο σε επίπεδο εταιρίας όσο και σε επίπεδο χρήστη για την περίπτωση εξάντλησης του διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου
- **Διαφορετικότητα συσκευών πρόσβασης (Diversity of access device)**: Οι υπηρεσίες πληροφορικής που υποστηρίζει ένα σύννεφο μπορούν να γίνουν προσβάσιμες από πληθώρα ηλεκτρονικών συσκευών όπως smartphones, tablets εκτός από τους παραδοσιακούς υπολογιστές. Ο τελικός χρήστης μπορεί να καθορίσει την συσκευή χρήσης του ταυτόχρονα με την υπηρεσία που θα του επιτρέψει πρόσβαση στα δεδομένα. Επομένως δεν τίθεται περιορισμός του τόπου και του μέσου και αυτό είναι πάρα πολύ ελκυστικό για τους τελικούς χρήστες
- **Αντίγραφα ασφάλειας και αποκατάσταση βλάβης (Backups and recovery from damage)**: Το υπολογιστικό νέφος είναι συνήθως χτισμένο σε μια ισχυρή αρχιτεκτονική παρέχοντας Προσαρμοστικότητα και εφεδρεία για τους χρήστες. Το νέφος προσφέρει αυτόματη μεταγωγή ανάμεσα σε πλατφόρμες υλικού out of the box, ενώ υπηρεσίες ανάκαμψης από καταστροφή είναι επίσης συχνές
- **Φιλικό προς το περιβάλλον (Environment friendly)**: Το cloud είναι φιλικό προς το περιβάλλον γιατί χρησιμοποιεί όσο χώρο χρειάζεται η εφαρμογή στον server το οποίο με την σειρά του ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας

2.1.4 Μειονεκτήματα Υπολογιστικού Νέφους

Μπορεί το υπολογιστικό νέφος να έχει πολλά πλεονεκτήματα, αλλά επειδή είναι νέα τεχνολογία έχει και ορισμένα μειονεκτήματα. Επειδή δεν έχει εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες ώστε να ικανοποιεί πλήρως τις ανάγκες μεγάλων εταιριών, χρειάζεται ένα μεγάλο χρονικό διάστημα για να αποκτήσει την εμπιστοσύνη της ως νέα τεχνολογία. Υπάρχουν ορισμένα θέματα που πρέπει να λυθούν προτού αποφασίσει μια μεγάλη εταιρία ή ένας οργανισμός να αφήσει το χειρισμό των πολύπλοκων διαδικασιών

του στις υπηρεσίες του υπολογιστικού νέφους. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει κάθε πελάτης τις αδυναμίες και ποια πιθανά προβλήματα υπάρχουν προτού στραφεί προς το υπολογιστικό νέφος για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του.

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από τα πιο σημαντικότερα μειονεκτήματα του υπολογιστικού νέφους [68], [70], [71]:

- **Φυσική Αξιοπιστία (Physical Reliability)**: Η αξιοπιστία και η εμπιστοσύνη μεταξύ παρόχου και πελάτη θα πρέπει να είναι υπαρκτή γιατί σε διαφορετική περίπτωση θα μπορούσε να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα για παράδειγμα σε μια εταιρία η οποία βασίζει τις κρίσιμες επιχειρηματικές λειτουργίες της στο σύννεφο. Ακόμα υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με το τι μπορεί να συμβεί στα δεδομένα. Αν και αρκετά απίθανο, δεν αποκλείεται το γεγονός της απώλειας δεδομένων.
- **Ασφάλεια και μυστικότητα (Security and privacy)**: Η ασφάλεια καθώς επίσης και η ιδιωτικότητα δεν είναι βέλτιστες. Τα δεδομένα και οι εφαρμογές μπορεί να μην είναι πολύ ασφαλείς καθώς επίσης και τα στοιχεία των χρηστών. Αυτό γιατί δεδομένου ότι οι χρήστες δίνουν τα στοιχεία τους σε ένα τρίτο υπάρχει η πιθανότητα να μην είναι άνετοι και αυτή η ανησυχία είναι ακόμα μεγαλύτερη για τις επιχειρήσεις γιατί πολλές φορές θέλουν να κρατήσουν τις πληροφορίες τους σε υπολογιστικά νέφη
- **Ελάχιστη ενημέρωση (Minimum update)**: Οι πάροχοι των υπηρεσιών εξαιτίας του ιδιωτικού τους χαρακτήρα δεν δίνουν στοιχεία στους πελάτες τους για τον τρόπο λειτουργίας τους.
- **Εξάρτηση από τον πάροχο (vendor lock-in)**: Ένα από τα μεγάλα μειονεκτήματα του cloud computing είναι η έμμεση εξάρτηση από τον πάροχο. Αυτό ονομάζεται “vendor lock-in” επειδή είναι δύσκολο και ορισμένες φορές αδύνατο, να αλλάξει πάροχο μια εταιρία ή ένας χρήστης και να πάει σε άλλον αφού υπάρχει συνεργασία με αυτόν. Εάν ο χρήστης ή μια εταιρία επιθυμεί παρόλα αυτά να μεταβεί σε κάποιο άλλο πάροχο, τότε μπορεί να είναι πραγματικά οδυνηρή και πολύ χρονοβόρα διαδικασία η μεταφορά τεράστιων δεδομένων από τον παλιό πάροχο στον καινούργιο
- **Κόστος (Cost)**: Μπορεί η υπολογιστική νέφους να αποφέρει μεγάλη εξοικονόμηση κόστους λόγω του ότι δεν χρειάζεται εξοπλισμός, όμως επειδή είναι νέα τεχνολογία είναι και ποιο ακριβή

2.1.5 Βασικά Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Νέφους

Ένα IT περιβάλλον απαιτεί ένα συγκεκριμένο σύνολο χαρακτηριστικών που καθιστά δυνατή την απομακρυσμένη παροχή κλιμακούμενων και μετρούμενων IT πόρων με ένα αποδοτικό τρόπο. Αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει να υπάρχουν σε ένα λογικό βαθμό για να θεωρείται το IT περιβάλλον ένα αποδοτικό νέφος.

Παρακάτω αναφέρονται εν συντομία τα χαρακτηριστικά τα οποία είναι κοινά στα περισσότερα περιβάλλοντα νέφους:

- **Χρησιμοποίηση κατ’ απαίτηση (On-Demand Usage)**: Ένας καταναλωτής νέφους (οργανισμός ή χρήστης που έχει συμβόλαιο με ένα πάροχο νέφους για να χρησιμοποιεί υπολογιστικούς πόρους) μπορεί να προσπελαύνει μονομερώς βασιζόμενος στο νέφος IT πόρους και έτσι έχει την ελευθερία να τους παρέχει μόνος του. Αφού συγκροτηθούν, η χρησιμοποίηση των αυτόνομα παρεχόμενων

ΙΤ πόρων μπορεί να αυτοματοποιηθεί και δεν χρειάζεται πλέον ανθρώπινη παρέμβαση από τον καταναλωτή νέφους ή τον πάροχο νέφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα περιβάλλον χρησιμοποίησης κατ' απαίτηση (on-demand usage). Αυτό το χαρακτηριστικό, που είναι επίσης γνωστό ως «κατ' απαίτηση χρησιμοποίησης αυτοεξυπηρέτησης», επιτρέπει να βρεθούν χαρακτηριστικά βασιζόμενα στην υπηρεσία και καθοδηγούμενη απ' την χρησιμοποίηση σε κυρίαρχα νέφη

- **Πανταχού παρούσα πρόσβαση (Ubiquitous access)**: Η πανταχού παρούσα πρόσβαση αναπαριστά την δυνατότητα μιας υπηρεσίας νέφους να είναι ευρέως προσπελάσιμη. Η καθιέρωση πανταχού παρούσας πρόσβασης για μια υπηρεσία νέφους μπορεί να απαιτεί υποστήριξη μιας ευρείας ποικιλίας συσκευών, πρωτοκόλλων μεταφοράς, διεπαφών και τεχνολογιών ασφάλειας. Για να ενεργοποιηθεί αυτό το επίπεδο πρόσβασης γενικά απαιτείται η αρχιτεκτονική της υπηρεσίας νέφους να προσαρμόζεται στις συγκεκριμένες ανάγκες διαφορετικών καταναλωτών υπηρεσιών νέφους
- **Πολλαπλή μίσθωση και συνεκμετάλλευση πόρων (Multitenancy and Resource Pooling)**: Το χαρακτηριστικό ενός προγράμματος λογισμικού, που επιτρέπει σ' ένα στιγμιότυπο του προγράμματος να εξυπηρετεί διαφορετικούς καταναλωτές (ενοίκους), ενώ ο καθένας είναι απομονωμένος απ' τους άλλους, αναφέρεται ως πολλαπλή μίσθωση (multitenancy). Ένας πάροχος νέφους δημιουργεί συνεκμετάλλευση των ΙΤ πόρων για να εξυπηρετεί πολλαπλούς καταναλωτές νέφους χρησιμοποιώντας μοντέλα πολλαπλής μίσθωσης, τα οποία συχνά βασίζονται στην χρήση τεχνολογιών εικονικοποίησης. Μέσω της χρήσης τεχνολογίας πολλαπλής μίσθωσης, οι ΙΤ πόροι μπορούν να εκχωρούνται και να επανεκχωρούνται δυναμικά σύμφωνα με τις απαιτήσεις του καταναλωτή υπηρεσίας νέφους. Η συνεκμετάλλευση πόρων επιτρέπει σε παρόχους νέφους να συνεκμεταλλεύονται ΙΤ πόρους σε μεγάλη κλίμακα, για να εξυπηρετούν πολλαπλούς καταναλωτές νέφους. Διαφορετικά φυσικοί και εικονικοί πόροι εκχωρούνται και επανεκχωρούνται δυναμικά, σύμφωνα με την ζήτηση των καταναλωτών νέφους, η οποία τυπικά ακολουθείται από εκτέλεση μέσω στατιστικής πολυπλεξίας. Η συνεκμετάλευση πόρων συνήθως επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας πολλαπλής μίσθωσης και έτσι περιλαμβάνεται σ' αυτό το χαρακτηριστικό πολλαπλής μίσθωσης
- **Ελαστικότητα (Elasticity)**: Ελαστικότητα είναι η αυτοματοποιημένη δυνατότητα ενός νέφους να κλιμακώνει διαφανώς ΙΤ πόρους, ανάλογα με τις ανάγκες, ανταποκρινόμενο σε συνθήκες χρόνου εκτέλεσης ή με ένα τρόπο που προκαθορίζεται από τον καταναλωτή ή τον πάροχο νέφους. Η ελαστικότητα συχνά θεωρείται μια βασική αιτιολόγηση για την υιοθέτηση υπολογιστικού νέφους, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι σχετίζεται στενά με το όφελος της μειωμένης επένδυσης και του κόστους. Οι πάροχοι νέφους με τεράστιους ΙΤ πόρους μπορούν να προσφέρουν τη μεγαλύτερη δυνατή ελαστικότητα
- **Μετρούμενη χρήση (Measured use)**: Το χαρακτηριστικό της μετρούμενης χρησιμοποίησης αναπαριστά την δυνατότητα μιας πλατφόρμας νέφους να παρακολουθεί την χρησιμοποίηση των ΙΤ πόρων, κυρίως από καταναλωτές νέφους. Με βάση την μέτρηση, ο πάροχος νέφους μπορεί να χρεώσει ένα καταναλωτή νέφους μόνο για τους ΙΤ πόρους που χρησιμοποίησε πραγματικά και/ή για το χρονικό πλαίσιο κατά το οποίο του εκχωρήθηκαν οι πόροι. Κατ' αυτή την έννοια η μετρούμενη χρήση σχετίζεται στενά με το χαρακτηριστικό χρησιμοποίησης κατ' απαίτηση. Η μετρούμενη χρήση δεν περιορίζεται στην παρακολούθηση στατιστικών στοιχείων για λόγους τιμολόγησης. Περιλαμβάνει

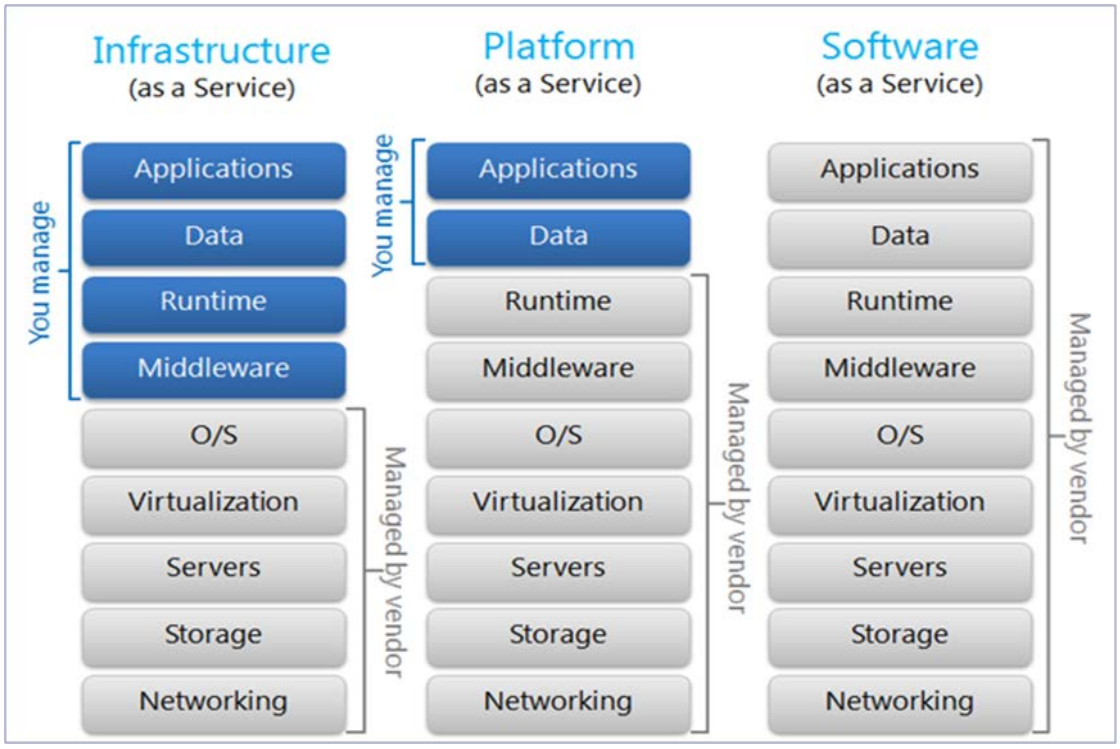
επίσης την γενική παρακολούθηση των IT πόρων και τις σχετικές αναφορές χρησιμοποίησης (τόσο για τον πάροχο, όσο και για τους καταναλωτές νέφους). Έτσι, η μετρούμενη χρήση σχετίζεται επίσης με τα νέφη, που δεν χρεώνουν με βάση τη χρησιμοποίηση

- **Ανθεκτικότητα (Resiliency)**: Η ανθεκτική υπολογιστική είναι μια μορφή μεταγωγής σε εφεδρικό σύστημα, που διανέμει πλεονάζουσες υλοποιήσεις IT πόρων πάνω σε φυσικές τοποθεσίες. Οι IT πόροι μπορούν να συγκροτούνται εκ των προτέρων έτσι ώστε αν ένας τους εμφανίζει προβλήματα, η επεξεργασία να μετάγεται αυτόματα σε μια άλλη πλεονάζουσα υλοποίηση. Σε ότι αφορά στο υπολογιστικό νέφος, το χαρακτηριστικό της ανθεκτικότητας μπορεί να αναφέρεται σε πλεονάζοντες IT πόρους, μέσα στο ίδιο νέφος (αλλά σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες) ή σε πολλαπλά νέφη. Οι καταναλωτές νέφους μπορούν να αυξήσουν τόσο την αξιοπιστία, όσο και την διαθεσιμότητα των εφαρμογών τους, χρησιμοποιώντας την ανθεκτικότητα των βασιζόμενων στο έδαφος IT πόρων.

2.2 Μοντέλα Παροχής Υπηρεσιών Υπολογιστικού Νέφους

Ένα **μοντέλο παράδοσης νέφους** (cloud delivery model) αναπαριστά ένα συγκεκριμένο, συσκευασμένο εκ των προτέρων συνδυασμό IT πόρων που προσφέρονται από ένα πάροχο νέφους. Τρία κοινά μοντέλα παράδοσης νέφους έχουν καθιερωθεί και τυποποιηθεί ευρέως τα οποία αναλύονται στην επόμενη ενότητα και είναι τα εξής [60]:

- Υποδομή ως Υπηρεσία (IaaS)
- Πλατφόρμα ως Υπηρεσία (PaaS)
- Λογισμικό ως Υπηρεσία (SaaS)



Εικόνα 15. Μοντέλα υπολογιστικού νέφους

Αυτά τα τρία μοντέλα συσχετίζονται ως προς το πώς η εμβέλεια του ενός μπορεί να περιλαμβάνει την εμβέλεια του άλλου.

Ακόμα έχουν εμφανιστεί πολλές εξειδικευμένες παραλλαγές των τριών βασικών μοντέλων παράδοσης νέφους, όπου η κάθε μια αποτελείται από ένα διακριτό συνδυασμό IT πόρων. Ορισμένα παραδείγματα είναι τα παρακάτω:

- Αποθήκευση ως Υπηρεσία
- Βάση Δεδομένων ως Υπηρεσία
- Ασφάλεια ως Υπηρεσία

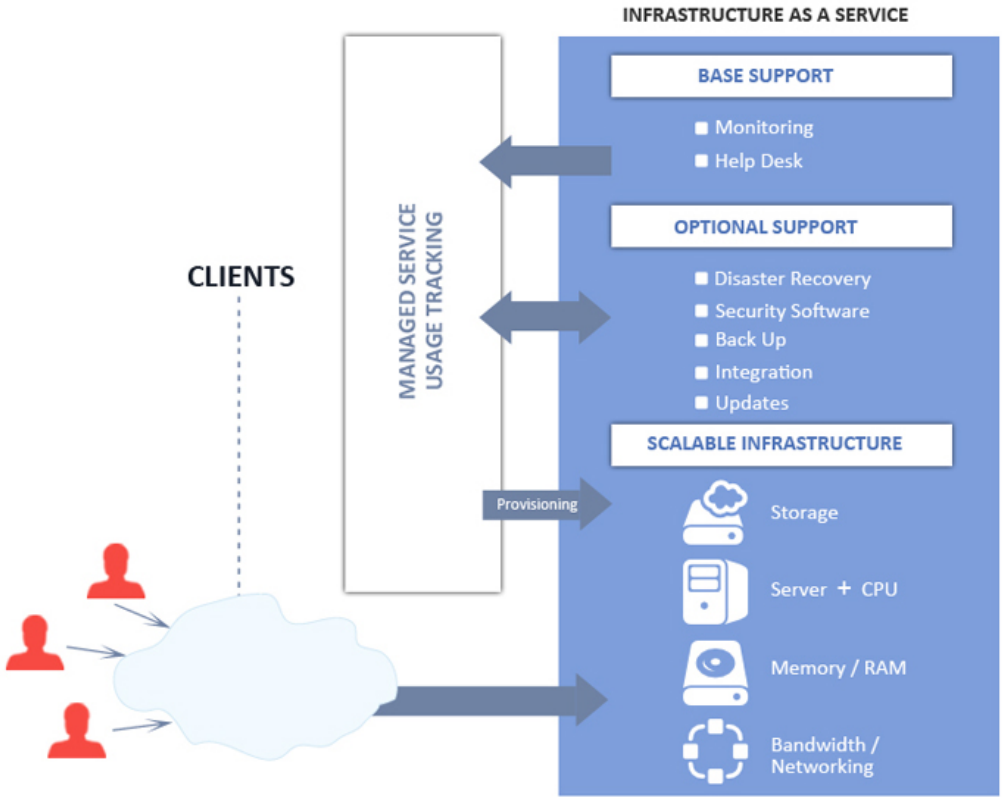
2.2.1 Υποδομή ως Υπηρεσία (IaaS)

Το μοντέλο **υποδομή ως υπηρεσία** (Infrastructure-as-a-Service, IaaS) αναπαριστά ένα αυτόνομο IT περιβάλλον που αποτελείται από IT πόρους επικεντρωμένους στην υποδομή, που μπορούν να προσπελαύνονται και να τυχαίνουν διαχείρισης μέσω διεπαφών και εργαλείων. Αυτό το περιβάλλον μπορεί να περιλαμβάνει υλικό, δίκτυο, σύνδεση, λειτουργικά συστήματα και άλλους «ακατέργαστους» IT πόρους. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά περιβάλλοντα φιλοξενίας ή εξωτερικής ανάθεσης, με το IaaS, οι IT πόροι τυπικά εικονικοποιούνται και συσκευάζονται σε δέσμες, που απλοποιούν την εκ των προτέρων κλιμάκωση προσαρμογή χρόνου εκτέλεσης και της υποδομής.

Ο γενικός σκοπός ενός περιβάλλοντος IaaS είναι να παρέχει σε καταναλωτές νέφους ένα υψηλό επίπεδο ελέγχου και ευθύνης επί της παραμετροποίησης και της χρησιμοποίησης. Οι IT πόροι που παρέχονται από το IaaS γενικά δεν συγκροτούνται εκ των προτέρων και έτσι αναθέτουν την ευθύνη διαχείρισης απευθείας στον καταναλωτή νέφους. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται από καταναλωτές νέφους που απαιτούν να έχουν ένα υψηλό επίπεδο ελέγχου επί του βασιζόμενου στο νέφος περιβάλλοντος, που σκοπεύουν να δημιουργήσουν.

Μερικές φορές οι πάροχοι νέφους λαμβάνουν, βάσει συμβάσεων, IaaS από άλλους παρόχους νέφους, για να κλιμακώνουν τα δικά τους περιβάλλοντα νέφους. Οι τύποι και οι μάρκες των IT πόρων που παρέχονται από IT προϊόντα τα οποία προσφέρονται από διαφορετικούς παρόχους νέφους μπορούν να διαφέρουν. Οι IT πόροι που διατίθενται μέσω περιβαλλόντων IaaS γενικά προσφέρονται ως καινούρια αρχικοποιημένα εικονικά στιγμιότυπα. Ένας κεντρικός και κύριος IT πόρος μέσα σ' ένα τυπικό περιβάλλον IaaS είναι ο εικονικός επεξεργαστής. Εικονικοί εξυπηρετητές μισθώνονται, καθορίζοντας απαιτήσεις υλικού εξυπηρετητή, όπως είναι η δυναμικότητα του επεξεργαστή, η μνήμη και ο τοπικός χώρος αποθήκευσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα του IaaS είναι το Google compute engine, το HP Cloud, το SQL Azure, και το Amazon S3 [61].



Εικόνα 16. Υποδομή ως Υπηρεσία (IaaS)

2.2.2 Πλατφόρμα ως Υπηρεσία (PaaS)

Το μοντέλο **πλατφόρμα ως υπηρεσία** (Platform-as-a-Service, PaaS) αναπαριστά ένα προκαθορισμένο "ετοιμοπαράδοτο" περιβάλλον, που τυπικά αποτελείται από ήδη αναπτυγμένους και συγκροτημένους IT πόρους. Συγκεκριμένα, το PaaS βασίζεται στην χρησιμοποίηση (και ορίζεται από τη χρησιμοποίηση) ενός ετοιμοπαράδοτου περιβάλλοντος, που εγκαθιδρύει ένα σύνολο εκ των προτέρων συσκευασμένων προϊόντων και εργαλείων, τα οποία χρησιμοποιούνται για υποστήριξη όλου του κύκλου ζωής της παράδοσης προσαρμοσμένων εφαρμογών.

Συνηθισμένοι λόγοι, για τους οποίους ένας καταναλωτής νέφους θα χρησιμοποιούσε ένα περιβάλλον PaaS και θα επένδυε σε αυτό περιλαμβάνουν τους εξής:

- Ο καταναλωτής νέφους θέλει να επεκτείνει τοπικά περιβάλλοντα στο νέφος για λόγους κλιμάκωσης και για οικονομικούς λόγους
- Ο καταναλωτής νέφους χρησιμοποιεί το ετοιμοπαράδοτο περιβάλλον για να αντικαταστήσει πλήρως ένα τοπικό περιβάλλον
- Ο καταναλωτής νέφους θέλει να γίνει πάροχος νέφους και αναπτύσσει τις δικές του υπηρεσίες νέφους που θα γίνονται διαθέσιμες σε άλλους εξωτερικούς καταναλωτές νέφους

Ο καταναλωτής νέφους, εργαζόμενος μέσα σε μια ετοιμοπαράδοτη πλατφόρμα γλιτώνει το διαχειριστικό βάρος της διαμόρφωσης και συντήρησης της απογυμνωμένης υποδομής των IT πόρων, που παρέχεται μέσω του μοντέλου IaaS. Αντίστροφα, στον καταναλωτή νέφους εκχωρείται ένα χαμηλότερο επίπεδο ελέγχου επί των υποκείμενων IT πόρων, που φιλοξενούν και παραδίδουν την πλατφόρμα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Τα προϊόντα PaaS διατίθενται με διαφορετικές στοίβες ανάπτυξης. Για παράδειγμα, το Google App Engine προσφέρει ένα περιβάλλον βασιζόμενο σε Java και σε Python. Άλλα παραδείγματα PaaS παρόχων είναι το Windows azure και το Salesforce [61].

Εικόνα 17. Πλατφόρμα ως Υπηρεσία (PaaS)

2.2.3 Λογισμικό ως Υπηρεσία (SaaS)

Ένα πρόγραμμα λογισμικού που έχει τοποθετηθεί ως μια διαμοιρασμένη υπηρεσία νέφους και έχει γίνει διαθέσιμο ως «προϊόν» ή ως ένα βοήθημα γενικής χρήσης αναπαριστά το τυπικό προφίλ μιας προσφοράς SaaS. Το μοντέλο «**λογισμικό ως υπηρεσία**» (Software-as-a-Service, SaaS) χρησιμοποιείται τυπικά για να κάνει μια επαναχρησιμοποιήσιμη υπηρεσία νέφους ευρέως διαθέσιμη σε μια ποικιλία καταναλωτών νέφους. Υπάρχει μια ολόκληρη αγορά για προϊόντα SaaS, τα οποία μπορούν να εκμισθωθούν και να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς και με διαφορετικούς όρους χρήσης.

Σε ένα καταναλωτή νέφους γενικά εκχωρείται πολύ περιορισμένος διαχειριστικός έλεγχος επί μιας υλοποίησης SaaS. Αυτή συχνότερα παρέχεται απ' τον πάροχο νέφους, αλλά μπορεί να ανήκει νομικά σε οποιαδήποτε οντότητα αναλαμβάνει τον ρόλο του ιδιοκτήτη υπηρεσίας νέφους. Για παράδειγμα, ένας οργανισμός που λειτουργεί ως καταναλωτής νέφους, ενώ χρησιμοποιεί ένα περιβάλλον PaaS και εργάζεται μ' αυτό, μπορεί να δομήσει μια υπηρεσία νέφους, που αποφασίζει να αναπτύξει μέσα στο ίδιο περιβάλλον ως SaaS. Ο ίδιος οργανισμός, κατόπιν αναλαμβάνει στην ουσία τον ρόλο του παρόχου νέφους, όταν η βασιζόμενη σε SaaS υπηρεσία νέφους γίνεται διαθέσιμη σε άλλους οργανισμούς, που λειτουργούν ως καταναλωτές νέφους, όταν χρησιμοποιούν την υπηρεσία νέφους.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα SaaS περιλαμβάνουν το Google Docs, το Google apps, το Microsoft Office 365 και το Salesforce CRM [61].

Εικόνα 18. Λογισμικό ως Υπηρεσία (SaaS)

2.2.4 Σύγκριση Μοντέλων Υπολογιστικού Νέφους

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται δυο πίνακες οι οποίοι συγκρίνουν διάφορα χαρακτηριστικά της χρησιμοποίησης και της υλοποίησης μοντέλων νέφους. Συγκεκριμένα ο πίνακας 1 αναφέρει τις αντιθέσεις των επιπέδων ελέγχου και ο πίνακας 2 συγκρίνει τυπικές ευθύνες και μεθόδους χρησιμοποίησης.

Πίνακας 1. Σύγκριση τυπικών επιπέδων ελέγχου μοντέλων νέφους

Μοντέλο Νέφους	Τυπικό Επίπεδο Ελέγχου που Εκχωρείται σε Καταναλωτή Νέφους	Τυπική Λειτουργικότητα που Γίνεται Διαθέσιμη σε Καταναλωτή Νέφους
SaaS	συγκρότηση χρησιμοποίησης και σχετιζόμενη με την χρησιμοποίηση	πρόσβαση μέσω διεπαφής χρήστη
PaaS	περιορισμένος διαχειριστικός έλεγχος	μέτριο επίπεδο διαχειριστικού ελέγχου επί IT πόρων, που σχετίζονται με τη χρησιμοποίηση της πλατφόρμας του καταναλωτή νέφους
IaaS	πλήρης διαχειριστικός έλεγχος	πλήρης πρόσβαση σε εικονικοποιημένους σχετιζόμενους με την υποδομή IT πόρους και πιθανώς προς τους υποκείμενους φυσικούς IT πόρους

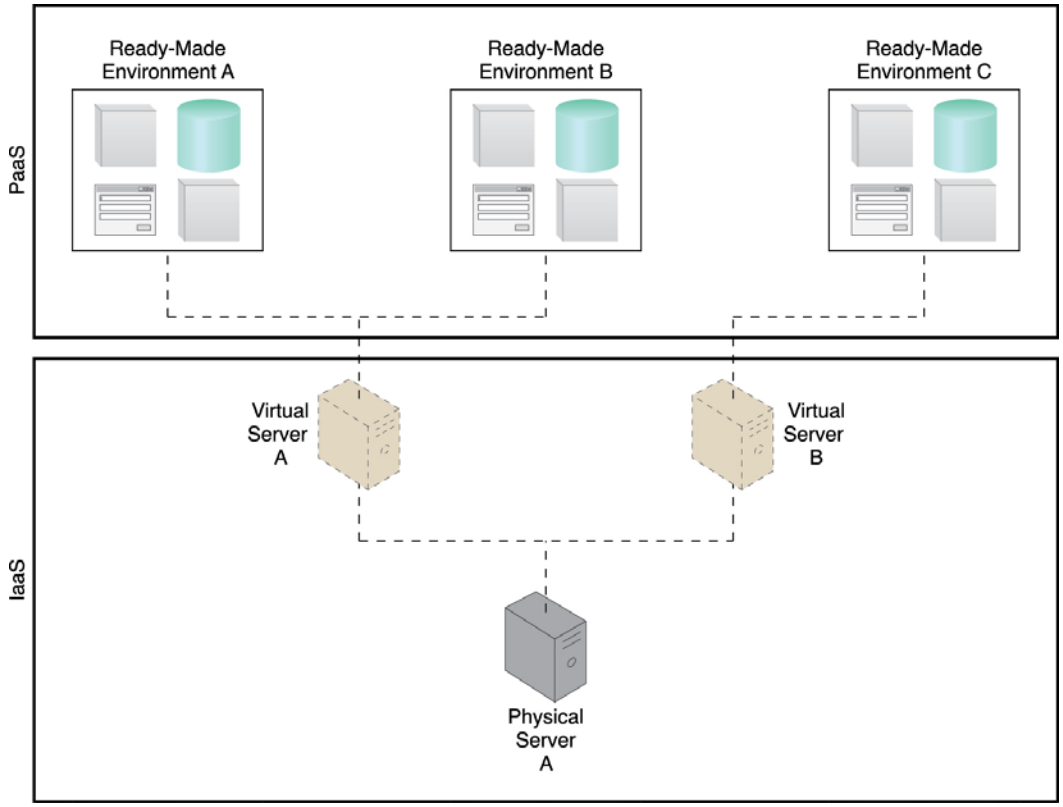
Πίνακας 2. Τυπικές δραστηριότητες που εκτελούνται από καταναλωτές και παρόχους νέφους σε σχέση με τα μοντέλα νέφους

Μοντέλο Νέφους	Κοινές Δραστηριότητες Καταναλωτή Νέφους	Κοινές Δραστηριότητες Παρόχου Νέφους
SaaS	χρησιμοποιεί και συγκροτεί υπηρεσία νέφους	υλοποιεί, διαχειρίζεται και συντηρεί υπηρεσία νέφους παρακολουθεί την χρησιμοποίηση από καταναλωτές νέφους
PaaS	αναπτύσσει εφαρμογές, δοκιμάζει, αναπτύσσει εμπορικά και διαχειρίζεται υπηρεσίες νέφους και βασιζόμενες στο νέφος λύσεις	συγκροτεί εκ των προτέρων την πλατφόρμα και παρέχει την υποκείμενη υποδομή, μεσισμικό και άλλους απαραίτητους IT πόρους, ανάλογα με τις ανάγκες παρακολουθεί την χρησιμοποίηση από καταναλωτές νέφους
IaaS	διαμορφώνει και συγκροτεί απογυμνωμένη υποδομή και εγκαθιστά, διαχειρίζεται και παρακολουθεί το τυχόν απαιτούμενο λογισμικό	παρέχει και διαχειρίζεται την φυσική απαιτούμενη επεξεργασία, αποθήκευση, δικτύωση και φιλοξενία παρακολουθεί την χρησιμοποίηση από καταναλωτές νέφους

2.2.5 Συνδυασμός Μοντέλων Υπολογιστικής Νέφους

Τα τρία βασικά μοντέλα νέφους δημιουργούν μια φυσική ιεραρχία παροχής, παρέχοντας ευκαιρίες για μελέτη συνδυασμένης εφαρμογής των μοντέλων. Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά θέματα που αφορούν τους δυο συνηθέστερους συνδυασμούς:

- IaaS + PaaS: Ένα περιβάλλον PaaS θα δομείται επάνω σε μια υποκείμενη υποδομή, που συγκρίνεται με τους φυσικούς και τους εικονικούς εξυπηρετητές και με άλλους IT πόρους, που παρέχονται μέσα σε ένα περιβάλλον IaaS. Η παρακάτω εικόνα δείχνει πως αυτά τα δυο μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν εννοιολογικά σε μια απλή διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική.

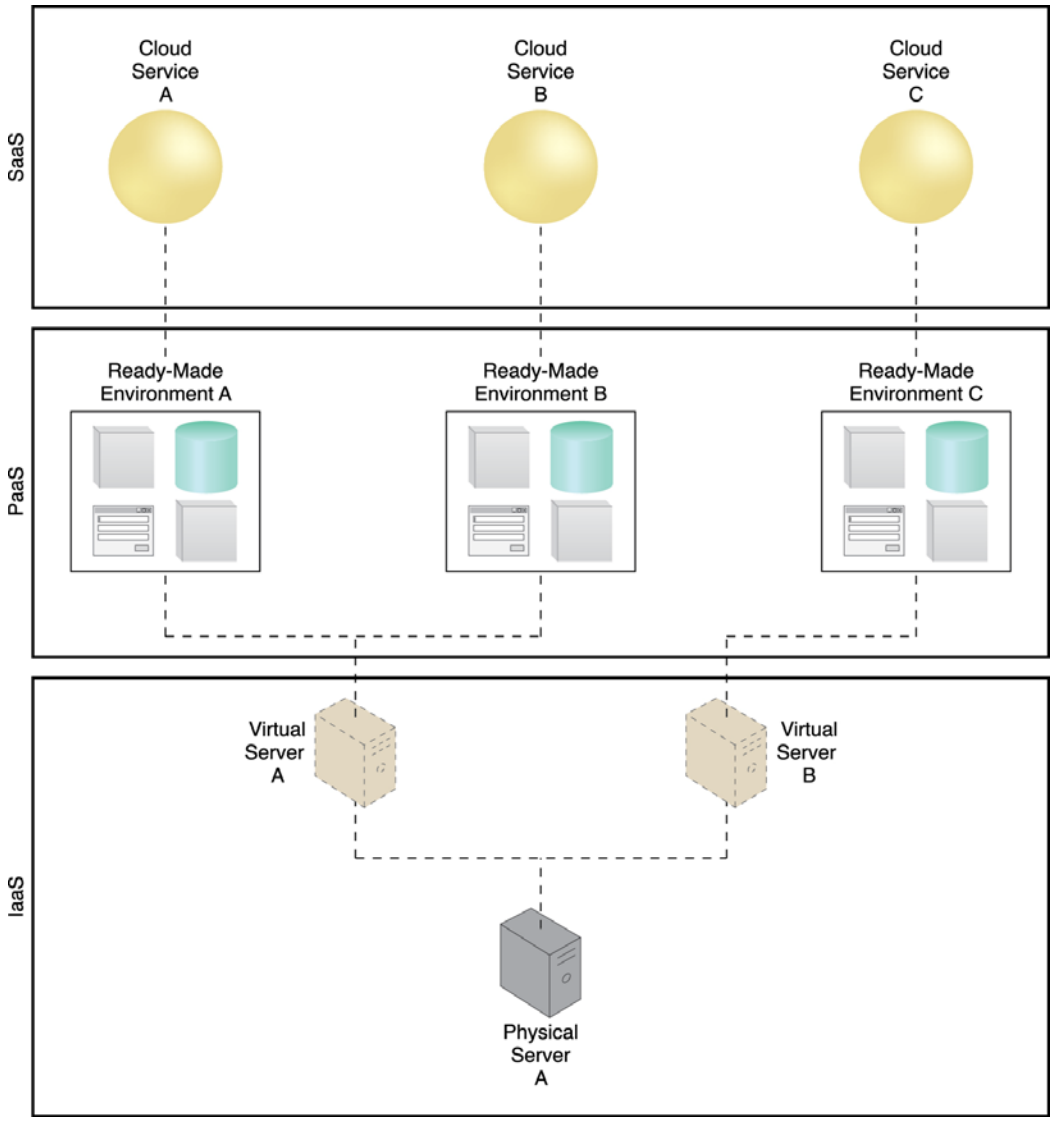


Εικόνα 19. Συνδυασμός IaaS + PaaS περιβάλλοντος

Ένας πάροχος νέφους δεν θα χρειαστεί υπό κανονικές συνθήκες να παρέχει ένα περιβάλλον IaaS από το δικό του νέφος, για να κάνει ένα περιβάλλον PaaS διαθέσιμο σε καταναλωτές νέφους. Όμως η χρησιμότητα αυτής της αρχιτεκτονικής άποψης είναι η εξής. Ας υποθέσουμε ότι ο πάροχος νέφους που παρέχει το περιβάλλον PaaS επέλεξε να εκμισθώσει ένα περιβάλλον IaaS από ένα διαφορετικό πάροχο νέφους. Η υποκίνηση για ένα τέτοιο διακανονισμό μπορεί να επηρεάζεται από οικονομικά στοιχεία ή ίσως επειδή ο πρώτος πάροχος νέφους προσεγγίζει να υπερβεί την υφιστάμενη δυναμικότητά του, επειδή εξυπηρετεί άλλους καταναλωτές νέφους. 'Η ίσως ένας συγκεκριμένος καταναλωτής νέφους θέτει μια νομική απαίτηση για φυσική αποθήκευση δεδομένων σε μια συγκεκριμένη περιοχή (διαφορετική από αυτής της περιοχής που βρίσκεται το νέφος του πρώτου παρόχου νέφους).

- IaaS + PaaS + SaaS: Μπορούν να συνδυαστούν μαζί και τα τρία μοντέλα νέφους για να εγκαθιδρύσουν στρώματα IT πόρων, που δομούνται το ένα από το άλλο. Για παράδειγμα προσθέτοντας στην παραπάνω διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική, το ετοιμοπαράδοτο περιβάλλον που παρέχεται από το περιβάλλον

PaaS μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον οργανισμό καταναλωτή νέφους ώστε να αναπτύξει εφαρμογές και τις δικές του υπηρεσίες νέφους SaaS που στη συνέχεια μπορεί να είναι διαθέσιμες ως εμπορικά προϊόντα (παρακάτω εικόνα):



Εικόνα 20. Συνδυασμός IaaS + PaaS + SaaS περιβάλλοντος

2.3 Μοντέλα Πρόσβασης Υπολογιστικών Νεφών

Ένα μοντέλο πρόσβασης υπολογιστικού νέφους αναπαριστά ένα συγκεκριμένο τύπο περιβάλλοντος νέφους, που διακρίνεται κυρίως από την ιδιοκτησία, το μέγεθος και την πρόσβαση.

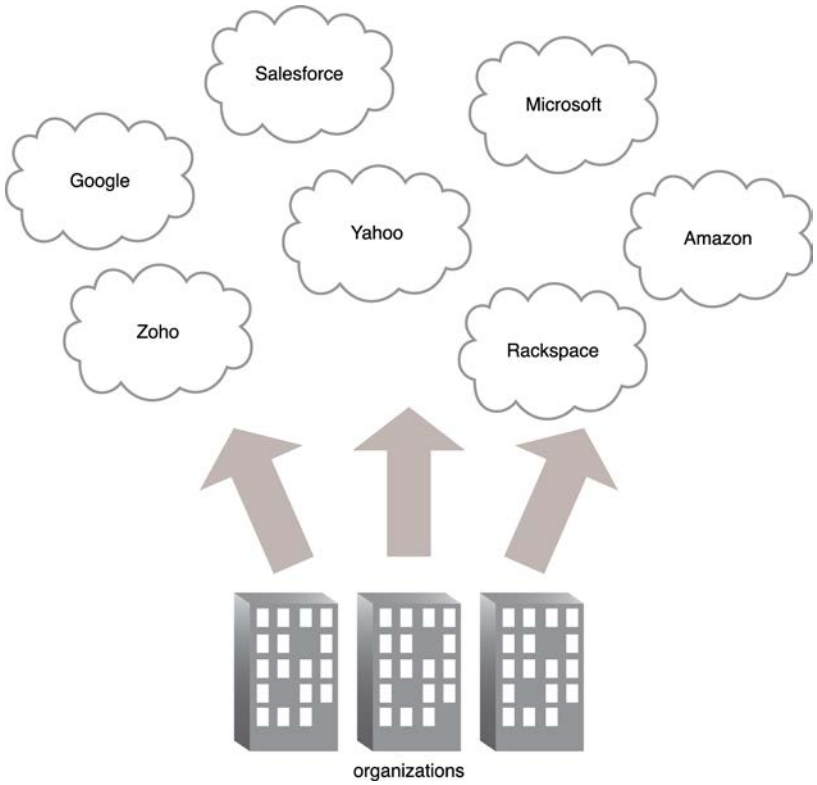
Υπάρχουν τέσσερα κοινά μοντέλα πρόσβασης νέφους τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες [60]:

- Δημόσιο νέφος
- Κοινοτικό νέφος
- Ιδιωτικό νέφος
- Υβριδικό νέφος

2.3.1 Δημόσια Νέφη

Ένα **δημόσιο νέφος** (public cloud) είναι ένα δημόσια προσπελάσιμο περιβάλλον νέφους που ανήκει σε ένα τρίτο πάροχο νέφους. Οι IT πόροι σε δημόσια νέφη παρέχονται συνήθως μέσω των μοντέλων νέφους που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και γενικά προσφέρονται σε καταναλωτές νέφους με κάποια χρέωση ή εμπορευματοποιούνται μέσω άλλων οδών (π.χ. μέσω διαφήμισης).

Ο πάροχος νέφους είναι υπεύθυνος για την δημιουργία και την συνεχή συντήρηση του δημόσιου νέφους και των πόρων του. Η παρακάτω εικόνα δείχνει μια μερική άποψη του τοπίου του δημόσιου νέφους παρουσιάζοντας ορισμένους από τους κύριους προμηθευτές που υπάρχουν στην αγορά. Αυτοί οι προμηθευτές είναι η Google με το Google App Engine, η Microsoft με το Microsoft Windows Azure, η Amazon με το Amazon EC2, η IBM με το IBM Smart Cloud, η Salesforce, η Yahoo, το Rackspace και το Zoho [62].



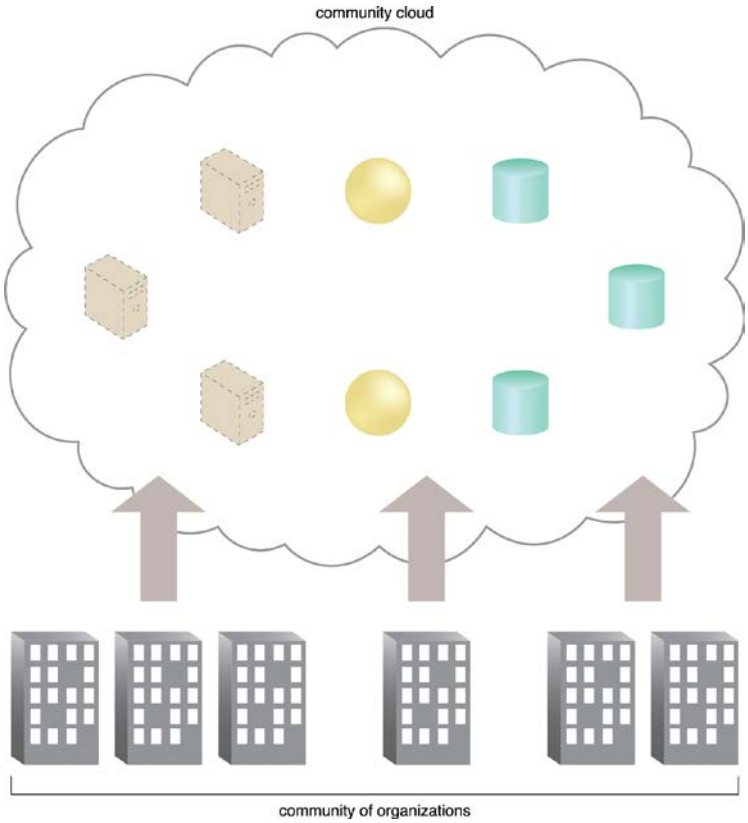
Εικόνα 21. Δημόσιο νέφος

2.3.2 Κοινοτικά Νέφη

Ένα **κοινοτικό νέφος** (community cloud) είναι παρόμοιο με ένα δημόσιο νέφος, εκτός του ότι η πρόσβασή του περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη κοινότητα καταναλωτών νέφους. Το κοινοτικό νέφος μπορεί να ανήκει από κοινού σε μέλη μιας κοινότητας ή να ανήκει σε ένα τρίτο πάροχο νέφους, που παρέχει ένα δημόσιο νέφος με περιορισμένη δυνατότητα πρόσβασης. Τα μέλη καταναλωτές νέφους της κοινότητας τυπικά μοιράζονται την ευθύνη της ανάπτυξης του κοινοτικού νέφους όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Η συμμετοχή στην κοινότητα δεν εγγυάται υποχρεωτικά την πρόσβαση σε όλους τους IT πόρους του νέφους ή τον έλεγχο όλων των πόρων του νέφους. Όσοι βρίσκονται έξω από το νέφος γενικά δεν έχουν πρόσβαση εκτός και αν αυτή επιτραπεί από την

κοινότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα κοινοτικού νέφους είναι το Google Apps for Government και το Microsoft Government Community Cloud [62].



Εικόνα 22. Κοινοτικό νέφος

2.3.3 Ιδιωτικά Νέφη

Ένα **ιδιωτικό νέφος** (private cloud) ανήκει σε ένα μόνο οργανισμό. Τα ιδιωτικά νέφη επιτρέπουν σε ένα οργανισμό να χρησιμοποιεί τεχνολογία υπολογιστικού νέφους σαν ένα τρόπο κεντρικοποίησης της πρόσβασης σε IT πόρους, από διαφορετικά μέρη, διαφορετικές τοποθεσίες ή διαφορετικά τμήματα του οργανισμού.

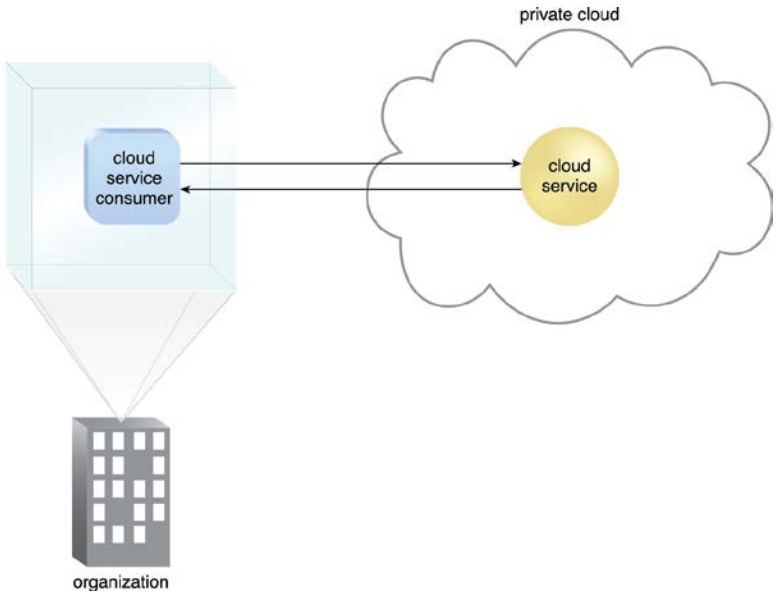
Η χρήση ενός ιδιωτικού νέφους μπορεί να αλλάξει τον τρόπο που ορίζονται και εφαρμόζονται τα όρια οργανισμού και εμπιστοσύνης. Η πραγματική διαχείριση ενός περιβάλλοντος ιδιωτικού νέφους μπορεί να γίνει από προσωπικό του οργανισμού ή να ανατεθεί εξωτερικά.

Σε ένα ιδιωτικό νέφος, ο ίδιος οργανισμός είναι από τεχνικής σκοπιάς τόσο καταναλωτής, όσο και πάροχος νέφους όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Για να διαφοροποιηθούν αυτοί οι ρόλοι:

- συνήθως ένα ξεχωριστό τμήμα του οργανισμού αναλαμβάνει την ευθύνη για την παροχή του νέφους (και έτσι αναλαμβάνει τον ρόλο του παρόχου νέφους)
- τμήματα που απαιτούν να έχουν πρόσβαση στο ιδιωτικό νέφος αναλαμβάνουν τον ρόλο του καταναλωτή νέφους

Είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται οι όροι «τοπικό» και «βασιζόμενο στο νέφος» σωστά μέσα στο περιβάλλον ενός ιδιωτικού δικτύου. Αν και το ιδιωτικό νέφος μπορεί να βρίσκεται φυσικά τοπικά μέσα στον οργανισμό, οι IT πόροι που φιλοξενεί συνεχίζουν να

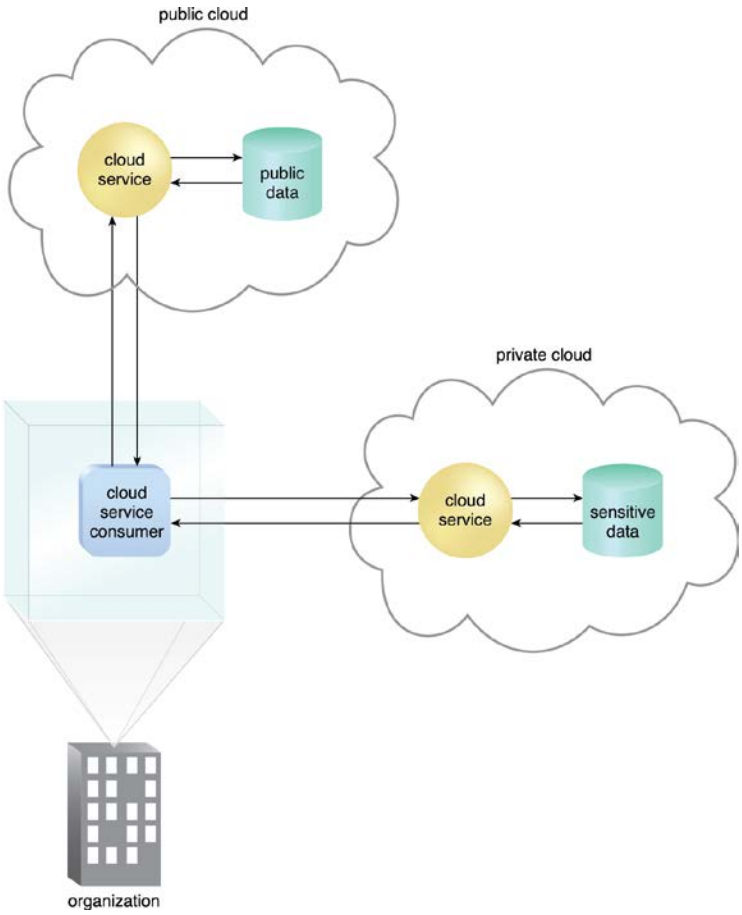
θεωρούνται «βασιζόμενοι στο νέφος», εφόσον γίνονται διαθέσιμοι εξ' αποστάσεως σε καταναλωτές νέφους. Οι IT πόροι, που φιλοξενούνται έξω από το ιδιωτικό δίκτυο στα τμήματα που λειτουργούν ως καταναλωτές νέφους θεωρούνται «τοπικοί» σε σχέση με τους βασισμένους στο νέφους IT πόρους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ιδιωτικών νεφών είναι το Amazon VPC (Virtual Private Cloud), το Microsoft ECI data center, η VMware Cloud Infrastructure Suite, το Eucalyptus και το Ubuntu Enterprise Cloud – UEC (το οποίο υποστηρίζεται από το Eucalyptus) [62].



Εικόνα 23. Ιδιωτικό νέφος

2.3.4 Υβριδικά Νέφη

Ένα **υβριδικό νέφος** (hybrid cloud) είναι ένα περιβάλλον νέφους, που αποτελείται από δυο ή περισσότερα μοντέλα πρόσβασης νέφους. Για παράδειγμα, ένας καταναλωτής νέφους μπορεί να επιλέξει να αναπτύξει υπηρεσίες νέφους, για την επεξεργασία ευαίσθητων δεδομένων σ' ένα ιδιωτικό νέφος με άλλες υπηρεσίες νέφους για λιγότερο ευαίσθητα δεδομένα σε ένα δημόσιο νέφος. Το αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και είναι ένα υβριδικό μοντέλο ανάπτυξης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα υβριδικών νεφών είναι το Windows Azure και το VMware vCloud (Hybrid Cloud Services) [62].



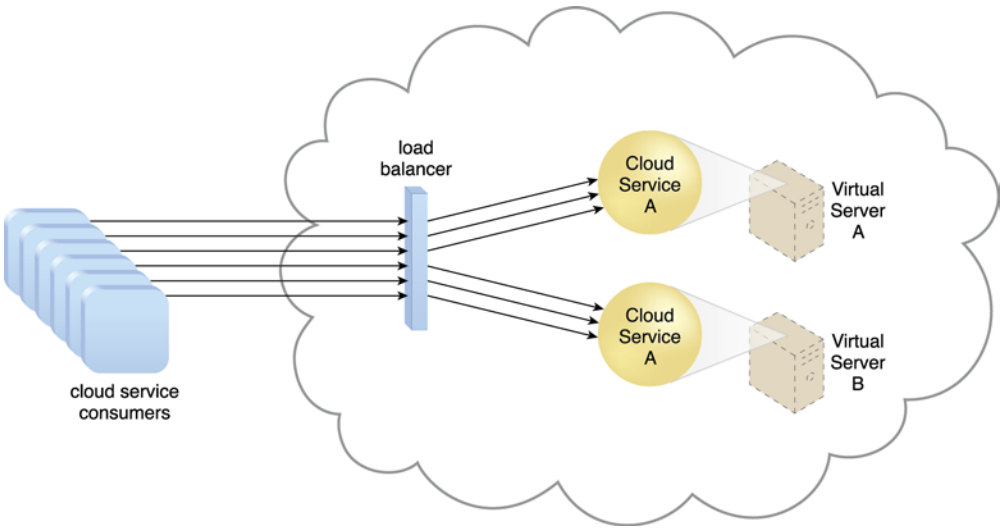
Εικόνα 24. Υβριδικό νέφος

2.4 Αρχιτεκτονική Υπολογιστικού Νέφους

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται αρκετά από τα συνηθέστερα θεμελιώδη αρχιτεκτονικά μοντέλα νέφους, όπου το κάθε ένα αποτελεί παράδειγμα μιας συνηθισμένης χρήσης και χαρακτηριστικού ενός σύγχρονου βασιζόμενου στο νέφος περιβάλλοντος. Ακόμα διερευνάται η εμπλοκή και η σημασία διαφόρων συνδυασμών μηχανισμών υπολογιστικού νέφους σε σχέση με αυτές τις αρχιτεκτονικές [60].

2.4.1 Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου

Οι IT πόροι μπορούν να κλιμακωθούν οριζόντια μέσω της προσθήκης ενός ή περισσότερων πανομοιότυπων πόρων και ενός εξισορροπητή φορτου (load balancer) που παρέχει λογική χρόνου (runtime logic) εκτέλεσης, προκειμένου να κατανέμει ομοιόμορφα τον φόρτο εργασίας ανάμεσα σε διαθέσιμους IT πόρους. Η προκύπτουσα **αρχιτεκτονική κατανομής φόρτου εργασίας** (workload distribution architecture) μειώνει τόσο την υποχρησιμοποίηση, όσο και την υπερχρησιμοποίηση IT πόρων σε τέτοιο βαθμό, που εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου και απ' την λογική χρόνου εκτέλεσης.



Εικόνα 25. Αρχιτεκτονική Διανομής Φόρτου

Αυτό το θεμελιώδες αρχιτεκτονικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε IT πόρο και η κατανομή φόρτου εργασίας γίνεται για να υποστηρίξει κατανεμημένους εικονικούς εξυπηρετητές, συσκευές αποθήκευσης νέφους και υπηρεσίες νέφους. Τα συστήματα εξισορρόπησης φόρτου, που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένους IT πόρους συνήθως παράγουν εξειδικευμένες παραλλαγές αυτής της αρχιτεκτονικής, που ενσωματώνουν χαρακτηριστικά εξισορρόπησης φορτίου, όπως:

- Η αρχιτεκτονική εξισορρόπησης φορτίου υπηρεσίας (service load balancing architecture)
- Η αρχιτεκτονική εικονικού εξυπηρετητή με εξισορροπημένο φόρτο (load balanced virtual server architecture)
- Η αρχιτεκτονική εικονικών μεταγωγέων με εξισορροπημένο φόρτο (load balanced virtual switches architecture)

Εκτός του βασικού μηχανισμού εξισορροπητή φόρτου και των μηχανισμών εικονικού εξυπηρετητή και συσκευής αποθήκευσης νέφους, στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί εξισορρόπηση φόρτου, οι παρακάτω μηχανισμοί μπορούν επίσης να αποτελέσουν τμήμα αυτής της αρχιτεκτονικής νέφους:

- Επόπτης Ελέγχου (Audit Monitor): Όταν κατανέμεται φόρτος εργασίας κατά τον χρόνο εκτέλεσης, ο τύπος και η γεωγραφική τοποθεσία των IT πόρων, που επεξεργάζονται τα δεδομένα μπορούν να καθορίσουν αν είναι απαραίτητη η εποπτεία για ικανοποίηση νομικών και ρυθμιστικών απαιτήσεων
- Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor): Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι επόπτες ώστε να κάνουν παρακολούθηση φόρτου εργασίας και επεξεργασία δεδομένων κατά τον χρόνο εκτέλεσης
- Υπερεπόπτης (Hypervisor): Φόρτοι εργασίας ανάμεσα σε υπερεπόπτες και τους εικονικούς εξυπηρετητές που φιλοξενούν μπορούν να απαιτούν κατανομή
- Περίμετρος Λογικού Δικτύου (Logical Network Perimeter): Η περίμετρος λογικού δικτύου απομονώνει τα όρια δικτύου του καταναλωτή νέφους σε σχέση με το πώς και που κατανέμονται οι φόρτοι εργασίας
- Συστάδα Πόρων (Resource Cluster): Οι IT πόροι συστάδας λειτουργώντας σε active-active mode (δηλαδή όλοι οι πόροι είναι ενεργοί) χρησιμοποιούνται

συνήθως ώστε για να υποστηρίζουν εξισορρόπηση φορτίου ανάμεσα σε διάφορους κόμβους συστάδας

- Αντιγραφή Πόρων (Resource Replication): Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να παράγει νέα στιγμιότυπα εικονικοποιημένων IT πόρων ανταποκρινόμενος σε αιτήσεις κατανομής φόρτου εργασίας κατά τον χρόνο εκτέλεσης

2.4.2 Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων

Μια **αρχιτεκτονική συνεκμετάλλευσης πόρων** (resource pooling architecture) βασίζεται στην χρήση μιας ή περισσότερων δεξαμενών πόρων (resource pools), στις οποίες ομαδοποιούνται και συντηρούνται πανομοιότυποι IT πόροι από ένα σύστημα που διασφαλίζει αυτόματα ότι παραμένουν συγχρονισμένοι.

Μερικά συνηθισμένα παραδείγματα δεξαμενών πόρων είναι τα παρακάτω:

- Οι δεξαμενές φυσικών εξυπηρετητών (physical server pools) αποτελούνται από δικτυωμένους εξυπηρετητές στους οποίους έχουν εγκατασταθεί λειτουργικά συστήματα και άλλα απαραίτητα προγράμματα ή/και εφαρμογές και είναι έτοιμοι για άμεση χρήση.
- Οι δεξαμενές εικονικών πόρων (virtual server pools) συνήθως συγκροτούνται χρησιμοποιώντας ένα από τα αρκετά διαθέσιμα πρότυπα, τα οποία επιλέγονται απ' τον καταναλωτή νέφους κατά την διάρκεια της παροχής. Για παράδειγμα, ένας καταναλωτής νέφους μπορεί να διαμορφώσει μια δεξαμενή εξυπηρετητών Windows μεσαίας βαθμίδας με 4GB RAM ή μια δεξαμενή εξυπηρετητών Ubuntu χαμηλής βαθμίδας με 2 GB RAM
- Δεξαμενές αποθήκευσης (storage pools) ή δεξαμενές συσκευών αποθήκευσης νέφους (cloud storage device pools), αποτελούνται από βασιζόμενες σε αρχεία ή βασιζόμενες σε μπλοκ δομές αποθήκευσης, που περιέχουν κενές ή/και γεμάτες συσκευές αποθήκευσης νέφους.
- Οι δεξαμενές δικτύων (ή διασυνδεδεμένες δεξαμενές - interconnect pools) αποτελούνται από διαφορετικές εκ των προτέρων συγκροτημένες συσκευές συνδεσιμότητας δικτύου. Για παράδειγμα, μια δεξαμενή συσκευών εικονικών τειχών προστασίας ή φυσικών μεταγωγέων δικτύου μπορεί να δημιουργηθεί για πλεονάζουσα συνδεσιμότητα, εξισορρόπηση φορτίου ή συγκέντρωση ζεύξεων.
- Οι δεξαμενές Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας (ΚΜΕ) (CPU pools) είναι έτοιμες να κατανεμηθούν σε εικονικούς εξυπηρετητές και τυπικά διαιρούνται σε μεμονωμένους πυρήνες επεξεργασίας.
- Δεξαμενές φυσικής RAM (pools of physical RAM) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε νέους παρεχόμενους φυσικούς εξυπηρετητές ή σε κλιμακωμένους κατακόρυφα φυσικούς εξυπηρετητές.

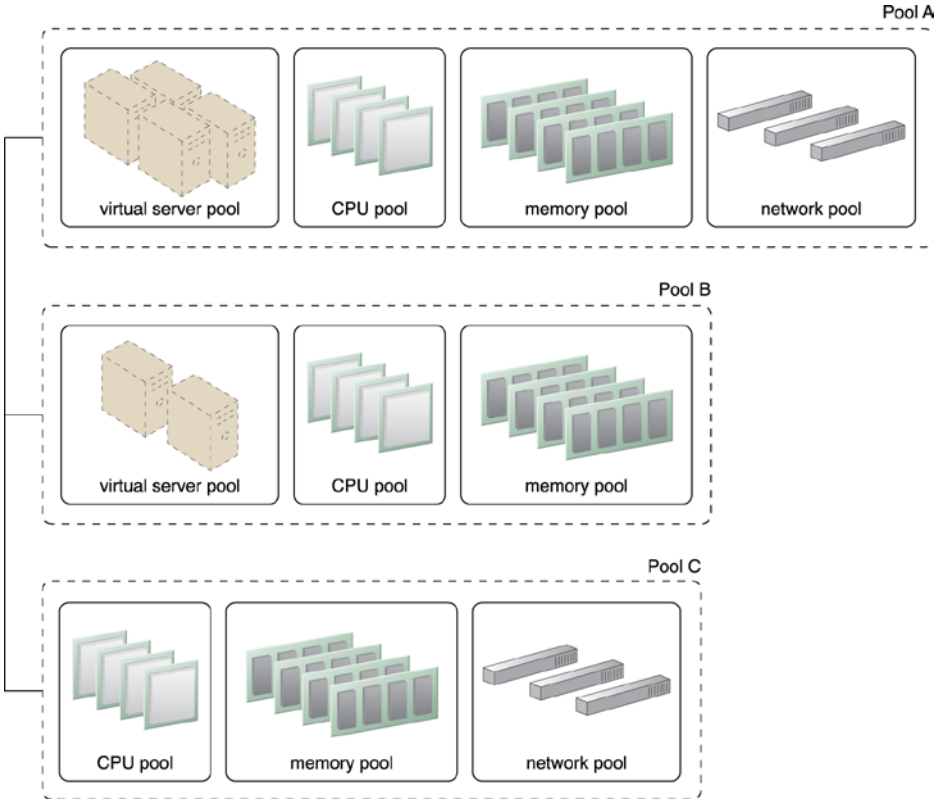
Μπορούν να δημιουργηθούν δεξαμενές για κάθε τύπο IT πόρου και μεμονομένες δεξαμενές μπορούν να ομαδοποιθούν σε μια μεγαλύτερη δεξαμενή, οπότε κάθε μεμονομένη δεξαμενή γίνεται μια υποδεξαμενή (sub-pool).

Οι δεξαμενές πόρων μπορούν να γίνουν πολύ σύνθετες και να δημιουργηθούν πολλαπλές δεξαμενές για συγκεκριμένους καταναλωτές νέφους ή για συγκεκριμένες εφαρμογές. Μπορεί να εγκαθιδρυθεί μια ιεραρχική δομή ώστε να δημιουργηθούν πατρικές, αδερφικές και ένθετες δεξαμενές για να διευκολυνθεί η οργάνωση ποικίλων απαιτήσεων συνεκμετάλλευσης πόρων.

Οι αδερφικές δεξαμενές πόρων (sibling resource pools) συνήθως δημιουργούνται από φυσικά ομαδοποιημένους IT πόρους, σε αντίθεση με τους IT πόρους που διαχέονται σε διαφορετικά κέντρα δεδομένων. Οι αδερφικές δεξαμενές απομονώνονται μεταξύ τους, έτσι ώστε κάθε καταναλωτής νέφους να έχει πρόσβαση μόνο στην δική του δεξαμενή.

Στο μοντέλο ένθετων δεξαμενών (nested pool model), μεγαλύτερες δεξαμενές διαιρούνται σε μικρότερες δεξαμενές, που ομαδοποιούν τον ίδιο τύπο IT πόρων. Οι ένθετες δεξαμενές μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εκχωρήσουν δεξαμενές πόρων σε διαφορετικά τμήματα ή ομάδες μέσα στον ίδιο οργανισμό καταναλωτή νέφους.

Μετά τον ορισμό των δεξαμενών πόρων, μπορούν να δημιουργηθούν πολλαπλά στιγμιότυπα IT πόρων από κάθε δεξαμενή, για να παρέχουν μια δεξαμενή “ενεργών” IT πόρων μέσα στη μνήμη.



Εικόνα 26. Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων

Εκτός των συσκευών αποθήκευσης νέφους και των εικονικών εξυπηρετητών που είναι συνηθισμένοι μηχανισμοί συνεκμετάλλευσης μέσω της χρήσης δεξαμενών, οι παρακάτω μηχανισμοί μπορούν επίσης να αποτελούν τμήμα αυτής της αρχιτεκτονικής νέφους:

- Επόπτης Ελέγχου (Audit Monitor): Αυτός ο μηχανισμός εποπτεύει την χρησιμοποίηση δεξαμενών πόρων προκειμένου να διασφαλίσει ότι υπάρχει συμμόρφωση με απαιτήσεις ιδιωτικότητας και ρυθμίσεων, ειδικά όταν οι δεξαμενές περιέχουν συσκευές αποθήκευσης νέφους ή δεδομένα φορτωμένα στη μνήμη
- Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor): Διάφοροι επόπτες χρήσης νέφους εμπλέκονται στην παρακολούθηση και στον συγχρονισμό κατά τον χρόνο εκτέλεσης, που απαιτούνται από τους IT πόρους οι οποίοι βρίσκονται σε δεξαμενές και σε υποκείμενα συστήματα διαχείρισης

- Υπερεπόπτης (Hypervisor): Ο μηχανισμός υπερεπόπτη πέρα από την φιλοξενία των εικονικών εξυπηρετητών και των ίδιων των δεξαμενών πόρων είναι υπεύθυνος για την παροχή εικονικών εξυπηρετητών με πρόσβαση σε δεξαμενές πόρων
- Περίμετρος Λογικού Δικτύου (Logical Network Perimeter): Η περίμετρος λογικού δικτύου χρησιμοποιείται για να οργανώνει και να απομονώνει λογικά δεξαμενές πόρων
- Επόπτης Χρέωσης με βάση τη Χρήση (Pay-Per-Use Monitor): Ο επόπτης χρέωσης με βάση την χρήση συλλέγει πληροφορίες χρήσης και τιμολόγησης για το πώς κατανέμονται και χρησιμοποιούνται IT πόροι σε μεμονομένους καταναλωτές νέφους από διάφορες δεξαμενές
- Σύστημα Απομακρυσμένης Διαχείρισης (Remote Administration System): Αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται συνήθως για αλληλεπίδραση με τα συστήματα παρασκηνίου (backend systems) και με προγράμματα για να παρέχει λειτουργίες διαχείρισης πόρων μέσω ενός front-end portal
- Σύστημα Διαχείρισης Πόρων (Resource Management System): Ο μηχανισμός του συστήματος διαχείρισης πόρων παρέχει στους καταναλωτές νέφους τα εργαλεία και τις επιλογές διαχείρισης αδειών για διαχείριση δεξαμενών πόρων
- Αντιγραφή Πόρων (Resource Replication): Αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται για να παρέχει νέα στιγμιότυπα IT πόρων για δεξαμενές πόρων

2.4.3 Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης

Η **αρχιτεκτονική δυναμικής κλιμάκωσης** (dynamic scalability architecture) είναι ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο, που βασίζεται σε ένα σύστημα προκαθορισμένων συνθηκών κλιμάκωσης όπου η δυναμική δέσμευση IT πόρων πυροδοτείται από δεξαμενές πόρων. Η δυναμική δέσμευση παρέχει την δυνατότητα της μεταβλητής χρησιμοποίησης βάση των διακυμάνσεων της ζήτησης χρήσης, εφόσον οι περιττοί IT πόροι ανακτώνται αποτελεσματικά πάλι από το σύστημα, χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη αλληλεπίδραση.

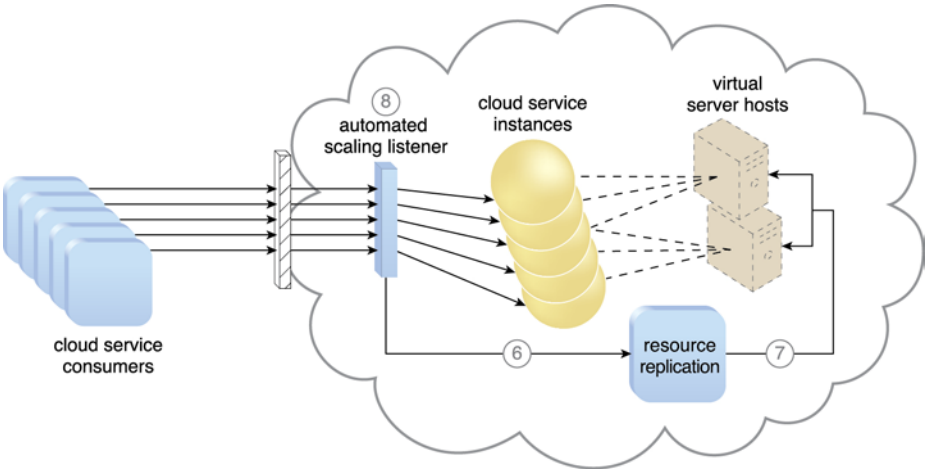
Ο αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης (scaling listener) συγκροτείται με κατώφλια φόρτου εργασίας, που υπαγορεύουν πότε πρέπει να προστεθούν νέοι IT πόροι στην επεξεργασία του φόρτου εργασίας. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να παρέχεται με λογική που καθορίζει πόσοι πρόσθετοι IT πόροι μπορούν να παρέχονται δυναμικά, με βάση τους όρους ενός δεδομένου συμβολαίου παροχής με ένα δεδομένο καταναλωτή νέφους.

Οι παρακάτω τύποι δυναμικής κλιμάκωσης που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Δυναμική Οριζόντια Κλιμάκωση (Dynamic Horizontal Scaling): Στιγμιότυπα IT πόρων αυξάνονται οριζόντια (scaled out) και μειώνονται οριζόντια (scaled in) ώστε να γίνει χειρισμός μεταβαλλόμενων φόρτων εργασίας. Ο αυτοματοποιημένος ακροατής κλιμάκωσης (automated scaling listener) εποπτεύει τις αιτήσεις και σηματοδοτεί την αντιγραφή πόρων, για να εκκινήσει η αντιγραφή IT πόρων, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις άδειες.
- Δυναμική Κατακόρυφη Κλιμάκωση (Dynamic Vertical Scaling): Στιγμιότυπα IT πόρων μεγεθύνονται (scaled up) ή μικραίνουν (scaled down), όταν προκύπτει ανάγκη, για να ρυθμιστεί η ικανότητα επεξεργασίας ενός πόρου. Για παράδειγμα

σε ένα εικονικό εξυπηρετητή που υπερφορτώνεται μπορεί να προστεθεί δυναμικά μνήμη ή να προστεθεί ένας πυρήνας επεξεργασίας.

- Δυναμική Μετεγκατάσταση (Dynamic Relocation): Ο IT πόρος μετεγκαθίστανται σε ένα σύστημα φιλοξενίας (relocated to a host) με περισσότερη χωρητικότητα. Για παράδειγμα, μια βάση δεδομένων μπορεί να χρειαστεί να μεταφερθεί από μια βασιζόμενη σε ταινία συσκευή αποθήκευσης SAN με χωρητικότητα I/O 4GB ανά δευτερόλεπτο, σε μια άλλη βασιζόμενη σε δίσκο συσκευή αποθήκευσης SAN με χωρητικότητα I/O 8GB ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 27. Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης

Η αρχιτεκτονική δυναμικής κλιμάκωσης μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικιλία IT πόρων που περιλαμβάνουν εικονικούς εξυπηρετητές και συσκευές αποθήκευσης νέφους. Εκτός των μηχανισμών βασικού αυτοματοποιημένου δέκτη κλιμάκωσης και αντιγραφής πόρων, σ' αυτή τα μορφή αρχιτεκτονικής νέφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι παρακάτω μηχανισμοί:

- Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor): Εξειδικευμένοι επόπτες χρήσης νέφους μπορούν να εποπτεύουν την χρήση χρόνου εκτέλεσης, ανταποκρινόμενοι σε δυναμικές διακυμάνσεις, που προκαλούνται απ' αυτή την αρχιτεκτονική
- Υπερεπόπτης (Hypervisor): Ο υπερεπόπτης καλείται από ένα σύστημα δυναμικής κλιμάκωσης για να δημιουργεί ή να αφαιρεί στιγμιότυπα εικονικού εξυπηρετητή ή να κλιμακώνεται ο ίδιος
- Επόπτης Χρέωσης με βάση την Χρήση (Pay-Per-Use Monitor): Ο επόπτης χρέωσης με βάση τη χρήση καλείται για να συλλέγει πληροφορίες κόστους χρήσης, ανταποκρινόμενος στη κλιμάκωση των IT πόρων

2.4.4 Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου

Η **αρχιτεκτονική ελαστικής διαχείρισης πόρου** (elastic resource capacity architecture) σχετίζεται κυρίως με την δυναμική παροχή εικονικών εξυπηρετητών, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα που κατανέμει και ανακτά Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (KME) και RAM σε άμεση ανταπόκριση στις κυμαινόμενες απαιτήσεις επεξεργασίας των φιλοξενούμενων IT πόρων (hosted IT resources).

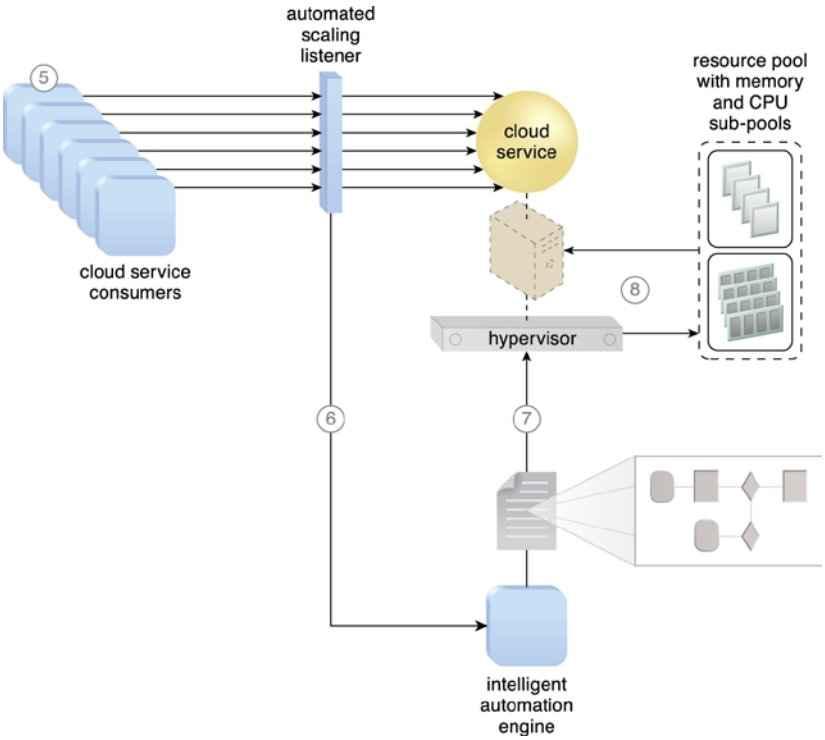
Οι δεξαμενές πόρων χρησιμοποιούνται από την τεχνολογία κλιμάκωσης που αλληλοεπιδρά με τον υπερεπόπτη (hypervisorσ) ή/και το Virtualized Infrastructure

Manager (VIM) για να δεσμεύει και να αποδεσμεύει πόρους Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας και RAM κατά το χρόνο εκτέλεσης. Η επεξεργασία χρόνου εκτέλεσης του εικονικού εξυπηρετητή παρακολουθείται έτσι ώστε πρόσθετη ισχύς επεξεργασίας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την δεξαμενή πόρων μέσω δυναμικής δέσμευσης, πριν να προσεγγιστούν τα όρια χωρητικότητας. Ανταποκρινόμενοι σ' αυτή την ανάγκη, ο εικονικός εξυπηρετητής και οι φιλοξενούμενες από αυτόν εφαρμογές και IT πόροι κλιμακώνονται κατακόρυφα.

Αυτός ο τύπος αρχιτεκτονικής νέφους μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε το script της ευφυούς μηχανής αυτοματοποίησης (intelligent automation engine) να στείλει την αίτησή του για κλιμάκωση μέσω του VIM αντί να στείλει απευθείας μέσω του υπερεπόπτη. Οι εικονικοί εξυπηρετητές που συμμετέχουν σε συστήματα ελαστικής διαχείρισης πόρων μπορεί να απαιτούν επανεκκίνηση για να τεθεί σε ισχύ η δυναμική κατανομή πόρων.

Ορισμένοι πρόσθετοι μηχανισμοί που μπορούν να περιληφθούν σ' αυτή την αρχιτεκτονική νέφους είναι οι εξής:

- Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor): Εξειδικευμένοι επόπτες χρησιμοποίησης νέφους συλλέγουν πληροφορίες χρησιμοποίησης πόρου σε IT πόρους πριν, κατά την διάρκεια και μετά την κλιμάκωση ώστε να βοηθήσουν στον ορισμό μελλοντικών κατωφλίων δυναμικότητας επεξεργασίας των εικονικών εξυπηρετητών
- Επόπτης Χρέωσης με βάση την Χρήση (Pay-Per-Use Monitor): Ο επόπτης χρέωσης με βάση την χρήση είναι υπεύθυνος για την συλλογή πληροφοριών κόστους χρήσης πόρου καθώς η χρήση αυξομειώνεται με την ελαστική παροχή
- Αντιγραφή Πόρων (Resource Replication): Η αντιγραφή πόρων χρησιμοποιείται από αυτό το αρχιτεκτονικό μοντέλο για να παράγει νέα στιγμιότυπα των κλιμακωμένων IT πόρων



Εικόνα 28. Αρχιτεκτονική Ελαστικής Δυναμικότητας Πόρου

2.4.5 Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας

Η **αρχιτεκτονική εξισορρόπησης φόρτου υπηρεσίας** (service load balancing architecture) μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική παραλλαγή της αρχιτεκτονικής κατανομής φόρτου εργασίας που αφορά ειδικά την κλιμάκωση των υλοποιήσεων των υπηρεσιών νέφους (scaling cloud service implementations). Δημιουργούνται πλεονάζουσες υλοποιήσεις υπηρεσιών νέφους (cloud service implementations), με την προσθήκη ενός συστήματος εξισορρόπησης φόρτου ώστε να διανέμει δυναμικά το φόρτο εργασίας.

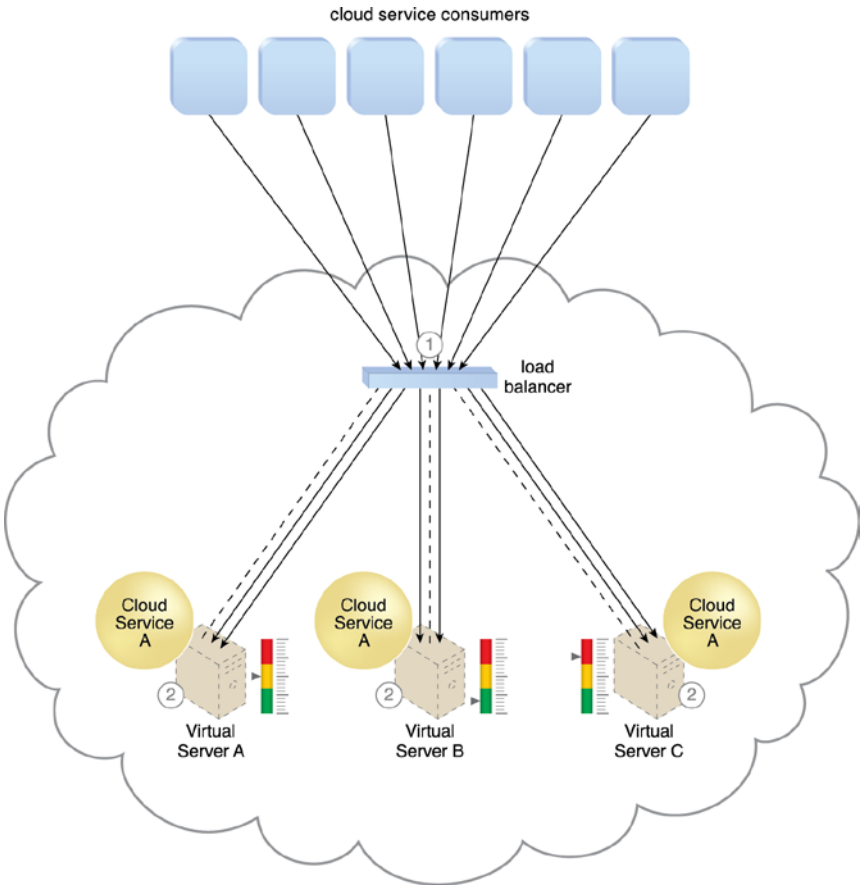
Οι αντίγραφες υλοποιήσεις υπηρεσιών νέφους οργανώνονται μέσα σε μια δεξαμενή πόρων ενώ ο εξισορροπητής φόρτου τοποθετείται είτε ως ένα εξωτερικό είτε ως ένα ενσωματωμένο συστατικό, για να επιτρέπει σε κεντρικούς διακομιστές (host servers) να εξισορροπούν το φόρτο εργασίας μόνοι τους.

Ανάλογα με τον εκτιμώμενο φόρτο εργασίας και την ικανότητα επεξεργασίας των περιβαλλόντων των κεντρικών διακομιστών, μπορούν να παράγονται πολλαπλά στιγμιότυπα κάθε υλοποίησης υπηρεσίας νέφους ως τμήμα μιας δεξαμενής πόρου, που ανταποκρίνεται σε διακυμάνσεις αιτήσεων πιο αποτελεσματικά.

Ο εξισορροπητής φόρτου μπορεί να τοποθετηθεί είτε ανεξάρτητα από τις υπηρεσίες νέφους και τους κεντρικούς τους διακομιστές, είτε ενσωματωμένος ως τμήμα της εφαρμογής ή του εξυπηρετητή. Στην δεύτερη περίπτωση ένας κύριος εξυπηρετητής με την λογική εξισορρόπησης φόρτου μπορεί να επικοινωνεί με γειτονικούς εξυπηρετητές για να εξισορροπεί το φόρτο εργασίας.

Η αρχιτεκτονική εξισορρόπησης φόρτου υπηρεσίας μπορεί να περιλαμβάνει τους παρακάτω μηχανισμούς, εκτός από τον εξισορροπητή φόρτου:

- Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor): Οι επόπτες χρήσης νέφους μπορούν να ασχολούνται με την εποπτεία στιγμιότυπων υπηρεσίας νέφους και των αντίστοιχων επιπέδων κατανάλωσης IT πόρων καθώς και με διάφορες εργασίες παρακολούθησης (runtime monitoring) και συλλογής δεδομένων χρήσης
- Συστάδα Πόρων (Resource Cluster): Ομάδες συστάδων που λειτουργούν σε active-active mode (active-active cluster groups) ενσωματώνονται σ’ αυτήν την αρχιτεκτονική, για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση φόρτου εργασίας ανάμεσα στα διαφορετικά μέλη της συστάδας.
- Αντιγραφή Πόρων (Resource Replication): Ο μηχανισμός αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται για να παράγει υλοποιήσεις υπηρεσίας νέφους για υποστήριξη απαιτήσεων εξισορρόπησης φόρτου



Εικόνα 29. Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φορτίου Υπηρεσίας

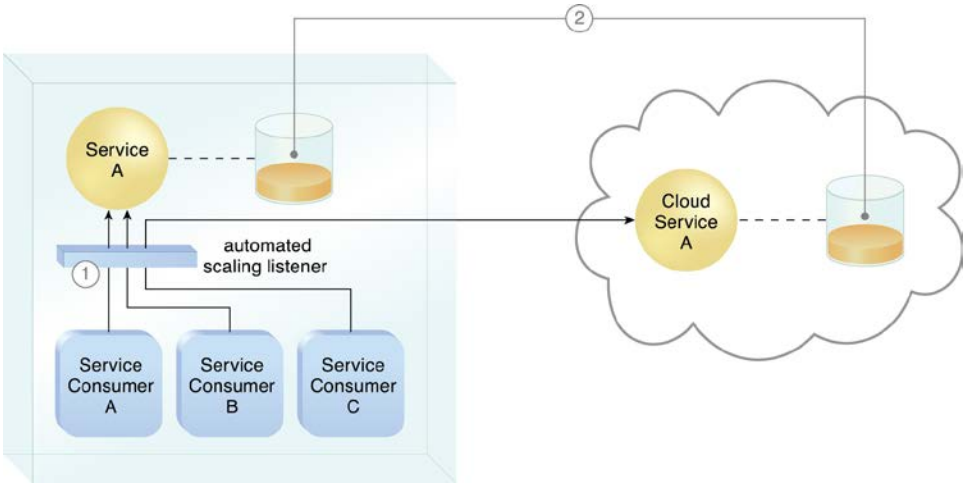
2.4.6 Αρχιτεκτονική Εξαιρετικά Δυναμικής Κλιμάκωσης Νέφους

Η **αρχιτεκτονική εξαιρετικά δυναμικής κλιμάκωσης νέφους** (cloud bursting architecture) καθιερώνει μια μορφή δυναμικής κλιμάκωσης που κλιμακώνει εξαιρετικά δυναμικά τοπικούς IT πόρους σε ένα νέφος όταν έχουν προσεγγιστεί προκαθορισμένα κατώφλια χωρητικότητας. Οι αντίστοιχοι βασιζόμενοι στο νέφος IT πόροι υλοποιούνται εκ των προτέρων αλλά παραμένουν ανενεργοί μέχρι να γίνει η δυναμική κλιμάκωση νέφους. Όταν δεν απαιτούνται πλέον, οι βασιζόμενοι στο νέφος πόροι αποδεσμεύονται και η αρχιτεκτονική «εκτοξεύεται» στο τοπικό περιβάλλον.

Η δυναμική κλιμάκωση νέφους είναι μια ευέλικτη αρχιτεκτονική κλιμάκωσης που παρέχει σε καταναλωτές νέφους την επιλογή να χρησιμοποιούν βασιζόμενους στο νέφους IT πόρους μόνο για να ικανοποιήσουν τις υψηλότερες απαιτήσεις χρήσης. Το θεμέλιο αυτού του αρχιτεκτονικού μοντέλου βασίζεται στους μηχανισμούς αυτοματοποιημένου δέκτη κλιμάκωσης και αντιγραφής πόρων.

Ο αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης καθορίζει πότε θα ανακατευθύνει αιτήσεις σε βασιζόμενους στο νέφος IT πόρους και χρησιμοποιείται αντιγραφή πόρων (resource replication) για να διατηρήσει τον συγχρονισμό ανάμεσα σε τοπικούς και βασιζόμενους στο νέφος IT πόρους σε ότι αφορά τις πληροφορίες κατάστασης.

Εκτός του αυτοματοποιημένου δέκτη κλιμάκωσης και της αντιγραφής πόρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πολλοί άλλοι μηχανισμοί ώστε να αυτοματοποιήσουν την δυναμική κλιμάκωση προς το νέφος και προς το τοπικό περιβάλλον για την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ανάλογα με τον τύπο του IT πόρου που κλιμακώνεται.



Εικόνα 30. Αρχιτεκτονική Εκτόξευσης Νέφους

2.4.7 Αρχιτεκτονική Παροχής Ελαστικού Δίσκου

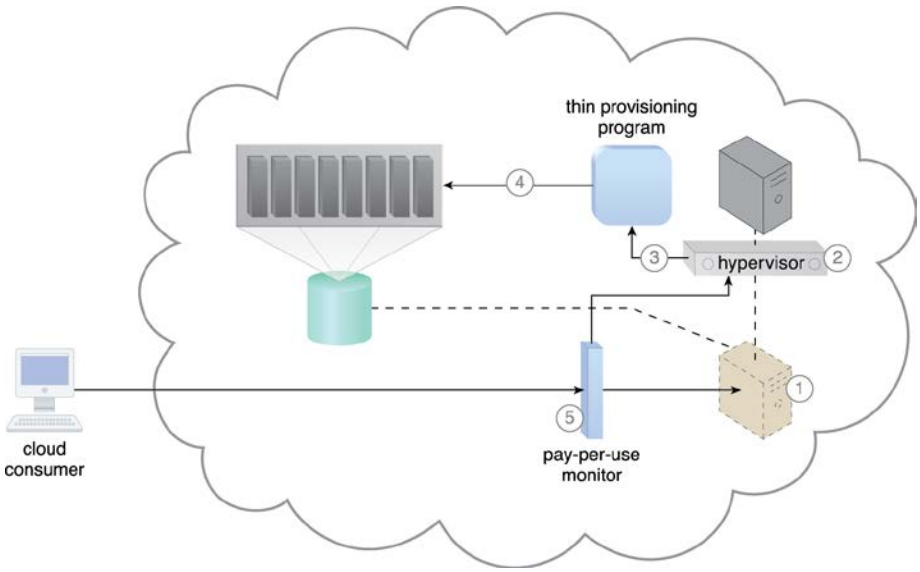
Οι καταναλωτές νέφους συνήθως χρεώνονται για χώρο αποθήκευσης βασιζόμενο στο νέφος με βάση μια σταθερή δέσμευση χώρου στο δίσκο, πράγμα που σημαίνει ότι οι χρεώσεις προκαθορίζονται με βάση την χωρητικότητα του δίσκου και δεν ευθυγραμμίζονται (aligned) με τα πραγματικά δεδομένα αποθήκευσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σενάριο στο οποίο σε ένα καταναλωτή νέφους παρέχεται ένας εικονικός εξυπηρετητής με το λειτουργικό σύστημα Windows Server και με τρεις σκληρούς δίσκους των 150GB. Ο καταναλωτής νέφους χρεώνεται για την χρήση 450GB χώρου αποθήκευσης, μετά την εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος, ακόμη και αν το λειτουργικό σύστημα απαιτεί μόνο 15GB αποθηκευτικού χώρου.

Η **αρχιτεκτονική παροχής ελαστικού δίσκου** (elastic disk provisioning architecture) καθιερώνει ένα δυναμικό σύστημα παροχής χώρου αποθήκευσης που διασφαλίζει ότι ο καταναλωτής νέφους χρεώνεται για την ακριβή ποσότητα χώρου αποθήκευσης που χρησιμοποιεί. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί τεχνολογία λεπτής παροχής (thin-provisioning technology) για την δυναμική δέσμευση χώρου στο δίσκο και υποστηρίζεται από την παρακολούθηση της χρήσης κατά το χρόνο εκτέλεσης, για να συλλέγονται ακριβή δεδομένα χρήσης για χρέωση.

Το λογισμικό λεπτής παροχής εγκαθίσταται σε εικονικούς εξυπηρετητές το οποίο μέσω του υπερεπόπτη επεξεργάζεται δυναμικά τη δέσμευση χώρου προς αποθήκευση, ενώ ο επόπτης χρέωσης με βάση χρήση παρακολουθεί και αναφέρει λεπτομερείς πληροφορίες χρήσης του δίσκου από δεδομένα που σχετίζονται με την χρέωση.

Σ' αυτή την αρχιτεκτονική μπορούν να περιληφθούν οι εξής μηχανισμοί εκτός των μηχανισμών συσκευής αποθήκευσης, εικονικού εξυπηρετητή, hypervisor και επόπτη πληρωμής με βάση τη χρήση:

- Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor): Μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένοι επόπτες χρήσης νέφους ώστε να παρακολουθούν και να καταγράφουν τις διακυμάνσεις χρήσης του χώρου αποθήκευσης
- Αντιγραφή Πόρων (Resource Replication): Η αντιγραφή πόρων είναι τμήμα ενός συστήματος παροχής ελαστικού δίσκου όταν απαιτείται μετατροπή ενός λεπτού-δίσκου (thin-disk storage) δυναμικής αποθήκευσης σε χοντρό-δίσκο (thick-disk storage) στατικής αποθήκευσης



Εικόνα 31. Αρχιτεκτονική Παροχής Ελαστικού Δίσκου

2.4.8 Αρχιτεκτονική Πλεονάζουσας Αποθήκευσης

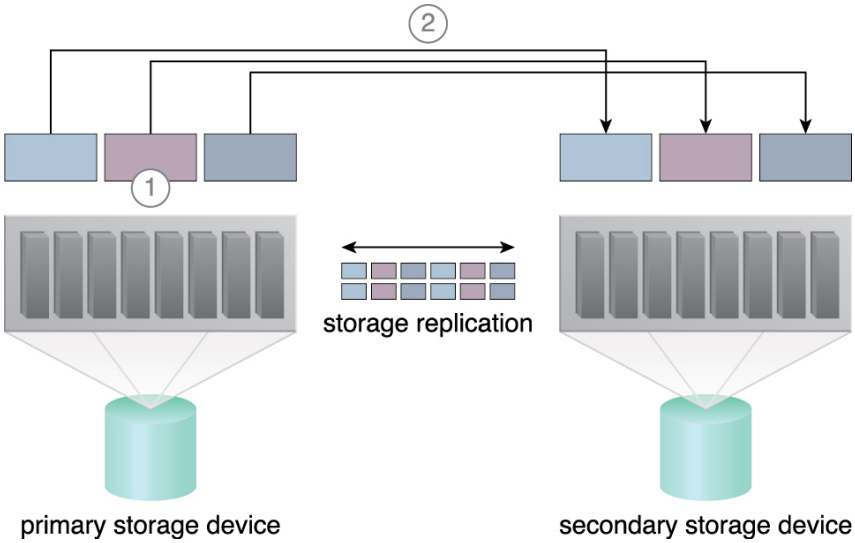
Οι συσκευές αποθήκευσης νέφους περιστασιακά αστοχούν από το υπόλοιπο σύστημα λόγω ζητημάτων συνδεσιμότητας δικτύου, αστοχίας ελεγκτών ή γενικής αστοχίας υλικού ή παραβιάσεων ασφαλείας. Η αξιοπιστία μιας συσκευής αποθήκευσης νέφους η οποία είναι σε κίνδυνο μπορεί να έχει πολλαπλασιαστικές επιπτώσεις και να προκαλέσει αστοχία όλων των υπηρεσιών, εφαρμογών και υποδομής μέσα στο νέφος, που βασίζονται στη διαθεσιμότητά της.

Η **αρχιτεκτονική πλεονάζουσας αποθήκευσης** (redundant storage architecture) εισάγει μια δευτερεύουσα διπλότυπη συσκευή αποθήκευσης νέφους (duplicate cloud storage device), ως τμήμα ενός συστήματος μεταγωγής που συγχρονίζει τα δεδομένα της με τα δεδομένα της κύριας συσκευής αποθήκευσης νέφους. Μια πύλη υπηρεσίας αποθήκευσης (service gateway) ανακατευθύνει τις αιτήσεις του καταναλωτή νέφους στην δευτερεύουσα συσκευή όταν η κύρια συσκευή αστοχήσει.

Αυτή η αρχιτεκτονική νέφους βασίζεται κυρίως σε ένα σύστημα αντιγραφής χώρου αποθήκευσης που κρατά την κύρια συσκευή αποθήκευσης συγχρονισμένη με τις δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσής της.

Οι πάροχοι νέφους μπορούν να τοποθετούν δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσης νέφους σε μια διαφορετική γεωγραφική περιοχή απ’ την περιοχή της κύριας συσκευής αποθήκευσης νέφους συνήθως για οικονομικούς λόγους. Αλλά όμως αυτό μπορεί να εισάγει νομικά προβλήματα για ορισμένους τύπους δεδομένων. Η τοποθεσία των δευτερευουσών συσκευών αποθήκευσης νέφους μπορεί να υπαγορεύει το πρωτόκολλο και την μέθοδο που θα χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό, όπως ορισμένα πρωτόκολλα μεταφοράς αντιγράφων έχουν περιορισμούς αποστάσεων.

Ορισμένοι πάροχοι νέφους χρησιμοποιούν συσκευές αποθήκευσης με ελεγκτές διπλής συστοιχίας και αποθήκευσης για να βελτιώσουν τη διάταξη εφεδρείας των συσκευών και τοποθετούν δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσης σε μια διαφορετική φυσική τοποθεσία με σκοπό την εξισορρόπηση νέφους και την επαναφορά του από καταστροφές. Σ’ αυτή την περίπτωση οι πάροχοι νέφους μπορεί να χρειαστεί να μισθώσουν μια σύνδεση δικτύου μέσω ενός τρίτου παρόχου νέφους για να εγκαθιδρύσουν την αντιγραφή (replication) μεταξύ των δυο συσκευών.



Εικόνα 32. Αρχιτεκτονική Πλεονάζουσας Αποθήκευσης

2.4.9 Συγκριτική Ανάλυση Αρχιτεκτονικών Υπολογιστικού Νέφους

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται μια συγκριτική ανάλυση των Αρχιτεκτονικών Υπολογιστικού Νέφους παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.4 αναδεικνύοντας τις ομοιότητες και τις διαφορές τους.

2.4.9.1 Διαφορές Αρχιτεκτονικής Δυναμικής Κλιμάκωσης και Αρχιτεκτονικής Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου

Η Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης (dynamic scalability architecture) όπως επίσης και η Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου (elastic resource capacity architecture) κάνουν δυναμική δέσμευση IT πόρων από δεξαμενές πόρων. Η πρώτη βασίζεται σε ένα σύστημα όπου οι συνθήκες κλιμάκωσης είναι προκαθορισμένες με την δυναμική δέσμευση των IT πόρων να είναι μεταβλητή βάση των διακυμάνσεων της ζήτησης χρήσης, ενώ η δεύτερη σχετίζεται κυρίως με την δυναμική παροχή εικονικών εξυπηρετητών όπου χρησιμοποιεί ένα σύστημα που κατανέμει και ανακτά Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (ΚΜΕ) και μνήμη RAM με βάση τις διακυμάνσεις επεξεργασίας των IT hosted πόρων.

2.4.9.2 Διαφορές Αρχιτεκτονικής Εξισορρόπησης Φόρτου και Αρχιτεκτονικής Κατανομής Φόρτου

Η Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας (service load balancing architecture) είναι ειδική παραλλαγή της Αρχιτεκτονικής Κατανομής Φόρτου Εργασίας (workload distribution architecture) γιατί αφορά την κλιμάκωση των υλοποιήσεων των υπηρεσιών νέφους. Επίσης δημιουργούνται πλεονάζουσες υλοποιήσεις υπηρεσιών νέφους οι οποίες οργανώνονται μέσα σε μια δεξαμενή πόρων για να διανέμει ο εξισορροπητής φόρτου δυναμικά το φόρτο εργασίας σε αυτές. Ανάλογα το φόρτο εργασίας μπορούν να παράγονται πολλαπλά στιγμιότυπα κάθε υλοποίησης υπηρεσίας νέφους για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις πιο αποτελεσματικά. Αντίθετα η Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου Εργασίας κατανέμει ομοιόμορφα το φόρτο εργασίας ανάμεσα σε ήδη διαθέσιμους IT πόρους ακολουθώντας την λογική του χρόνου

εκτέλεσης με σκοπό να μειώσει τόσο την υποχρησιμοποίηση, όσο και την υπερχρησιμοποίηση των IT πόρων.

2.4.9.3 Διαφορές Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης και Αρχιτεκτονικής Εξαιρετικά Δυναμικής Κλιμάκωσης

Η Αρχιτεκτονική Εξαιρετικά Δυναμικής Κλιμάκωσης Νέφους (cloud bursting architecture) είναι ευέλικτη αρχιτεκτονική κλιμάκωσης που παρέχει σε καταναλωτές νέφους την επιλογή να χρησιμοποιήσουν πόρους νέφους για να ικανοποιήσουν υψηλότερες απαιτήσεις χρήσης όταν έχουν προσεγγιστεί προκαθορισμένα κατώφλια χωρητικότητας. Ενώ η Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης (dynamic scalability architecture) είναι αρχιτεκτονικό μοντέλο που βασίζεται σε ένα σύστημα με προκαθορισμένες συνθήκες κλιμάκωσης με την δυναμική δέσμευση IT πόρων να πυροδοτείται από δεξαμενές πόρων. Επίσης η δυναμική δέσμευση μπορεί να δίνει την δυνατότητα της μεταβλητής δέσμευσης πόρων βάση ζήτησης χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη αλληλεπίδραση.

2.4.9.4 Μηχανισμοί που Αποτελούν Τμήμα Κάθε Αρχιτεκτονικής Νέφους

Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιείται σύγκριση των αρχιτεκτονικών με βάση τα αρχιτεκτονικά τους στοιχεία τα οποία είναι καθοριστικά στη σωστή και αποδοτική λειτουργία κάθε αρχιτεκτονικής. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούν τους παρακάτω επόπτες ως τμήμα της αρχιτεκτονικής τους οι οποίοι είναι οι εξής:

- **Επόπτης Ελέγχου (Audit Monitor)**: Ο επόπτης ελέγχου είναι ένας μηχανσιμός που χρησιμοποιείται για να συλλέγει δεδομένα παρακολούθησης ελέγχου (audit tracking data) από δίκτυα και IT πόρους τα οποία υπαγορεύονται από υποχρεώσεις σύμβασης. Ο επόπτης ελέγχου χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
    - Στην Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου (workload distribution architecture) όταν κατανέμεται ο φόρτος εργασίας κατά το χρόνο εκτέλεσης, ο τύπος και η γεωγραφική τοποθεσία των IT πόρων που επεξεργάζονται τα δεδομένα, μπορούν να καθορίσουν αν είναι απαραίτητη η παρακολούθηση/εποπτεία για την εκπλήρωση των νομικών και ρυθμιστικών απαιτήσεων
    - Στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) ο επόπτης ελέγχου εποπτεύει την χρησιμοποίηση δεξαμενών πόρων για να εξασφαλίσει ότι υπάρχει συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας και της προστασίας των προσωπικών δεδομένων ειδικά όταν οι δεξαμενές περιέχουν συσκευές αποθήκευσης νέφους ή δεδομένα φορτωμένα στη μνήμη
- **Επόπτης Χρήσης Νέφους (Cloud Usage Monitor)**: Ο επόπτης χρήσης νέφους είναι ένα ελαφρύ και αυτόνομο πρόγραμμα λογισμικού το οποίο είναι υπεύθυνο για συλλέγει και να επεξεργάζεται IT δεδομένα χρήσης πόρων. Ο επόπτης χρήστης νέφους χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
    - Στην Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου (workload distribution architecture) παρακολουθεί τον φόρτο εργασίας και την επεξεργασίας δεδομένων κατά το χρόνο εκτέλεσης

  - Στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) εμπλέκεται στην παρακολούθηση και στον συγχρονισμό κατά τον χρόνο εκτέλεσης των IT πόρων οι οποίοι βρίσκονται σε δεξαμενές και σε υποκείμενα συστήματα διαχείρισης
  - Στην Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης (dynamic scalability architecture) εποπτεύει τη χρήση του χρόνου εκτέλεσης ανταποκρινόμενος στις δυναμικές διακυμάνσεις που προκαλούνται από αυτή την αρχιτεκτονική
  - Στην Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου (elastic resource capacity architecture) συλλέγει πληροφορίες χρησιμοποίησης IT πόρων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την κλιμάκωση για να βοηθήσει στην διαμόρφωση μελλοντικών κατωφλιών για την δυναμική επεξεργασία των εικονικών server
  - Στην Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας (service load balancing architecture) ασχολείται με την εποπτεία των στιγμιότυπων cloud υπηρεσιών και των αντίστοιχων επιπέδων κατανάλωσης IT πόρων καθώς και με διάφορες εργασίες παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων
  - Στην Αρχιτεκτονική Παροχής Ελαστικού Δίσκου (elastic disk provisioning architecture) παρακολουθεί και καταγράφει τις διακυμάνσεις χρήσης του αποθηκευτικού χώρου

- **Υπερεπόπτης (Hypervisor)**: Ο υπερεπόπτης είναι ένα θεμελιώδες συστατικό της υποδομής εικονικοποίησης το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή στιγμιότυπων εικονικών servers από ένα φυσικό server. Ο υπερεπόπτης γενικά περιορίζεται σε ένα μόνο φυσικό server και μπορεί μόνο να δημιουργήσει εικονικά στιγμιότυπα αυτού του server. Ο υπερεπόπτης χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
  - Στην Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου (workload distribution architecture) ο υπερεπόπτης μπορεί να διανέμει το φόρτο εργασίας μεταξύ των εικονικών servers
  - Στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) ο υπερεπόπτης πέρα από τη φιλοξενία των εικονικών servers και των ίδιων των δεξαμενών πόρων, είναι υπεύθυνος για την παροχή εικονικών servers οι οποίοι μπορούν να έχουν πρόσβαση σε δεξαμενές πόρων
  - Στην Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης (dynamic scalability architecture) ο υπερεπόπτης καλείται από ένα σύστημα δυναμικής κλιμάκωσης για να δημιουργεί ή να αφαιρεί στιγμιότυπα εικονικών servers ή να κλιμακώνεται ο ίδιος
- **Επόπτης Χρέωσης με βάση τη Χρήση (Pay-Per-Use Monitor)**: Ο επόπτης χρέωσης με βάση τη χρήση είναι ένας μηχανισμός που μετράει την cloud-based χρήση των IT πόρων σύμφωνα με προκαθορισμένες παραμέτρους χρέωσης και δημιουργεί αρχεία καταγραφής χρήσης για υπολογισμό και σκοπούς χρέωσης. Ο επόπτης χρέωσης με βάση τη χρήση χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
  - Στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) ο επόπτης χρέωσης με βάση τη χρήση συλλέγει πληροφορίες χρήσης και χρέωσης για το πως κατανέμονται και

χρησιμοποιούνται οι IT πόροι σε μεμονομένους καταναλωτές νέφους από διάφορες δεξαμενές

- Στην Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης (dynamic scalability architecture) ο επόπτης χρέωσης με βάση τη χρήση καλείται για να συλλέγει πληροφορίες κόστους χρήσης, ανταποκρινόμενος στη κλιμάκωση των IT πόρων
- Στην Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου (elastic resource capacity architecture) ο επόπτης χρέωσης με βάση τη χρήση είναι υπεύθυνος για την συλλογή πληροφοριών κόστους χρήσης πόρων καθώς η χρήση αυξομειώνεται με την ελαστική διαχείριση πόρων

- **Περίμετρος Λογικού Δικτύου (Logical Network Perimeter)**: Ο επόπτης περιμέτρου του λογικού δικτύου εγκαθιδρύει ένα όριο εικονικού δικτύου που μπορεί να καλύψει και να απομονώσει μια ομάδα συναφών cloud-based IT πόρων οι οποίοι μπορούν να διανεμηθούν φυσικά. Η έννοια αυτή ορίζεται ως η απομόνωση ενός δικτυακού περιβάλλοντος από το υπόλοιπο δίκτυο επικοινωνίας. Ο επόπτης περιμέτρου του λογικού δικτύου χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
  - Στην Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου (workload distribution architecture) ο επόπτης περιμέτρου λογικού δικτύου απομονώνει τα όρια δικτύου του καταναλωτή νέφους σε σχέση με το που και πως κατανέμεται ο φόρτος εργασίας
  - Στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) ο επόπτης περιμέτρου λογικού δικτύου χρησιμοποιείται για να οργανώνει και να απομονώνει λογικά τις δεξαμενές των πόρων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι επόπτες που αντιστοιχούν στις παραπάνω Αρχιτεκτονικές Υπολογιστικού Νέφους:

Πίνακας 3. Επόπτες που Αποτελούν Τμήμα Κάθε Αρχιτεκτονικής Νέφους

	Επόπτης Ελέγχου	Επόπτης Χρήσης Νέφους	Υπερεπόπτης	Επόπτης Χρέωσης με βάση τη Χρήση	Περίμετρος Λογικού Δικτύου
Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου	√	√	√		√
Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων	√	√	√	√	√
Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης		√	√	√	
Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου		√		√	
Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας		√			
Αρχιτεκτονική Παροχής Ελαστικού Δίσκου		√			

Οι αρχιτεκτονικές υπολογιστικού νέφους εκτός από τους παραπάνω επόπτες, χρησιμοποιούν επίσης ως τμήμα της αρχιτεκτονικής τους και συστήματα που αφορούν το λειτουργικό μέρος της κάθε αρχιτεκτονικής. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν τα παρακάτω συστήματα:

- **Σύστημα απομακρυσμένης διαχείρισης (Remote Administration System)**: Το σύστημα απομακρυσμένης διαχείρισης είναι ένας μηχανισμός που παρέχει εργαλεία και διεπαφές-χρήστη για εξωτερικούς διαχειριστές πόρων cloud για να διαμορφώνονται και να διαχειρίζονται cloud-based IT πόροι. Το σύστημα απομακρυσμένης διαχείρισης χρησιμοποιείται στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) συνήθως για αλληλεπίδραση με τα συστήματα παρασκηνίου (backend systems) και με προγράμματα για να παρέχει λειτουργίες διαχείρισης πόρων μέσω ενός front-end portal

- **Σύστημα διαχείρισης πόρων (Resource Management System)**: Το σύστημα διαχείρισης πόρων είναι ένας μηχανισμός που βοηθά στο συντονισμό των IT πόρων. Ο πυρήνας αυτού του συστήματος είναι ο virtual infrastructure manager (VIM) που συντονίζει το υλικό του διακομιστή έτσι ώστε τα στιγμιότυπα εικονικών servers να μπορούν να δημιουργηθούν από τον πιο κατάλληλο φυσικό server. Το σύστημα διαχείρισης πόρων χρησιμοποιείται στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) και παρέχει στους καταναλωτές νέφους τα εργαλεία και τις επιλογές διαχείρισης αδειών για διαχείριση των δεξαμενών πόρων

- **Συστάδα Πόρων (Resource Cluster)**: Η συστάδα πόρων είναι cloud-based IT πόροι οι οποίοι ποικίλουν γεωγραφικά και μπορεί να συνδυαστούν λογικά σε ομάδες για να βελτιώσουν την κατανομή και τη χρήση τους. Ο μηχανισμός της συστάδας πόρων χρησιμοποιείται για να ομαδοποιηθούν πολλαπλά στιγμιότυπα IT πόρων για να μπορούν να λειτουργήσουν ως ένας μοναδικός IT πόρος. Ο μηχανισμός της συστάδας πόρων χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
    - Στην Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου (workload distribution architecture) ο μηχανισμός της συστάδας IT πόρων λειτουργώντας σε active-active mode (δηλαδή όλοι οι πόροι είναι ενεργοί) χρησιμοποιείται συνήθως ώστε για να υποστηρίζει εξισορρόπηση φορτίου ανάμεσα σε διάφορους κόμβους συστάδας
    - Στην Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας (service load balancing architecture) ο μηχανισμός της συστάδας IT πόρων χρησιμοποιείται για να την δημιουργία ομάδων από συστάδες που λειτουργούν σε active-active mode (active-active cluster groups) για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση φόρτου εργασίας ανάμεσα στα διαφορετικά μέλη της συστάδας

- **Αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης (scaling listener)**: Ο αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης είναι ένας μηχανισμός που παρακολουθεί και ιχνηλατεί τις επικοινωνίες μεταξύ των καταναλωτών cloud υπηρεσιών και των cloud υπηρεσιών για σκοπούς δυναμικής κλιμάκωσης. Οι αυτοματοποιημένοι δέκτες κλιμάκωσης υπάρχουν μέσα στο cloud, τυπικά κοντά στο firewall από όπου παρακολουθούν αυτόματα τις πληροφορίες κατάστασης φόρτου. Ο αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:

  - Στην Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης (dynamic scalability architecture) ο αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης συγκροτεί κατώφλια φόρτου εργασίας, που υπαγορεύουν πότε πρέπει να προστεθούν νέοι IT πόροι για την επεξεργασία του φόρτου εργασίας
  - Στην Αρχιτεκτονική Εξαιρετικά Δυναμικής Κλιμάκωσης Νέφους (cloud bursting architecture) ο αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης καθορίζει πότε θα ανακατευθύνει αιτήσεις σε cloud-based IT πόρους

- **Αντιγραφή Πόρων (Resource Replication)**: Η αντιγραφή πόρων ορίζεται ως η δημιουργία πολλαπλών στιγμιότυπων του ίδιου IT πόρου και εκτελείται συνήθως όταν η διαθεσιμότητα και η απόδοσή ενός IT πόρου πρέπει να ενισχυθούν. Η τεχνολογία της εικονικοποίησης χρησιμοποιεί αυτό το μηχανισμό για να αντιγράψει cloud-based IT πόρους. Ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται ως τμήμα των παρακάτω αρχιτεκτονικών νέφους ως εξής:
  - Στην Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου (workload distribution architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται να παράγει νέα στιγμιότυπα εικονικοποιημένων IT πόρων ανταποκρινόμενος σε αιτήσεις κατανομής φόρτου εργασίας κατά τον χρόνο εκτέλεσης
  - Στην Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων (resource pooling architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται για να παρέχει νέα στιγμιότυπα IT πόρων για δεξαμενές πόρων
  - Στην Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου (elastic resource capacity architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται για να παράγει νέα στιγμιότυπα των κλιμακωμένων IT πόρων
  - Στην Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας (service load balancing architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται για να παράγει υλοποιήσεις υπηρεσίας νέφους για υποστήριξη απαιτήσεων εξισορρόπησης φόρτου
  - Στην Αρχιτεκτονική Εξαιρετικά Δυναμικής Κλιμάκωσης Νέφους (cloud bursting architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται για να διατηρήσει τον συγχρονισμό ανάμεσα σε τοπικούς και cloud-based IT πόρους σε ότι αφορά τις πληροφορίες κατάστασης
  - Στην Αρχιτεκτονική Παροχής Ελαστικού Δίσκου (elastic disk provisioning architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιείται ως τμήμα ενός συστήματος παροχής ελαστικού δίσκου όταν απαιτείται μετατροπή ενός λεπτού-δίσκου (thin-disk storage) δυναμικής αποθήκευσης σε χοντρό-δίσκο (thick-disk storage) στατικής αποθήκευσης
  - Στην Αρχιτεκτονική Πλεονάζουσας Αποθήκευσης (redundant storage architecture) ο μηχανισμός της αντιγραφής πόρων χρησιμοποιεί μια δευτερεύουσα διπλότυπη συσκευή αποθήκευσης νέφους (duplicate cloud storage device), ως τμήμα ενός συστήματος μεταγωγής που συγχρονίζει τα δεδομένα της με τα δεδομένα της κύριας συσκευής αποθήκευσης νέφους

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι λειτουργίες που αντιστοιχούν στις παραπάνω Αρχιτεκτονικές Υπολογιστικού Νέφους:

Πίνακας 4. Λειτουργίες που Αποτελούν Τμήμα Κάθε Αρχιτεκτονικής Νέφους

	Σύστημα απομακρυσμένης διαχείρισης	Σύστημα διαχείρισης πόρων	Συστάδα πόρων	Αυτοματοποιημένος δέκτης κλιμάκωσης	Αντιγραφή πόρων
Αρχιτεκτονική Κατανομής Φόρτου			√		√
Αρχιτεκτονική Συνεκμετάλλευσης Πόρων	√	√			√
Αρχιτεκτονική Δυναμικής Κλιμάκωσης				√	
Αρχιτεκτονική Ελαστικής Διαχείρισης Πόρου					√
Αρχιτεκτονική Εξισορρόπησης Φόρτου Υπηρεσίας			√		√
Αρχιτεκτονική Εξαιρετικά Δυναμικής Κλιμάκωσης Νέφους				√	√
Αρχιτεκτονική Παροχής Ελαστικού Δίσκου					√
Αρχιτεκτονική Πλεονάζουσας Αποθήκευσης					√

2.5 Πλατφόρμες Υπολογιστικού Νέφους

2.5.1 Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2)

Ο κεντρικός κόμβος της cloud computing πλατφόρμας της Amazon είναι το Amazon Elastic Cloud, το οποίο είναι μια διαδικτυακή υπηρεσία που παρέχει την δυνατότητα χρησιμοποίησης υπολογιστικής δύναμης κάνοντας χρήση της τεχνικής των εικονικών εξυπηρετητών. Με το Amazon EC2, ο χρόνος που απαιτείται για την απόκτηση και εκκίνηση νέων servers είναι της τάξεως των λεπτών δίνοντας έτσι την ευελιξία είτε σε αύξηση είτε σε μείωση των υπολογιστικών πόρων βάση των απαιτήσεων. Για την χρήση του EC2 χρειάζεται από την επιχείρηση τα εξής:

- Να δημιουργήσει ένα Amazon Machine Image (AMI) που θα περιέχει τις βιβλιοθήκες, τα δεδομένα και τις ρυθμίσεις της ή να επιλέξει μια προ-ρυθμισμένη εικόνα για να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει αμέσως
- Για τα instances του Amazon EC2 να ρυθμίσει την ασφάλεια και την πρόσβαση στο διαδίκτυο
- Μέσω των υπηρεσιών API ή άλλων διοικητικών εργαλείων που παρέχονται να παρακολουθεί τα instances της AMI έχοντας ήδη επιλέξει ποιο τύπο εικονικής μηχανής και ποιο λειτουργικό σύστημα επιθυμούν να τρέχουν
- Να επιλέξει αν θέλει να εκτελούνται οι διαδικασίες της σε διαφορετικές τοποθεσίες κάνοντας χρήση στατικών IP διευθύνσεων ή τα instances της να λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία
- Να πληρώνει μόνο για τους υπολογιστικούς πόρους που πραγματικά καταναλώνει όπως τις ώρες των instances ή του όγκου μεταφοράς δεδομένων.

Εικόνα 33. Amazon EC2

2.5.1.1 Στοιχεία υπηρεσίας

- Ελαστικότητα: Το Amazon EC2 δίνει την δυνατότητα στον χρήστη είτε να αυξάνει είτε να μειώνει τους υπολογιστικούς πόρους και επομένως να μπορεί να χρησιμοποιεί από ένα μέχρι χιλιάδες servers ταυτόχρονα
- Ευελιξία: Το Amazon EC2 δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να μπορεί να επιλέξει πολλαπλά instances, λειτουργικά συστήματα όπως Microsoft Windows Server, Linux, Solaris και πακέτα λογισμικού. Επίσης μπορεί να επιλέγει ο χρήστης την διαμόρφωση της μνήμης ή το μέγεθος της CPU και του αποθηκευτικού χώρου

- Πλήρης έλεγχος: Ο χρήστης μπορεί να έχει την πλήρη έλεγχο στα instances δηλαδή μπορεί να έχει πρόσβαση και να αλληλοεπιδράσει με αυτά όπως θα έκανε με οποιοδήποτε μηχάνημα. Ακόμα με την χρήση της διαδικτυακής υπηρεσίας API, ο χρήστης μπορεί να σταματήσει το instance διατηρώντας τα στοιχεία του ή και να κάνει επανεκκίνηση του ίδιου του instance και να έχει πρόσβαση στην κονσόλα εξόδου του. Όλα τα παραπάνω μπορούν να γίνουν και απομακρυσμένα.
- Αξιοπιστία: Το Amazon EC2 προσφέρει ένα αξιόπιστο περιβάλλον όπου τα instances αντικατάστασης μπορεί να ανατίθενται γρήγορα και προβλέψιμα.
- Σχεδιασμός: Το Amazon EC2 λειτουργεί μέσα στην δικτυακή υποδομή της Amazon και είναι σχεδιασμένο για την χρήση και άλλων δικτυακών υπηρεσιών της Amazon όπως το Amazon Storage Service (υπηρεσία δικτυακού χώρου αποθήκευσης), το Amazon RDS (υπηρεσία βάσης δεδομένων της Amazon), το Amazon Simple Queue Service (Amazon SQS) για να επιτευχθεί ολοκληρωμένη λύση υπολογιστικών υπηρεσιών
- Ασφάλεια: Το Amazon EC2 παρέχει ασφάλεια στους υπολογιστικούς πόρους μέσω των υπηρεσιών διαδικτύου από την Amazon για την ρύθμιση του firewall. Κατά την έναρξη των πόρων του Amazon EC2 εντός του Virtual Private Cloud (VPC), ο χρήστης μπορεί να απομονώσει τα υπολογιστικά instances ορίζοντας το εύρος των IP διευθύνσεων που θέλει να χρησιμοποιήσει και να συνδεθεί με την υπάρχουσα υποδομή της χρησιμοποιώντας το βιομηχανικό πρότυπο κρυπτογραφημένο με πρωτόκολλο ασφαλείας IPsec VPN.

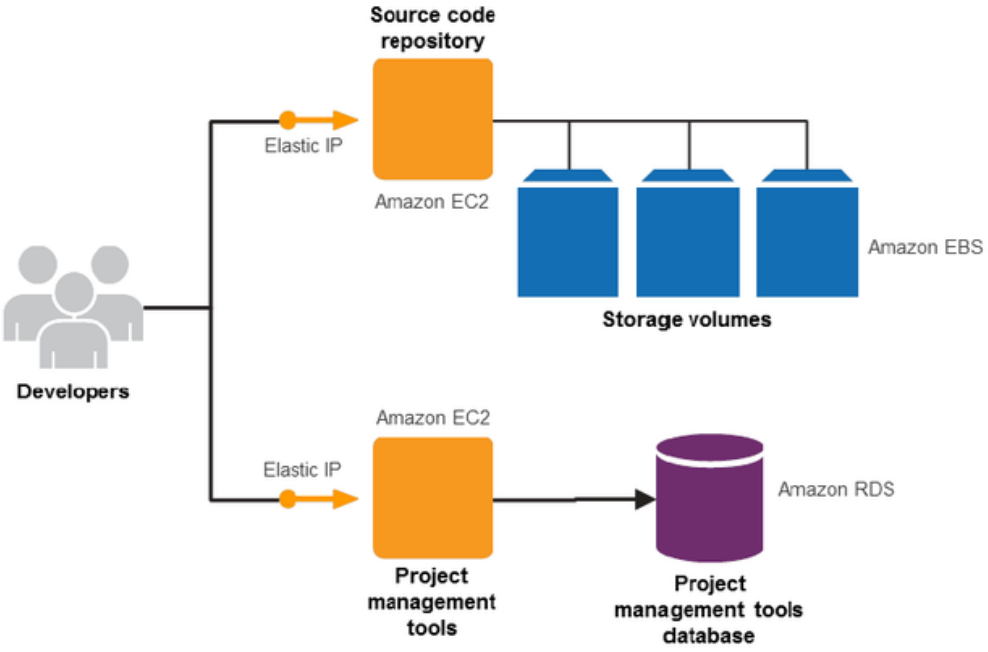
2.5.1.2 Χαρακτηριστικά Amazon EC2

Για την οικοδόμηση επεκτάσιμων και ανεκτικών από αποτυχίες εφαρμογών, το Amazon EC2 παρέχει μια σειρά από ισχυρά χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα ακόλουθα [72]:

- Εισαγωγή/εξαγωγή VM: Με αυτό το χαρακτηριστικό είναι δυνατή η εύκολη εισαγωγή εικονικών μηχανών (VMs) από το υπάρχον περιβάλλον του χρήστη στο Amazon EC2 και η εξαγωγή τους οποιαδήποτε στιγμή επιθυμούν. Οι εικονικές μηχανές κάνοντας χρήση των EC2 instances, οι χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν τις υπάρχουσες επενδύσεις σε εικονικές μηχανές οι οποίες ικανοποιούν την ασφάλεια και τη διαχείριση επιλογών
- Amazon Elastic Block Store (EBS): Το χαρακτηριστικό αυτό προσφέρει σταθερό χώρο αποθήκευσης για τα EC2 instances. Οι EBS αποθηκευτικοί χώροι είναι διαθέσιμοι σε μεγάλο βαθμό ανεξαρτήτως των αποθηκευτικών αναγκών και είναι αξιόπιστοι
- Ελαστικές IP διευθύνσεις: Οι ελαστικές IP διευθύνσεις είναι στατικές IP διευθύνσεις σχεδιασμένες για δυναμική υπολογιστική νέφους. Μια ελαστική IP διεύθυνση μπορεί να συνδεθεί με τον λογαριασμό του χρήστη ο οποίος έχει τον έλεγχο
- Ελαστική εξισορρόπηση φόρτου (Elastic Load Balancing): Το elastic load balancing μπορεί να διανέμει αυτόματα την εισερχόμενη κίνηση εφαρμογών σε πολλαπλά instances και επιτρέπει στο χρήστη να επιτύχει ακόμα μεγαλύτερη ανοχή σφαλμάτων στις εφαρμογές του παρέχοντας το ποσό της εξισορρόπησης φόρτου που απαιτείται για την εισερχόμενη κίνηση των εφαρμογών
- Πολλαπλές περιοχές: Με αυτό το χαρακτηριστικό, το Amazon EC2 δίνει την δυνατότητα σε μια επιχείρηση να τοποθετήσει τα instances σε διάφορες

τοποθεσίες. Έχουν κατασκευαστεί σε ξεχωριστές τοποθεσίες οι ζώνες διαθεσιμότητας για να προστατεύονται από τις αποτυχίες. Έτσι μια επιχείρηση προστατεύει τις εφαρμογές της από μια ενιαία θέση σε περίπτωση αποτυχίας

- Αυτόματη κλιμάκωση (Auto Scaling): Η αυτόματη κλιμάκωση δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να κλιμακώσει αυτόματα περισσότερο ή λιγότερο την χωρητικότητα του Amazon EC2. Με την αυτόματη κλιμάκωση ο χρήστης μπορεί να εξασφαλίσει ότι ο αριθμός των instances που χρησιμοποιεί κλιμακώνεται αυτόματα περισσότερο κατά τη διάρκεια της αιχμής των απαιτήσεων για να διατηρείται η απόδοση και λιγότερο κατά την διάρκεια ύφεσης των απαιτήσεων. Αυτή η κλιμάκωση έχει ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται το κόστος.



Εικόνα 34. Χαρακτηριστικά Amazon EC2

2.5.2 Microsoft Azure

Το Microsoft Azure είναι μια πλατφόρμα η οποία περιλαμβάνει λειτουργικό σύστημα και ένα ή περισσότερους τρόπους αποθήκευσης δεδομένων για να μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στον χρήστη οι εφαρμογές που τρέχουν και η αποθήκευση των δεδομένων σε ένα δικτυακά προσβάσιμο κέντρο δεδομένων.

Το Microsoft Azure ως πλατφόρμα της Microsoft είναι συμβατό με όλες τις υπόλοιπες εφαρμογές που τρέχουν λειτουργικό σύστημα Windows και αποτελεί επίσης το θεμέλιο για την εκτέλεση εφαρμογών και αποθήκευση δεδομένων στο cloud [73].

2.5.2.1 Εφαρμογές που παρέχουν τα Windows Azure

Στη συνέχεια περιγράφονται μερικά παραδείγματα από τα είδη των εφαρμογών που μπορούν να κατασκευαστούν από τα Windows Azure:

- Εφαρμογή για επιχειρηματικούς χρήστες: Ένας προμηθευτής λογισμικού μπορεί να δημιουργήσει μια εφαρμογή Software as a Service (SaaS) που έχει ως στόχο τους επιχειρηματικούς χρήστες έχοντας ως βάση το Windows Azure το οποίο

είναι σχεδιασμένο για να στηρίζει τις εφαρμογές Microsoft και ποικίλα λογισμικά για τις cloud επιχειρήσεις

- Εφαρμογή για καταναλωτές: Ένας προμηθευτής λογισμικού μπορεί να δημιουργήσει μια εφαρμογή Software as a Service (SaaS) που έχει ως στόχο τους καταναλωτές και όχι τις επιχειρήσεις. Έτσι μια επιχείρηση που στοχεύει σε μια μεγάλη καταναλωτική αγορά μπορεί να επιλέξει αυτή την πλατφόρμα για μια νέα εφαρμογή δεδομένου ότι το Windows Azure υποστηρίζει επεκτάσιμο λογισμικό
- Εφαρμογή για υπαλλήλους επιχείρησης: Οι επιχειρήσεις θα μπορούσαν να δημιουργήσουν και να εκτελέσουν εφαρμογές που θα χρησιμοποιούνται από τους δικούς τις υπαλλήλους με χρήση του Windows Azure. Ακόμα χάρη στην ασφάλεια και στην αξιοπιστία που προσφέρει το Windows Azure, θα μπορούσαν αυτές οι εφαρμογές να χρησιμοποιούνται και από καταναλωτές

2.5.2.2 Συστατικά Windows Azure

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα συστατικά του Windows Azure τα οποία είναι τα εξής:

- Compute: Παρόλο που το μοντέλο προγραμματισμού του Windows Azure δεν είναι ίδιο ακριβώς με το πρότυπο του Windows Server, εντούτοις οι εφαρμογές που εκτελούνται στο cloud της Microsoft εκτελούνται σε περιβάλλον Windows Server
- Storage: Στο cloud της Microsoft αποθηκεύονται δυαδικά και δομημένα δεδομένα
- Fabric controller: Σε ολόκληρη την πλατφόρμα του Windows Azure ο fabric controller αναπτύσσει, παρακολουθεί και διαχειρίζεται τις εφαρμογές και τις ενημερώσεις λογισμικού του συστήματος
- Content Delivery Network (CDN): Το Content Delivery Network επιταχύνει την πρόσβαση σε δεδομένα του Windows Azure από όλο τον κόσμο διατηρώντας προσωρινή αποθήκευση αντιγράφων σε παγκοσμίως
- Connect: Μεταξύ των εσωτερικών υπολογιστών και εφαρμογών του Windows Azure επιτρέπεται η δημιουργία συνδέσεων σε επίπεδο IP. Ένα Windows Azure computer μπορεί να τρέξει πολλά είδη εφαρμογών έχοντας κάθε εφαρμογή ένα ή περισσότερους ρόλος. Το Windows Azure τρέχει πολλαπλά instances του κάθε ρόλου με ενσωματωμένη εξισορρόπηση φορτίου για να εξαπλωθεί. Οι ρόλοι που μπορούν να επιλέξουν οι προγραμματιστές είναι οι παρακάτω:
    - Web roles: Οι Web roles εξυπηρετούν την ευκολότερη δημιουργία Web-based εφαρμογών. Κάθε Web role instance έχει προ-εγκατεστημένη εφαρμογή διακομιστή για την δημιουργία εφαρμογών με χρήση ASP.NET, Windows Communication Foundation (WCF) ή άλλες τεχνολογίες Web. Οι προγραμματιστές μπορούν να αναπτύξουν εφαρμογές κάνοντας χρήση και άλλων τεχνολογιών που δεν είναι της Microsoft, όπως Java, Python και PHP
    - Worker roles: Η διαφορά του Worker role από του Web role είναι ότι οι Worker roles δεν έχουν IIS διαμόρφωση και επομένως ο κώδικας που εκτελείται δεν φιλοξενείται από τις IIS υπηρεσίες. Για παράδειγμα οι worker roles θα μπορούν να εκτελούν μια προσομοίωση ή να χειρίζονται το processing ενός video

- VM roles: Ένας VM role τρέχει ένα user-provided Windows Server και επίσης μπορεί να μεταφέρει εφαρμογές από Windows Server σε Windows Azure

2.5.2.3 Λειτουργίες του Windows Azure

- Λειτουργία: Ένας προγραμματιστής μπορεί να χρησιμοποιήσει το portal για το Windows Azure για να υποβάλει μια εφαρμογή στο Windows Azure. Εκτός από την ίδια την εφαρμογή, υποβάλλονται και οι πληροφορίες που αναφέρουν πόσα instances θα πρέπει να τρέξει ο κάθε ρόλος. Στη συνέχεια ο Windows Azure fabric controller δημιουργεί μια εικονική μηχανή (VM) για κάθε instance και την εκτέλεση του κώδικα για τον κατάλληλο ρόλο στο VM. Η υλοποίηση των εφαρμογών μπορούν να γίνουν με τη χρήση των HTTP, HTTPS και TCP πρωτοκόλλων
- Αποθήκευση: Η αποθήκευση στο Windows Azure γίνεται με χρήση ενός άλλου συστατικού της πλατφόρμας, το SQL Azure, ή διατηρούνται εσωτερικά με κάποιο άλλο τρόπο. Η αποθήκευση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση της μορφής blobs όπου το κάθε ένα από αυτά μπορεί να έχει πάνω από ένα terabyte. Άλλη μορφή αποθήκευσης είναι μέσω πινάκων που διαθέτουν τα Windows Azure. Τα δεδομένα του καθενός αποθηκεύονται σε μια ομάδα οντοτήτων που περιέχουν ιδιότητες. Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης είναι με χρήση ουρών όπου η βασική λειτουργία τους είναι να βοηθούν τους Web roles να επικοινωνούν ασύγχρονα με τους Worker roles. Όλα τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο Windows Azure παράγονται τρεις φορές ανεξάρτητα με ποιο τρόπο θα γίνει η αποθήκευση. Έτσι θα υπάρχει πάντα ένα ασφαλές αντίγραφο ότι και αν συμβεί
- Εφαρμογές: Ένας προγραμματιστής μπορεί να δημιουργήσει εφαρμογές στο Windows Azure επιλέγοντας όμως την ίδια γλώσσα προγραμματισμού και τα ίδια εργαλεία που χρησιμοποιούν τα Windows. Για παράδειγμα μπορεί να γράψει ένα web role χρησιμοποιώντας ASP.NET ή WCF και C#
- Εντοπισμός σφαλμάτων: Προκειμένου να γίνεται εντοπισμός και παρακολούθηση των σφαλμάτων στις εφαρμογές Windows Azure, ο προγραμματιστής μπορεί με χρήση του API να καταγράφει πληροφορίες που αφορούν την εφαρμογή. Επίσης μπορεί να ρυθμίσει το σύστημα να συλλέγει τους μετρητές επιδόσεων μιας εφαρμογής, να πραγματοποιεί μετρήσεις χρήσης CPU και να αποθηκεύει τα crash dumps σε περίπτωση σφάλματος εφαρμογής.

  Τα δεδομένα και οι εφαρμογές του Windows Azure υπάρχουν σε Microsoft Data Centers όπου το σύνολο των μηχανημάτων είναι αφιερωμένα στο Windows Azure. Το λογισμικό που τρέχει σε αυτά τα Data Centers γίνεται από τον Fabric Controller ο οποίος εκτελεί τις παρακάτω ενέργειες:

  - Monitoring περιοδικά των εκτελούμενων εφαρμογών
  - Επιλέγει που πρέπει να τρέξουν οι νέες εφαρμογές διαλέγοντας φυσικούς διακομιστές για βέλτιστη αξιοποίηση του υλικού. Όλες αυτές οι πληροφορίες για κάθε εφαρμογή ορίζονται σε XML αρχεία, τα οποία αυτά τα διαβάζει ο fabric controller και καθορίζει πόσα VMs πρέπει να δημιουργηθούν.

2.5.3 Google App Engine

Το Google App Engine δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να εκτελούν εφαρμογές διαδικτύου στην υποδομή της Google. Συγκριτικά με το Amazon EC2, το Google App Engine δεν επιτρέπει ευελιξία στην υποδομή του συστήματος. Όμως το γεγονός ότι παρέχει μια υποδομή απαλλάσσει τους κατασκευαστές από τις διάφορα προβλήματα που απορρέουν από την εγκατάσταση μεγάλων εφαρμογών καθώς επίσης και από τις ανάγκες διαχείρισης.

Στο Google App Engine δεν υπάρχουν διακομιστές. Οι εφαρμογές είναι εύκολο να αναπτυχθούν και να συντηρηθούν και καλύπτουν τις ανάγκες για αποθήκευση δεδομένων. Ένας χρήστης μπορεί να φορτώσει αυτή την εφαρμογή και αυτή να είναι έτοιμη να χρησιμοποιηθεί από ένα συγκεκριμένο domain name εξυπηρετώντας τους χρήστες. Οι εφαρμογές στο Google App Engine μπορούν να μοιραστούν μεταξύ των χρηστών ή και να περιοριστεί η πρόσβαση σε κάποιους χρήστες.

Τέλος στο Google App Engine μπορεί να ξεκινήσει μια εφαρμογή δωρεάν αρκεί να χρησιμοποιεί έως και 1 GB αποθηκευτικό χώρο. Μπορεί να χρησιμοποιεί αρκετή CPU και αρκετό bandwidth για να εξυπηρετείται αποτελεσματικά μια εφαρμογή εξυπηρετώντας έως και 5 εκατομμύρια προβολές το μήνα. Αν ξεπεραστούν τα παραπάνω δωρεάν όρια, τότε ξεκινάει η κοστολόγηση των πόρων.

2.5.3.1 Sandbox

Το Sandbox είναι μια υπηρεσία του Google App Engine το οποίο επιτρέπει στις εφαρμογές να εκτελούνται σε ένα ασφαλές περιβάλλον με περιορισμένη πρόσβαση στο λειτουργικό σύστημα. Έτσι το Google App Engine, εξαιτίας αυτών των περιορισμών, διανέμει τις web αιτήσεις σε μια εφαρμογή με πολλούς διακομιστές για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της κυκλοφορίας.

Για παράδειγμα οι περιορισμοί ασφαλείας του sandbox είναι οι παρακάτω:

- Μέσω του παρεχόμενου URL και των υπηρεσιών ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μπορεί να έχουν πρόσβαση μόνο οι υπολογιστές σε μια εφαρμογή
- Σε οποιοδήποτε runtime environment οι εφαρμογές δεν μπορούν να γράψουν στο σύστημα αρχείων. Η αίτηση μπορεί να διαβάσει αρχεία αλλά μόνο αυτά που φορτώθηκαν από τον κώδικα της εφαρμογής. Στη συνέχεια θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το Datastore App Engine, το memcache ή άλλες υπηρεσίες από την εφαρμογή

2.5.3.2 Datastore

Το Google App Engine παρέχει μια υπηρεσία αποθήκευσης δεδομένων η οποία είναι κατανεμημένη και διαθέτει ένα μηχανισμό ερωτημάτων. Το Datastore του Google App Engine δεν είναι σαν μια σχεσιακή βάση δεδομένων γιατί τα δεδομένα των αντικειμένων ή οι οντότητες έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Το Datastore είναι συνεπές και χρησιμοποιεί έλεγχο ταυτοχρονισμού
- Τα ερωτήματα μπορούν να επιστρέψουν δεδομένα εφαρμόζοντας ένα είδος φιλτραρίσματος και ταξινόμησης
- Η δομή των δεδομένων παρέχεται και εκτελείται από τον κωδικό αίτησης του χρήστη

- Μια διαδικασία ενημέρωσης επαναλαμβάνεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων αν άλλες διεργασίες προσπαθούν να ενημερώσουν την ίδια οντότητα ταυτόχρονα
- Μια εφαρμογή μπορεί να εκτελεί πολλαπλές λειτουργίες αποθήκευσης δεδομένων
- Το Datastore υλοποιεί συναλλαγές σε όλο το κατανεμημένο δίκτυο χρησιμοποιώντας ομάδες οντοτήτων

2.5.3.3 Google Accounts

Το Google App Engine για την ταυτοποίηση του χρήστη υποστηρίζει την ενσωμάτωση μιας εφαρμογής με τους λογαριασμούς της Google. Μέσω της εφαρμογής ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε ένα λογαριασμό στο Google και η πρόσβαση στη διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου να είναι το προβαλλόμενο όνομα που συνδέεται με το λογαριασμό. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί την εφαρμογή ποιο γρήγορα με την χρήση των λογαριασμών της Google επειδή δεν χρειάζεται να δημιουργήσει ένα νέο λογαριασμό.

2.5.3.4 Ανάπτυξη Workflow

Το Google App Engine παρέχει διάφορες υπηρεσίες για την διαχείριση της εφαρμογής όπως πακέτα ανάπτυξης λογισμικού για Java, Python και Go. Μέσα σε αυτά υπάρχει μια εφαρμογή που παρέχει εξομοίωση όλων των υπηρεσιών της Google App Engine και κάθε ένα SDK να περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες του App Engine και το σύνολο των APIs.

Ο web server προσομοιώνει και το ασφαλές περιβάλλον του sandbox περιλαμβανομένων των ελέγχων για την απόπειρα πρόσβασης σε πόρους συστήματος που δεν αναγνωρίζονται στο περιβάλλον του App Engine. Κάθε SDK περιλαμβάνει επίσης ένα εργαλείο για να μπορεί ο χρήστης να αποστείλει αίτηση για στο Google App Engine. Μόλις δημιουργηθεί ο κώδικας της εφαρμογής μπορεί να γίνει εκτέλεση αυτού του εργαλείου για να πραγματοποιηθεί η φόρτωση των δεδομένων. Αυτό το εργαλείο ζητά ένα Google email και τον κωδικό πρόσβασης.

Όταν δημιουργηθεί μια νέα έκδοση μιας εφαρμογής που ήδη τρέχει στο App Engine ο χρήστης μπορεί να την ανεβάσει ως νέα έκδοση. Η παλιά έκδοση θα συνεχίσει να εξυπηρετεί τους χρήστες μέχρι να μεταβεί κάποιος στην νέα. Δηλαδή η παλιά έκδοση θα συνεχίζει να λειτουργεί, αλλά θα είναι διαθέσιμη και η νέα έκδοση.

Το SDK της Java και Python υλοποιείται και τρέχει σε οποιαδήποτε πλατφόρμα με Java και Python αντίστοιχα συμπεριλαμβανομένων των Windows, Mac OS X και του Linux. Η admin console είναι ένα web-interface για τη διαχείριση των εφαρμογών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία νέων εφαρμογών, τη ρύθμιση των domain names, να ελεγχθεί ποια έκδοση της εφαρμογής τρέχει, να εξετασθεί η πρόσβαση και τα αρχεία καταγραφής των σφαλμάτων και να γίνει μετάβαση και εμφάνιση των δεδομένων μιας εφαρμογής [74].

2.5.3.5 Ουρές εργασιών

Η εφαρμογή μπορεί να εκτελέσει εργασίες πέρα από τα web requests, με βάση ένα χρονοδιάγραμμα που θα διαμορφωθεί σε ημερήσια ή ωριαία βάση και να θέσει τις εργασίες σε μια ουρά. Ο προγραμματισμός των εργασιών είναι γνωστός και σαν “cron jobs”

2.5.3.6 App Engine Services

Το Google App Engine δίνει την δυνατότητα στον χρήστη μέσω των παρεχόμενων υπηρεσιών του να εκτελεί συνήθεις εργασίες κατά την διαχείριση των εφαρμογών του. Παρακάτω περιγράφονται τα APIs που παρέχονται για πρόσβαση σε αυτές τις υπηρεσίες:

- URL Fetch: Με την χρήση του URL Fetch, οι αιτήσεις μπορούν να έχουν πρόσβαση σε πόρους του internet, όπως web υπηρεσίες, χρησιμοποιώντας την υπηρεσία URL App Engine
- Email: Με χρήση της υπηρεσίας Email App Engine, οι αιτήσεις μπορούν να στείλουν emails
- Memcache: Η υπηρεσία Memcahce διατηρεί όποια αίτηση είναι προσβάσιμη από πολλές εμφανίσεις της εφαρμογής του χρήστη, στην μνήμη cache παρέχοντας υψηλές επιδόσεις
- Image Manipulation: Η υπηρεσία Image Manipulation επιτρέπει στις εφαρμογές να χειριστούν εικόνες και οι χρήστες μπορούν να αλλάξουν το μέγεθος, να κάνουν περικοπή ή περιστροφή των JPEG ή PNG εικόνων

2.5.4 Open Nebula

Το Open Nebula είναι εφαρμογή ανοιχτού κώδικα η οποία διαχειρίζεται τις data center υποδομές προσφέροντας τη δυνατότητα για την δημιουργία εσωτερικών δημοσίων, ιδιωτικών και υβριδικών clouds παροχής υπηρεσιών (IaaS). Διαθέτει υπηρεσίες διαχείρισης cloud πόρων, μηχανισμών ασφαλείας και παρακολούθησης, και μπορεί να διαχειριστεί πόρους τόσο των εξωτερικών cloud όσο και του εσωτερικού βάση προκαθορισμών πολιτικών. Τα APIs τα οποία είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: XML-RPC, Libvirt, EC2 (Query) APIs και OpenNebula Cloud API (OCA).

Από πλευράς αρχιτεκτονικής περιλαμβάνει ορισμένα συστατικά με την κύρια ενότητα της αρχιτεκτονικής του να περιλαμβάνει τους φυσικούς διακομιστές και τους hypervisors τους, τους κόμβους αποθήκευσης και τα network fabric. Η διαχείριση των εργασιών εκτελούνται από οδηγούς που αλληλοεπιδρούν με τα APIs των hypervisors, με τι συσκευές αποθήκευσης και τις τεχνολογίες δικτύων των δημόσιων σύννεφων.

2.5.5 Yahoo open-source cloud service-engine

Το Network World Yahoo για να ενισχύσει την παραγωγικότητά τους αναπτύσσει μια μηχανή cloud service ανοιχτού κώδικα. Η μηχανή αυτή θα επιτρέπει στους προγραμματιστές να οικοδομήσουν υπηρεσίες σε containers που βρίσκονται πάνω στο virtual machine layer και θα μπορούν να αναπτύσσουν εφαρμογές γρήγορα οι οποίες θα τρέχουν μια σειρά από κοινές υπηρεσίες. Είναι κάπου μεταξύ υποδομής IaaS και

πλατφόρμας PaaS, δηλαδή ένα χαμηλότερο επίπεδο αφαίρεσης από αυτό που προβλέπεται από το Google App Engine.

Ο μηχανισμός cloud-serving είναι γραμμένος σε Java και C++ και υποστηρίζει PHP και Javascript. Πριν την απελευθέρωσή του ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το Yahoo θα αφαιρέσει μερικά στοιχεία που είναι ειδικά για το Yahoo τα οποία δεν θα ήταν χρήσιμα στους εξωτερικούς χρήστες.

2.5.6 Eucalyptus

Το Eucalyptus είναι ακρώνυμο του “Elastic Utility Computing Architecture for Linking your Programs to Useful Systems” και είναι εφαρμογή ανοιχτού κώδικα για δημιουργία IaaS σύννεφων. Είναι λογισμικό για υλοποίηση private clouds σε cluster περιβάλλον και δημιουργήθηκε για να παρέχει μια εφαρμογή ανοιχτού κώδικα όμοια σε λειτουργία όπως το Amazon Web Services API. Επομένως οι χρήστες μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με το eucalyptus cloud χρησιμοποιώντας τα ίδια εργαλεία που χρησιμοποιούν για να έχουν πρόσβαση με στο Amazon EC2.

Με το Eucalyptus είναι δυνατή η δημιουργία ιδιωτικών εσωτερικών και υβριδικών clouds και παρέχονται ακόμα λειτουργίες για χρήση πόρων του εσωτερικού cloud όσο και των πόρων δημοσίου cloud στην περίπτωση του υβριδικού cloud. Τα βασικά χαρακτηριστικά του Eucalyptus είναι τα παρακάτω:

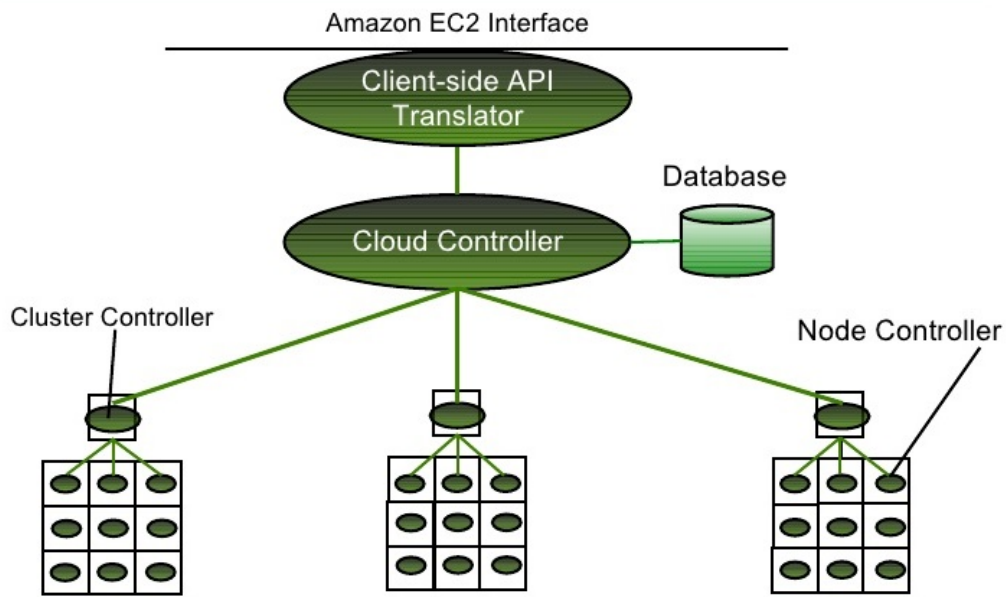
- Συμβατότητα με τα API της Amazon EC2
- Ομάδες ασφαλείας και elastic IPs
- Ασφαλή επικοινωνία με χρήση ασφαλών SOAP και Web Services
- Υποστήριξη Linux και Windows VMs
- Διαχείριση ομάδων και χρηστών

2.5.6.1 Αρχιτεκτονική του Eucalyptus

Η αρχιτεκτονική του Eucalyptus αποτελείται από τα παρακάτω συστατικα:

- Cluster Controller
- Cloud Controller
- Storage Controller
- Node Controller

Κάθε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι υλοποιημένο ως αυτόνομο web service και διαθέτει το δικό του web interface. Αυτή η σχεδίαση έχει τα πλεονεκτήματα ότι 1) κάθε συστατικό παρέχει τη λειτουργικότητά του μέσω από ένα API ανεξάρτητο από τη γλώσσα προγραμματισμού και 2) για ασφαλή επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους συστατικών αξιοποιούνται γνωστές τεχνολογίες ασφαλείας των Web Services.



Εικόνα 35. Αρχιτεκτονική του Eucalyptus

2.5.6.2 Συστατικά του Eucalyptus

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται ποιο αναλυτικά τα συστατικά του Eucalyptus τα οποία είναι τα εξής:

- Cluster Controller (CC): Ο Cluster Controller αναλαμβάνει τη διαχείριση της κίνησης στην περίπτωση χρήσης virtual network στις εικονικές μηχανές και δίνει αναφορά στον Cloud Controller για τους πόρους του cluster. Τέλος παίζει το ρόλο του διαμεσολαβητή ανάμεσα στον Cloud Controller και τους Node Controllers
- Cloud Controller (CLC): Ο Cloud Controller είναι υπεύθυνος για την διαχείριση και την έκθεση των πόρων. Διαθέτει EC2 web interface και συμβατό API
- Storage Controller (SC): Ο Storage Controller έχει την μπορεί να δημιουργεί στιγμιότυπα από συγκεκριμένες χρονικές στιγμές των δίσκων. Παρέχει υπηρεσίες αποθηκευτικού χώρου επιπέδου block, δημιουργεί και διαχειρίζεται εικονικούς δίσκους που χρησιμοποιούν εικονικές μηχανές
- Node Controller (NC): Ο Node Controller είναι μηχανήματα με virtualization επεκτάσεις στους επεξεργαστές. Πάνω τους τρέχουν hypervisors και ακολουθούν την εκτέλεση των Virtual Machines και είναι υπεύθυνοι για την εκκίνηση, την εκτέλεση και τον τερματισμός τους
- Walrus: Το Warlus χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει τα εικόνες των λειτουργικών συστημάτων που μπορούν να τρέξουν στο Cloud. Αυτή η υλοποίηση αποθηκευτικού χώρου είναι συμβατή με το Amazon S3 και παρέχει μηχανισμό μόνιμης αποθήκευσης

2.5.7 MBrace

Το MBrace είναι ένα προγραμματιστικό μοντέλο και πλαίσιο (framework) που στηρίζεται στη .NET στοίβα λογισμικού η οποία είναι κατάλληλη για κατανεμημένο προγραμματισμό. Βασίζεται στην F# γλώσσα προγραμματισμού, προσφέρει ένα εκφραστικό και ολοκληρωμένο τρόπο ανάπτυξης, υλοποιώντας και αποσφαλματώνοντας μεγάλου εύρους υπολογισμούς που τρέχουν σε περιβάλλοντα νέφους [75]. Το MBrace είναι ικανό στο να διανέμει αυθαίρετο κώδικα και προσφέρει πρόσβαση σε μια πλούσια συλλογή από δοκιμασμένες βιβλιοθήκες που προσφέρονται με το υποκείμενο .NET πλαίσιο. Το MBrace αντλεί έντονη έμπνευση από την κοινότητα Haskell, ειδικά από τις εργασίες συνδρομικότητας / παραλληλισμού και διαμοιράζει πολλές όμοιες ιδέες με το έργο HdpH. Το προγραμματιστικό του μοντέλο βασίζεται στην αρχή της μονάδας, σε μια αναδρομική γλώσσα ανώτερης τάξης, που προσφέρει ένα πλούσιο υπόστρωμα για την έκφραση πολλών διαφορετικών ειδών αλγοριθμικών μοτίβων (δηλ., αλγόριθμοι MapReduce, ροής, επαναληπτικοί ή βαθμιαίοι) οι οποίοι μπορούν να οριστούν στο επίπεδο του χρήστη ως βιβλιοθήκες, χωρίς να χρειαστεί να αλλάξει την υποκείμενη υποδομή [76].

Το MBrace προσφέρει μια σειρά από μοναδικά χαρακτηριστικά όπως τα εξής:

- Μεγαλύτερο εύρος (Bigger scope): Το MBrace παρέχει μια ενιαία εμπειρία για την συγγραφή διαφόρων ειδών αλγορίθμων. Ενώ άλλα πλαίσια εστιάζουν σε συγκεκριμένους αλγορίθμους ή πρότυπα (π.χ. MapReduce, Μοντέλο Actor). Το MBrace παρέχει τέτοιους αλγορίθμους ως επεκτάσεις (δηλ., η ροή εργασιών βιβλιοθήκης υλοποιεί MapReduce) το οποίο μπορεί να συνδυαστεί και να προσαρμοστεί από τους χρήστες.
- Κεντρικοποιημένη ανάπτυξη [77], παρακολούθηση και αποσφαλμάτωση (Centralized deployment, monitoring and debugging): Το MBrace παρέχει ένα κέλυφος [78] το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κεντρικοποιημένη παρακολούθηση και ανάπτυξη χωρίς την χρήση batch αρχείων, χειροκίνητη αντιγραφή κ.λ.π
- Συνοπτική και περιεκτική ανάπτυξη αλγορίθμου (Concise and succinct algorithm development): Η ανάπτυξη κώδικα χρησιμοποιώντας το MBrace δεν είναι γεμάτη από λεπτομέρειες ενορχήστρωσης το οποίο κάνει την συντήρηση κώδικα και την αποσφαλμάτωση λιγότερο φορτική (less cumbersome) ενώ το προγραμματιστικό του μοντέλο επιτρέπει σε λιγότερο έμπειρους χρήστες να αντιμετωπίσουν μεγάλα δεδομένα και αλγορίθμους υψηλής υπολογιστικής απόδοσης (high performance computing, HPC)

2.5.8 Δημοφιλείς Εφαρμογές Υπολογιστικού Νέφους Κλειστού Κώδικα

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται αλφαβητικά οι ποιο δημοφιλείς εφαρμογές υπολογιστικού νέφους κλειστού κώδικα που χρησιμοποιούνται από μικρές και μεγάλες επιχειρήσεις [79], [80].

- **Adobe Creative**: Το Adobe Creative είναι μια cloud σουίτα εφαρμογών της Adobe. Περιλαμβάνει εφαρμογές δημιουργίας γραφικών, επεξεργασίας video, ανάπτυξης ιστοσελίδων και φωτογραφίας. Όλες είναι διαθέσιμες με μηνιαία συνδρομή και ο χρήστης μπορεί να κατεβάζει τις εφαρμογές από την ιστοσελίδα και να τις χρησιμοποιεί μέχρι το τέλος της συνδρομής. Λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, OS X

- **Amazon Web Services:** Το Amazon Web Services είναι από τις παλιότερες και ποιο γνωστές εφαρμογές. Υποστηρίζουν την φιλοξενία εφαρμογών κάθε είδους από εφαρμογές που έχει φτιάξει μια εταιρία για προσωπική της χρήση μέχρι και εμπορικές εκδόσεις αυτών.
- **Box:** Το Box είναι μια εφαρμογή αποθήκευσης και διαμοιρασμού αρχείων στο cloud για εταιρίες. Υποστηρίζει διαχείριση περιεχομένου και η υπηρεσία της είναι δωρεάν και διαθέσιμη σε απλούς χρήστες. Λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, OS X
- **Concur:** Το Concur είναι μια εφαρμογή της εταιρίας SAP που προσφέρει υπηρεσίες διαχείρισης ταξιδιού και εξόδων για επιχειρήσεις. Περιλαμβάνει κράτηση εισιτηρίων, ξενοδοχείου, αυτόματη αναφορά εξόδων, αποζημίωση, λογιστικό έλεγχο και ενσωμάτωση επαγγελματικής κάρτας. Λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, OS X
- **DocuSign:** Το DocuSign είναι μια εφαρμογή που επιτρέπει στον χρήστη να υπογράφει ηλεκτρονικά βοηθώντας τις εταιρίες να αντικαταστήσουν τις έντυπες φόρμες με ηλεκτρονικές. Επίσης προσφέρει υπηρεσίες ταυτοποίησης και διαχείρισης ταυτότητας χρήστη.
- **Dropbox:** Το Dropbox είναι μια εφαρμογή αποθήκευσης στο cloud, διαμοιρασμού αρχείων, συγχρονισμού και συνεργασίας. Επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν ένα φάκελο ο οποίος θα περιέχει τα ίδια δεδομένα ανεξάρτητα την συσκευή. Επίσης μπορεί ο χρήστης να έχει πρόσβαση διαδικτυακά στα δεδομένα του από την ιστοσελίδα της εταιρίας
- **Evernote:** Το Evernote είναι μια δωρεάν εφαρμογή αποθήκευσης και οργάνωσης σημειώσεων. Οι σημειώσεις μπορεί να είναι ένα κομμάτι κειμένου, μια πλήρης ιστοσελίδα ή κομμάτι της, μια φωτογραφία, ένα ηχητικό μήνυμα ή ένα χειρόγραφο κείμενο
- **Google Analytics**: Το Google Analytics είναι μια δωρεάν υπηρεσία της Google που μετράει και αναφέρει την κίνηση ιστοσελίδων. Επίσης είναι ενσωματωμένη και η υπηρεσία AdWords. Οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν την ποιότητα της ιστοσελίδας τους και αν έχουν πετύχει συγκεκριμένους στόχους. Οι στόχοι μπορεί να είναι πωλήσεις, προβολές συγκεκριμένης σελίδας ή κατέβασμα συγκεκριμένου αρχείου. Το Google Analytics θεωρείται το καλύτερο εργαλείο και το ποιο διαδεδομένο για ανάλυση ιστοσελίδων στο διαδίκτυο.
- **Google Apps:** Το Google Apps είναι μια σουίτα εφαρμογών περισσότερο γνωστή για την συνεργατική επεξεργασία δεδομένων. Περιλαμβάνει εφαρμογές ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (Gmail), επεξεργαστή κειμένου (Docs), λογιστικά φύλλα (Sheets), λογισμικό παρουσίασης (Slides), αποθήκευση στο cloud (Drive), ημερολόγιο (Calendar) και πολλές άλλες εφαρμογές.
- **iCloud:** Το iCloud είναι εφαρμογή cloud της Apple και είναι από τις ποιο διαδεδομένες στον επιχειρηματικό κόσμο. Παρέχει αποθηκευτικό χώρο και δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας σε 320 εκατομμύρια χρήστες, ενώ μοιράζονται φωτογραφίες, μουσική και επιχειρηματικά έγγραφα. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, OS X
- **Jira:** Το Jira έχει πάρει το όνομα από την λέξη Gojira (στα Ιαπωνικά το όνομα του Godzilla), είναι ένα λογισμικό ανάπτυξης εφαρμογών που προσφέρει εντοπισμό σφαλμάτων και άλλων θεμάτων καθώς επίσης και δυνατότητες διαχείρισης έργου. Έχει ξεκινήσει από το 2002 η ανάπτυξή του από την εταιρία Atlassian

- **Microsoft Azure:** Το Microsoft Azure όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα είναι η δημόσια cloud πλατφόρμα της Microsoft και προσφέρει υπηρεσίες λογισμικού, ανάλυσης, αποθήκευσης και δικτύωσης. Οι χρήστες μπορούν ν διαλέξουν από αυτές τις υπηρεσίες και να αναπτύξουν νέες εφαρμογές ή να τρέξουν δικές τους εφαρμογές στο cloud. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, Linux
- **Microsoft Office 365:** Το Microsoft Office 365 είναι μια σουίτα εφαρμογών με μηνιαία συνδρομή. Για τους απλούς χρήστες περιλαμβάνει την χρήση των Office εφαρμογών (Word, Excel, PowerPoint, Access, Outlook, OneNote), αποθηκευτικό χώρο στο OneDrive και 60 λεπτά ομιλίας στο Skype. Για τις εταιρίες προσφέρει επιπλέον ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, υπηρεσίες κοινωνικού δικτύου μέσω Skype και Exchange Server και ενσωμάτωση με το Yammer. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, OS X
- **NetSuite:** Το NetSuite είναι μια σουίτα επαγγελματικών εφαρμογών, προσφέρει παρακολούθηση οικονομικών αποτελεσμάτων, διαχείριση πωλήσεων, εξυπηρέτηση πελατών και ηλεκτρονικό εμπόριο. Η πρόσβαση σε αυτές τις υπηρεσίες γίνεται με μηνιαία συνδρομή. Οι εφαρμογές αυτές κυρίως απευθύνονται σε μεσαίες επιχειρήσεις
- **Salesforce:** Το Salesforce είναι μια σουίτα εφαρμογών που χρησιμοποιείται συνήθως από τα τμήματα πωλήσεων και marketing για παρακολούθηση πελατών και συμβολαίων καθώς και στη δημιουργία marketing εκστρατειών και στην εξυπηρέτηση πελατών
- **WebEx:** Το WebEx είναι μια εφαρμογή της Cisco που προσφέρει συνεργασία κατ' απαίτηση, ηλεκτρονικές συναντήσεις, τηλεδιάσκεψη μέσω διαδικτύου και τηλεδιάσκεψη με video
- **Workday:** Το Workday είναι μια σουίτα εφαρμογών για διαχείριση οικονομικών και του ανθρώπινου δυναμικού μια επιχείρησης
- **Yammer:** Το Yammer είναι ένα δωρεάν εταιρικό κοινωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται για προσωπική επικοινωνία μέσα σε οργανισμούς. Η πρόσβαση καθορίζεται από το Internet domain, έτσι ώστε μόνο τα άτομα με εγκεκριμένες διευθύνσεις ηλεκτρονικού ταχυδρομείου να έχουν πρόσβαση. Μέσα από το κοινωνικό δίκτυο μπορούν να επικοινωνούν σαν ομάδες, να στέλνουν φωτογραφίες, έγγραφα, video και να επεξεργάζονται ομαδικά έγγραφα
- **Zendesk:** Το Zendesk είναι μια υπηρεσία cloud, για εξυπηρέτηση πελατών που προσφέρει ευκολότερη αλληλοεπίδραση μεταξύ εταιριών και πελατών. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, OS X

2.5.9 Δημοφιλείς Εφαρμογές Υπολογιστικού Νέφους Ανοιχτού Κώδικα

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται αλφαβητικά οι ποιο δημοφιλείς εφαρμογές υπολογιστικού νέφους ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιούνται από μικρές και μεγάλες επιχειρήσεις [81].

- **AppScale:** Το AppScale είναι χρηματοδοτούμενο από την Google, Ubuntu, Cloud Sherpas, Datastax, Canonical και Mirantis, και επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν τη δική τους πλατφόρμα ως υπηρεσία που τρέχει Google App Engine εφαρμογές ενώ παρέχει πρόσθετη παρακολούθηση και εργαλεία

δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας. Πολλοί πελάτες το χρησιμοποιούν για να δημιουργήσουν το δικό τους υβριδικό cloud. Διατίθενται υπηρεσίες επί πληρωμή. Το λειτουργικό σύστημα που υποστηρίζει είναι το Linux

- **Ceph:** Το Ceph προσφέρει μερική και ολική αποθήκευση καθώς και ένα σύστημα αρχείων συμβατό με POSIX για κατανεμημένη αποθήκευση. Η διαχείριση του προγράμματος γίνεται από τη Red Hat, η οποία πουλάει προϊόντα που βασίζονται στο Ceph. Το λειτουργικό σύστημα που υποστηρίζει είναι το Linux
- **Cloud Foundry:** Το Cloud Foundry είναι εφαρμογή ανοιχτού κώδικα PaaS, έχει ένα τεράστιο κατάλογο εταιρικών χρηματοδοτών που περιλαμβάνει τις Cisco, Accenture, Pivotal, IBM, Intel, SAP, EMC, HP, Rackspace και VMware. Έχει μια πολύ ενεργή κοινότητα προγραμματιστών με τακτικές δημοσιεύσεις σε blogs και επιμορφωτικές εκδηλώσεις.
- **Cloud Stack:** Το Cloud Stack είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα, υπό την αιγίδα του Ιδρύματος λογισμικού Apache, το οποίο έχει σχεδιαστεί για την ανάπτυξη και διαχείριση μεγάλων δικτύων εικονικών μηχανών ως μια υποδομή υψηλής διαθεσιμότητας και υψηλής κλιμάκωσης ως μια πλατφόρμα υποδομής ως υπηρεσία (IaaS). Γνωστοί χρήστες του είναι οι Cloudera, Citrix, Systems, China Telecom, Dell, Disney, Huawei, Nokia, SAP, Verizon και άλλες.
- **Cloud9 IDE:** Το Cloud9 είναι ένας Ubuntu desktop υπολογιστής βασισμένος στο cloud, αλλά και ένα IDE βασισμένο σε πρόγραμμα περιήγησης. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μια δωρεάν ή επί πληρωμή έκδοση της υπηρεσίας ή να δημιουργήσει το δικό του βασισμένο στο cloud IDE, χρησιμοποιώντας το πηγαίο κώδικα από το GitHub.
- **Docker:** Το containerization του Docker είναι μια αρκετά νέα τεχνολογία η οποία αποσπά μεγάλη προσοχή από αναλυτές του κλάδου και επιχειρήσεις. Περιγράφεται ως μια ανοιχτή πλατφόρμα για προγραμματιστές και sysadmins για να δημιουργήσουν, να φορτώσουν και να τρέξουν κατανεμημένες εφαρμογές. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Windows, Linux και OS X
- **Dirigible:** Το Dirigible είναι ιδιοκτησία της SAP και είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης ως υπηρεσία (IDEaaS) που υπόσχεται να βοηθήσει τους προγραμματιστές να αναπτύσσουν τις εφαρμογές τους εύκολα και γρήγορα. Το Dirigible είναι σε δοκιμαστική περίοδο και διατίθεται δωρεάν ενώ ο πηγαίος κώδικάς του βρίσκεται στο GitHub
- **Duplicati:** Το Duplicati είναι πρόγραμμα δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας, αποθηκεύει αυτόματα τα δεδομένα του πελάτη σε μια cloud υπηρεσία. Λειτουργεί με AWS, Microsoft OneDrive, Google Drive, Rackspace και ιδιωτικά cloud. Διαθέτει κρυπτογράφηση AES-256 και τα αρχειοθετημένα αρχεία μπορούν επίσης να υπογραφούν με Gnu Privacy Guard
- **Gluster:** Το Gluster είναι υπό την διαχείριση της Red Hat και ένα κατανεμημένο σύστημα αρχείων ανοιχτού κώδικα σχεδιασμένο για να χειριστεί petabytes δεδομένων. Διαθέτει υψηλή επεκτασιμότητα, επιδόσεις και διαθεσιμότητα. Υποστήριξη με χρέωση και συμβουλευτικές υπηρεσίες διατίθεται από τρίτους συνεργάτες. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα εξής: Linux, OS X, Free BSD
- **Group-Office:** Το Group-Office συνδυάζει λογισμικό συνεργασίας εταιρικού επιπέδου με μερική λειτουργικότητα CRM και μπορεί να αναπτυχθεί ενδο-εταιρικά ή στο cloud. Όλες οι βασικές λειτουργίες περιλαμβάνονται στην έκδοση κοινότητας ανοιχτού κώδικα. Η επι πληρωμή επαγγελματική έκδοση προσθέτει

helpdesk, καταγραφή χρόνου, φορητό συγχρονισμό και διαχείριση έργων. Η επεξεργασία εγγράφων με χρέωση και η αναζήτηση εγγράφου διατίθενται με ξεχωριστή χρέωση.

- **Hadoop:** Το Hadoop είναι τόσο διαδεδομένο έτσι ώστε έχει γίνει σχεδόν συνώνυμο με δεδομένα μεγάλου όγκου. Είναι μια συλλογή από εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατανεμημένα υπολογιστικά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων υπολογιστικών περιβαλλόντων cloud.
- **Oneye:** Το Oneye βασίζεται στο ανοιχτό πηγαίο κώδικα του eyeOS. Επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν ένα cloud desktop με δικούς τους διακομιστές και να έχουν πρόσβαση από οποιαδήποτε συσκευή μέσω ενός προγράμματος περιήγησης. Το λειτουργικό σύστημα που υποστηρίζει είναι το Linux
- **OpenHAB:** Το OpenHAB είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα και περιγράφει τον εαυτό του ως ένα προμηθευτή λογισμικού αυτοματισμού ανεξάρτητης τεχνολογίας. Στόχος του είναι να επιτρέψει στους χρήστες να ελέγχουν μια ποικιλία διαφορετικών συσκευών από ένα ενιαίο πρόγραμμα.
- **OpenStack:** Το OpenStack υποστηρίζεται από την Red Hat, SUSE, Rackspace, IBM, Intel, Ubuntu και AT&T. Τροφοδοτεί εκατοντάδες δημόσια και ιδιωτικά σύννεφα.
- **Opentaps:** Το Opentaps χρησιμοποιείται από την Toyota kai Honeywell και είναι το ποιο προηγμένο CRM πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα. Εκτός από τη δωρεάν έκδοση, η εταιρία προσφέρει μια επαγγελματική έκδοση και υπηρεσίες επί πληρωμή καθώς επίσης και μια έκδοση που τρέχει σε Amazon. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι Windows και Linux
- **OrangeHRM:** Το OrangeHRM είναι το πιο δημοφιλές HR λογισμικό παγκοσμίως και έχει τους πελάτες όπως Lufthansa, Sandals, Red Hat και Stanley Black & Decker. Είναι διαθέσιμο σε εκδόσεις ανοιχτού κώδικα, επαγγελματική και εταιρική καθώς και σε έκδοση cloud. Τα λειτουργικά συστήματα που υποστηρίζει είναι τα Windows και Linux
- **ownCloud:** Το παλαιό πρόγραμμα cloud desktop ownCloud βρίσκεται μέχρι στιγμής στην έκδοση 10.0 και ως βασικά χαρακτηριστικά του είναι η κοινή χρήση, αγαπημένα, υποστήριξη metadata, αναζήτηση και άλλα
- **Synnefo:** Το Synnefo είναι χρηματοδοτούμενο από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή ένωση και είναι μια cloud σουίτα ανοιχτού κώδικα με βάση το Google Ganeti, Archipelago και Open Stack APIs. Η έκδοση 1.0 είναι ακόμα υπό ανάπτυξη
- **Xen:** Το Xen είναι ένα hypervisor ανοιχτού κώδικα σχεδιασμένο για cloud και έχει τα θεμέλεια για μερικά από τα μεγαλύτερα cloud στον κόσμο συμπεριλαμβανομένου του Amazon Elastic Compute Cloud (EC2)

2.6 Ασφάλεια στο Υπολογιστικό Νέφος

2.6.1 Ασφάλεια πληροφοριών στο Υπολογιστικό Νέφους

Σήμερα οι περισσότερες επιχειρήσεις κάνουν χρήση του Cloud Computing μέσω της μεθόδου της χρονικής μίσθωσης για να μειώσουν τα κόστη τους. Οι επιχειρήσεις κάνουν χρήση του νέφους για να αποκτήσουν χώρο για αποθήκευση πληροφοριών. Κάνοντας χρήση αυτής της μεθόδου, είναι πολύ φθηνότερη από αυτή εντός της επιχείρησης αλλά τίθεται όμως το ερώτημα κατά πόσο είναι ασφαλής.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το θέμα της ασφάλειας στο Cloud Computing είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητή η δομή του συστήματος γιατί κατανοώντας την δομή του, είναι το κλειδί για την κατανόηση της ασφάλειας του Νέφους και του τρόπου επίτευξής του. Τα περισσότερα ζητήματα ασφάλειας που προκύπτουν στην Υπολογιστική Νέφους είναι αποτέλεσμα έλλειψης ελέγχου πάνω στη δομή από τη πλευρά του χρήστη ή της επιχείρησης. Οι περισσότερες επιχειρήσεις δεν γνωρίζουν που αποθηκεύονται τα δεδομένα τους και τι είδους μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα για να τα προστατέψουν, όπως για παράδειγμα αν τα δεδομένα τους είναι κρυπτογραφημένα ή όχι, ποια μέθοδος κρυπτογράφησης έχει εφαρμοστεί, αν είναι ασφαλής ο δίαυλος μεταφοράς αυτών και πως διαχειρίζονται τα κλειδιά κρυπτογράφησης.

Στο [82] παρουσιάζονται τα τεχνικά ζητήματα ασφαλείας στην Υπολογιστική Νέφους. Τα τεχνικά ζητήματα όμως αυτά καθ' αυτά σχετίζονται περισσότερο με τα προβλήματα των υπηρεσιών δικτύου και των προγραμμάτων περιήγησης στο δίκτυο παρά με το ίδιο το νέφος. Η υπολογιστική νέφους κάνει όμως εκτεταμένη χρήση των υπηρεσιών του δικτύου και οι χρήστες του κάνουν χρήση των προγραμμάτων περιήγησης για να έχουν πρόσβαση σε αυτές κάτι το οποίο κάνει αυτά τα τεχνικά ζητήματα να είναι πολύ σημαντικά για το Cloud Computing.

Στο Cloud Computing η ασφάλεια των προγραμμάτων περιήγησης είναι επίσης ένα σημαντικό ζήτημα δεδομένου ότι σε ένα υπολογιστικό νέφος οι υπολογισμοί γίνονται σε απομακρυσμένους servers και ο υπολογιστής client χρησιμοποιείται μόνο για να κάνει τις μεταβιβάσεις των πληροφοριών και να πιστοποιεί τις εντολές στο νέφος. Επομένως τα τυπικά προγράμματα περιήγησης είχαν την ανάγκη να στείλουν I/O και αυτοί χρησιμοποιήθηκαν με διάφορα ονόματα όπως: εφαρμογές δικτύου, «web 2.0» ή SaaS. Παρόλα αυτά η χρήση ων προγραμμάτων περιήγησης δημιούργησαν την αμφιβολία της ασφάλειας. Το Transport Layer Security (TLS) είναι σημαντικό σε αυτό το ζήτημα μιας και χρησιμοποιείται ευρέως για πιστοποίηση και κρυπτογράφηση δεδομένων. Η υπογραφή ή κωδικοποίηση XML δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας από το πρόγραμμα περιήγησης γιατί η κωδικοποίηση μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω του TLS και οι υπογραφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μέσω της TLS «χειραψίας». Έτσι λειτουργούν μόνο ως παθητικές αποθήκες δεδομένων τα προγράμματα περιήγησης.

Οι έλεγχοι ασφάλειας στο Cloud Computing δεν είναι διαφορετικοί από αυτούς σε ένα περιβάλλον πληροφοριακού συστήματος. Παρόλα αυτά επειδή το Cloud Computing χρησιμοποιεί διαφορετικά μοντέλα υπηρεσίας, λειτουργικά μοντέλα και τεχνολογίες, παρουσιάζει διαφορετικά ρίσκα για ένα οργανισμό. Η ασφάλεια της επιχείρησης εφαρμόζεται σε ένα ή περισσότερα επίπεδα ανάλογα με τις εγκαταστάσεις (φυσική ασφάλεια), τη δομή του δικτύου της (ασφάλεια δικτύου), με το πληροφοριακό σύστημα της και τις υπόλοιπες εφαρμογές που χρησιμοποιεί.

Πέρα από την αρχιτεκτονική, υπάρχουν κάποιοι ακόμα παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν όταν γίνεται αναφορά στην ασφάλεια ενός νέφους [83]. Αυτοί οι

παράγοντες χωρίζονται σε δυο τομείς: Τομέας Διακυβέρνησης και Επιχειρησιακός Τομέας.

Παρακάτω γίνεται ποιο αναλυτική περιγραφή αυτών των τομέων και τι περιλαμβάνει ο κάθε ένας:

- Τομέας Διακυβέρνησης (Governance): Ο τομέας διακυβέρνησης είναι ευρύς, αντιμετωπίζει στρατηγικά ζητήματα εντός του περιβάλλοντος Νέφους και περιλαμβάνει τα εξής:
    - Διακυβέρνηση και διαχείριση επιχειρηματικού ρίσκου: Ασχολείται με την ικανότητα του οργανισμού να διοικείται και να μετράει το επιχειρηματικό ρίσκο που δημιουργείται από το Cloud Computing. Αντιμετωπίζει ζητήματα όπως νομικές προτεραιότητας για παραβιάσεις της συμφωνίας, την ικανότητα των χρηστών να εκτιμούν επαρκώς το ρίσκο του παρόχου υπηρεσιών Νέφους, την ευθύνη να προστατεύει ευαίσθητα δεδομένα και το πως τα διεθνή σύνορα μπορούν να επηρεάσουν όλα τα προηγούμενα.
    - Νομική και ηλεκτρονική κάλυψη: Αφορά τα νομικά ζητήματα που προκύπτουν όταν μια επιχείρηση μεταβαίνει σε υπηρεσίες Νέφους, όπως απαιτήσεις προστασίας πληροφοριών και υπολογιστικών συστημάτων, παραβιάσεις ασφαλείας, κανονιστικές απαιτήσεις, απαιτήσεις απορρήτου, διεθνής νόμους κ.λ.π
    - Συμβατότητα και λογιστικός έλεγχος: Αφορά τη διατήρηση και παροχή συμβατότητας όταν η επιχείρηση μεταβαίνει σε Cloud Computing
    - Διαχείριση κύκλου ζωής των πληροφοριών: Ασχολείται με τη διαχείριση των δεδομένων που παραμένουν στο Νέφος, όπως είναι οι έλεγχοι αποζημίωσης που μπορούν να εφαρμοστούν όταν χάνεται ο φυσικός έλεγχος, το ποιος είναι υπεύθυνος για το απόρρητο των πληροφοριών, η ακεραιότητα και η διαθεσιμότητα
    - Φορητότητα και διαλειτουργικότητα: Αφορά τη μεταφορά δεδομένων από ένα πάροχο σε ένα άλλο και την επιστροφή αυτών στην επιχείρηση. Τα περισσότερα Νέφη βασίζονται σε ανοιχτές δομές, που επιτρέπουν τη μεταφορά από ένα πάροχο σε ένα άλλο. Για παράδειγμα η Google έχει εγκαταστήσει ομάδα μηχανικών υπεύθυνων για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ παρόχων
- Επιχειρησιακός Τομέας (Enterprise Risk): Ο επιχειρησιακός τομέας ασχολείται με πιο βραχυπρόθεσμα ζητήματα ασφαλείας, ζητήματα εφαρμογής των ποικιλιών αρχιτεκτονικής και περιλαμβάνει τα εξής:
    - Παραδοσιακή ασφάλεια, επιχειρησιακή συνοχή και ανάκτηση πληροφοριών: Λαμβάνει υπόψη του τον τρόπο που οι χρησιμοποιούμενες λειτουργικές διαδικασίες στην εφαρμογή ασφάλειας επηρεάζονται από το την υπολογιστική νέφους. Αυτό το κομμάτι επίσης εστιάζει στα ρίσκα που λαμβάνονται από τις υπηρεσίες Νέφους συναρτήσει με τις προσδοκίες της επιχείρησης για καλύτερη διαχείριση του ρίσκου
    - Λειτουργίες κέντρου πληροφορικών: Ασχολείται με την αξιολόγηση του κέντρου πληροφοριών του παρόχου και την αρχιτεκτονική του σαν παράγοντες για την μακρόχρονη σταθερότητά του.
    - Αντιμετώπισης περιστατικών, ειδοποιήσεις και αποκατάσταση: Ασχολείται με τα modules που πρέπει να είναι εγκατεστημένα και στον πάροχο αλλά και στον χρήστη για να εξασφαλιστεί μια σωστή αντιμετώπιση ενός απροσδόκητου περιστατικού

- Ασφάλεια εφαρμογών: Ασχολείται με την ασφάλιση του λογισμικού εφαρμογών που τρέχουν ή αναπτύσσονται εντός του Νέφους. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή αν μια επιχείρηση θα μεταβεί σε υπηρεσίες Νέφους και αν ναι, πιο μοντέλο να υιοθετήσει (IaaS, PaaS ή SaaS)
- Κωδικοποίηση και διαχείριση κλειδιών: Αναγνωρίζει τη σωστή χρήση κωδικοποίησης και την επεκτασιμότητα της διαχείρισης κλειδιών. Επίσης ασχολείται με το αν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν η κωδικοποίηση και η διαχείριση κλειδιών προκειμένου να διασφαλιστεί η πρόσβαση στους πόρους αλλά και να προστατευθούν τα δεδομένα
- Διαχείριση ταυτότητας και πρόσβασης: Αφορά τη διαχείριση των ταυτοτήτων και τη μόχλευση των υπηρεσιών καταλόγου για να παράσχει έλεγχο πρόσβασης. Λαμβάνει επιπλέον υπόψη την εκτίμηση της ετοιμότητας της επιχείρησης να διεξάγει μια διαχείριση ταυτότητας και πρόσβασης βασισμένης στις αρχές του Νέφους
- Δημιουργία εικονικών πόρων: Το κομμάτι αυτό ασχολείται με την χρήση της εικονικοποίησης (virtualization) στην υπολογιστική νέφους. Διερευνά τα ρίσκα που σχετίζονται με την πολλαπλή μίσθωση, με την απομόνωση των εικονικών μηχανημάτων, με τη συστέγαση των τελευταίων, με τα τρωτά σημεία του κεντρικού ελέγχου των εικονικών μηχανημάτων. Επίσης λαμβάνει υπόψη του ζητήματα που σχετίζονται με τη δημιουργία εικονικού λογισμικού ή υλικού

2.6.2 Τεχνικά Οφέλη Ασφάλειας του Υπολογιστικού Νέφους για τις Επιχειρήσεις

Το [85] παρουσιάζει τα παρακάτω τεχνικά οφέλη σχετικά με την ασφάλεια των επιχειρήσεων. Κάποια από αυτά έχουν άμεσες επιπτώσεις, ενώ άλλα ευνοούν εν καιρώ. Οι πάροχοι υπηρεσιών Νέφους ωφελούν ιδιαιτέρως τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις και καλύπτουν τις αδυναμίες τους λόγω περιορισμών ή ανύπαρκτων πόρων και προϋπολογισμών. Τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά ενισχύουν τα ήδη αναφερθέντα και είναι τα εξής:

1) Κεντρική διαχείριση δεδομένων (Centralized data management): Με την κεντρική διαχείριση δεδομένων στο Cloud Computing, τα οφέλη που παρέχονται είναι η μειωμένη διαρροή πληροφοριών και ο καλύτερος έλεγχος. Αυτά τα οφέλη περιγράφονται στη συνέχεια παρακάτω:
    - Η μειωμένη διαρροή δεδομένων είναι το πιο πολυσυζητημένο και δημοφιλές όφελος του Cloud Computing στις επιχειρήσεις. Οι περισσότερες επιχειρήσεις αποθηκεύουν τα δεδομένα τους σε δίσκους ή σε φορητούς υπολογιστές, αλλά αυτό δεν εξασφαλίζει την ασφάλεια δεδομένων. Είναι πιο ασφαλές να μεταφέρεις δεδομένα σε προσωρινές συσκευές αποθήκευσης ή σε φορητές συσκευές από ότι να τα μεταφέρεις από φορητό σε φορητό υπολογιστή. Επίσης δεν γίνεται όλες οι μικρές επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν τεχνικές κρυπτογράφησης. Επομένως η ασφάλεια των δεδομένων μπορεί να εξασφαλιστεί από την τεχνολογία του Cloud Computing
    - Αναφορικά με τον έλεγχο, είναι ευκολότερο να ελέγχεις και να παρακολουθείς τα δεδομένα όταν αυτά βρίσκονται συγκεντρωμένα. Παρ' όλα αυτά, η άλλη όψη του νομίσματος είναι ότι η κεντρική διαχείριση αυτών είναι εξίσου ριψοκίνδυνη αν συμβεί μια κλοπή και χαθούν όλα.

Όμως ο Craig B. Εκτιμά ότι η κεντρική διαχείριση είναι καλύτερη, δεδομένου ότι είναι προτιμότερο να ξοδέψεις χρόνο να σχεδιάσεις την ασφάλεια για ένα κεντρικό μέρος αποθήκευσης, παρά για να βρεις τρόπο να εξασφαλίσεις την ασφάλεια σε όλα τα μέρη που οι εταιρίες διατηρούν τα αρχεία τους [85].

2) Αντιμετώπιση περιστατικών παραβίασης ασφάλειας (Tackle security breaches): Είναι πολύ πιθανό κάνοντας χρήση του IaaS να αποδοθεί σε ένα ξεχωριστό διακομιστή του Νέφους η ευθύνη της αντιμετώπισης περιστατικών «διάρρηξης» και να βρίσκεται σε κατάσταση offline, έτοιμος για χρήση ανά πάσα στιγμή. Ο χρήστης πληρώνει μόνο για τις υπηρεσίες αποθήκευσης και αν συμβεί κάποιο περιστατικό παραβίασης, τότε τον θέτει σε λειτουργία online από το διαδικτυακό περιβάλλον του παρόχου, χωρίς να μεσολαβήσει κάποιος τρίτος για να το θέσει σε λειτουργία. Μειώνεται δραστικά ο χρόνος απόκτησης στοιχείων για παραβίαση ασφαλείας, όταν η επιχείρηση αποφασίζει να υιοθετήσει το Cloud Computing. Για παράδειγμα αν ένας διακομιστής στο Νέφος διακυβεύεται, τότε δημιουργείται ένα αντίγραφο αυτού και γίνεται διαθέσιμος στο διακομιστή που είναι υπεύθυνος για τον εντοπισμό της παραβίασης, ώστε ο μεν πρώτος να συνεχίσει να είναι διαθέσιμος στο χρήστη, το δε αντίγραφο του να ελέγχεται παράλληλα για τη διαρροή του. Το Cloud Computing ωφελεί από την άποψη ότι εξαλείφει ή έστω μειώνει πολύ τους νεκρούς χρόνους. Εφόσον το εικονικό αντίγραφο του hardware που παρέχουν οι υπηρεσίες του Νέφους λειτουργεί σαν μέσο για να μη βγει όλο το σύστημα της επιχείρησης offline για έλεγχο, το εικονικό αντίγραφο του hardware απομακρύνει το εμπόδιο για να γίνει έλεγχος για διαρροές σε κάποιες περιπτώσεις. Ο χρόνος εντοπισμού διαρροής μειώνεται από το Cloud Computing για τις επιχειρήσεις. Το συνολικό του hardware που χρησιμοποιεί ο χρήστης είναι σε ηλεκτρονική μορφή με αποτέλεσμα να γίνεται σαφώς πιο γρήγορα ο έλεγχος και ο εντοπισμός του προβλήματος, από τη αναζήτηση σε υλικό hardware. Τέλος, το Cloud Computing εξαλείφει το χρόνο προσπέλασης προστατευμένων αρχείων κάνοντας εφαρμογή κρυπτογραφημένων κλειδιών ή εντολών εντοπισμού πληροφορίας. Για παράδειγμα το S3 της Amazon.com παράγει MD5 hash αυτόματα όταν κάποιος αποθηκεύει ένα αρχείο ή ένα αντικείμενο, οπότε δεν χρειάζεται να παραχθούν επιπλέον κλειδιά κρυπτογράφησης για το συγκεκριμένο, ενώ η μεγάλη ισχύς επεξεργασίας του Νέφους μειώνει το χρόνο προσπέλασης αυτών. Ενώ αν πρόκειται για ένα ξένο αρχείο που πρέπει να ερευνηθεί αν είναι κακόβουλο λογισμικό, οι υπηρεσίες Νέφους δίνουν τη δυνατότητα να δοκιμαστούν πολλοί διαφορετικοί κωδικοί για να ανοίξει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

3) Έλεγχος αξιοπιστίας κωδικού (Password Verification): Για να ελέγξουν οι επιχειρήσεις την αξιοπιστία ενός κωδικού κάνουν χρήση προγραμμάτων που λειτουργούν για αυτό το σκοπό το οποίο είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Παρόλα αυτά, ο χρόνος ελέγχου της αξιοπιστίας του κωδικού πρόσβασης μειώνεται με την χρήση του Cloud Computing καθώς οι πάροχοι των υπηρεσιών Νέφους το κάνουν αυτοβούλως. Ένα επιπλέον όφελος χρήσης του Νέφους είναι ότι οι διαδικασίες cracking απασχολούν ειδικευμένες μηχανές ή λογισμικά. Συνήθως οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν λογισμικά cracking διανεμημένα σε πολλές μηχανές όταν αυτές δεν λειτουργούν για να μειώσουν το φορτίο εργασίας, ενώ με τις υπηρεσίες Νέφους αυτό μεταβιβάζεται σε ξεχωριστές μηχανές

4) Καταγραφή αρχείων (Log file): Με την απεριόριστη αποθήκευση αρχείων, το Cloud Computing παρέχει ένα ακόμη όφελος στις επιχειρήσεις. Με την συμβολή αυτής της λειτουργίας του Νέφους, οι επιχειρήσεις μπορούν να αξιοποιήσουν τις υπολογιστικές υπηρεσίες για να αναζητήσουν οποιαδήποτε από αυτά τα αρχεία

σε πραγματικό χρόνο και να πάρουν καλύτερα και γρήγορα αποτελέσματα. Η ενισχυμένη υπηρεσία καταγραφής αρχείων είναι μια ακόμη ωφέλιμη λειτουργία του Cloud Computing. Τα περισσότερα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα προσφέρουν εκτεταμένα συστήματα καταγραφής στη μορφή της ελεγκτικής ιχνηλάτησης C2 (Command and Control) αλλά αυτά σπάνια χρησιμοποιούνται από τις επιχειρήσεις λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος επεξεργασίας και του μεγέθους των αρχείων αυτών. Παρόλα αυτά με τη χρήση του Νέφους, μπορεί κάποιος να τα χρησιμοποιήσει εύκολα αν επιθυμεί να πληρώσει για αυτή την υπηρεσία, χωρίς να υποβαθμίσει οποιαδήποτε λειτουργία του συστήματός του, είτε τη δυνατότητα αποθήκευσης, είτε την επεξεργαστική ισχύ

5) Βελτίωση της κατάστασης των λογισμικών ασφαλείας (Improve the status of security software): Το Cloud Computing οδηγεί τους παρόχους να κατασκευάζουν πιο αποδοτικά λογισμικά ασφαλείας. Στο Νέφος όλες οι χρεώσιμες διαδικασίες καταγράφονται, οπότε η προσοχή των παρόχων θα στραφεί στις λιγότερο αποδοτικές διαδικασίες. Οπότε και θα επιχειρήσουν να τις βελτιώσουν, και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ποιο αποτελεσματικά λογισμικά ασφαλείας
6) Δομές Ασφαλείας (Security Structures): Κάνοντας χρήση του Νέφους είναι ποιο εύκολο στις επιχειρήσεις να δοκιμάσουν τις αλλαγές στις δομές ασφαλείας. Το μόνο που έχουν να κάνουν είναι ένα αντίγραφο του παραγωγικού περιβάλλοντος τους, να εφαρμόσουν τις αλλαγές στην ασφάλεια και να δοκιμάσουν τις επιδράσεις με χαμηλό κόστος και σε ελάχιστο χρόνο. Αυτό απομακρύνει το κύριο πρόσκομμα δοκιμής διαφορετικών συστημάτων ασφαλείας σε παραγωγικά περιβάλλοντα
7) Δοκιμές ασφαλείας (Safety tests): Οι δοκιμές ασφαλείας στο Cloud Computing έχουν πολύ χαμηλό κόστος. Κάνοντας χρήση του SaaS, οι πάροχοι ζητούν μόνο ένα μέρος του συνολικού κόστους ελέγχου της ασφάλειας καθώς οι επιχειρήσεις μοιράζονται τις ίδιες εφαρμογές σαν υπηρεσίες. Επομένως οι επιχειρήσεις πληρώνουν λίγα και εξοικονομούν χρηματικούς πόρους [85].

2.6.3 Ρίσκα και Κίνδυνοι Ασφαλείας στο Νέφος

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Δικτύου και Ασφάλειας (ENISA – European Network and Information Security Agency) ασχολήθηκε με το ζήτημα ασφάλειας και παρείχε τα πιο σημαντικά ρίσκα στην ασφάλεια κατά την υιοθέτηση του Cloud Computing τα οποία μπορούν να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες [86]:

- Συμβόλαιο ασφαλείας και ρίσκα οργανισμού όπως η απώλεια διακυβέρνησης, το «lock-in» του παρόχου και οι δυσκολίες συμβατότητας
- Νομικά ρίσκα όπως η προστασία δεδομένων και οι κίνδυνοι αδειών λογισμικού
- Τεχνικά ρίσκα όπως η αποτυχία απομόνωσης (Isolation failure), κατάχρηση ρόλων υψηλού προνομίου, παρακολούθηση δεδομένων κατά τη μεταφορά τους, απώλεια κλειδιών κρυπτογράφησης, ανασφαλή ή ελλιπής διαγραφή δεδομένων
- Ρίσκα που δεν αφορούν αποκλειστικά τις υπηρεσίες Νέφους όπως προβλήματα δικτύου, μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στα κέντρα πληροφοριών και φυσικές καταστροφές

2.6.3.1 Συμβόλαιο Ασφαλείας και Ρίσκα Οργανισμού

- Απώλεια διακυβέρνησης (Loss of governance): Ένας πελάτης ή μια εταιρία κάνοντας χρήση των Cloud υποδομών, παραχωρεί τον έλεγχο μιας σειράς ζητημάτων στον πάροχο του Cloud που μπορεί να επηρεάσουν την ασφάλεια. Οι πάροχοι υπηρεσιών Διαδικτύου περιλαμβάνουν συνήθως συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών στο πλαίσιο των όρων των συμβολαίων τους με τους πελάτες για να καθορίσουν το επίπεδο των υπηρεσιών που πωλούνται (SLAs). Την ίδια στιγμή, δεν μπορούν να προσφέρουν μια δέσμευση για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών εκ μέρους του παρόχου cloud, αφήνοντας έτσι ένα κενό στην άμυνα της ασφάλειας. Επιπλέον, ο πάροχος του cloud μπορεί να αναθέσει ή να συναναλάβει τις υπηρεσίες με τρίτους (με άγνωστους παρόχους), που δεν μπορούν να προσφέρουν τις ίδιες εγγυήσεις όπως αυτά που εκδόθηκαν από τον αρχικό πάροχο του cloud. Οπότε ο έλεγχος του παρόχου cloud αλλάζει, έτσι οι όροι και οι προϋποθέσεις των υπηρεσιών τους μπορούν επίσης να αλλάξουν. Η απώλεια της διακυβέρνησης και του ελέγχου θα μπορούσε να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην στρατηγική του οργανισμού και συνεπώς στην ικανότητα να ανταποκριθεί στην αποστολή και τους στόχους της. Η απώλεια του ελέγχου και της διαχείρισης μπορεί να οδηγήσει στην αδυναμία συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις ασφαλείας, την έλλειψη εμπιστευτικότητας, της ακεραιότητας και της διαθεσιμότητας των δεδομένων και την επιδείνωση των επιδόσεων και της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών
- Lock-in: Όταν ένας πελάτης δεν μπορεί να μεταβεί από τον ένα φορέα στον άλλον ή την μετεγκατάσταση των δεδομένων και των υπηρεσιών πίσω σε ένα in-house IT περιβάλλον γιατί δεν υπάρχει η προσφορά εργαλείων, διαδικασιών ή μορφές δεδομένων ή υπηρεσίες διασύνδεσης που θα μπορούσαν να εγγυηθούν την φορητότητα των δεδομένων, των εφαρμογών και των υπηρεσιών. Αυτό δηλώνει μια εξάρτηση από ένα συγκεκριμένο πάροχο cloud για παροχή υπηρεσιών, ειδικά αν η φορητότητα των δεδομένων είναι διαθέσιμη. Η έκταση και η φύση του lock-in ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του cloud:
    - SaaS Lock-in: Σε μια προσαρμοσμένη βάση δεδομένων που σχεδιάστηκε από τον πάροδο SaaS αποθηκεύονται τα δεδομένα των πελατών. Οι περισσότεροι πάροχοι SaaS προσφέρουν API για να διαβάζουν και να εξάγουν τα αρχεία των δεδομένων τους. Ωστόσο, αν ο πάροχος δεν προσφέρει μια έτοιμη ρουτίνα εξαγωγής των δεδομένων, ο πελάτης θα πρέπει να αναπτύξει πρόγραμμα για την εξαγωγή των δεδομένων του και να το γράψει σε ένα αρχείο έτοιμο για εισαγωγή σε ένα άλλο πάροχο. Όμως υπάρχουν λίγες επίσημες συμφωνίες σχετικά με την δομή των αρχείων των επιχειρήσεων. Για παράδειγμα μια εγγραφή πελάτη σε ένα SaaS πάροχο μπορεί να έχει διαφορετικά πεδία από ένα άλλο πάροχο. Παρόλα αυτά υπάρχουν κοινές βασικές μορφές αρχείων για την εξαγωγή και εισαγωγή δεδομένων π.χ XML. Ο νέος πάροχος μπορεί συνήθως να βοηθήσει για να πραγματοποιηθεί κάποια τέτοια μετατροπή με ένα διαπραγματεύσιμο κόστος. Ωστόσο, αν τα δεδομένα πρόκειται να επανέλθουν στο εσωτερικό, ο πελάτης θα πρέπει να γράψει ρουτίνες εισαγωγής όπου περιλαμβάνουν τυχόν απαιτούμενα δεδομένα χαρτογράφησης, εκτός αν ο πάροχος cloud προσφέρει μια τέτοια ρουτίνα. Καθώς οι πελάτες αξιολογήσουν το θέμα αυτό πριν τη λήψη σημαντικών αποφάσεων για την μετακίνηση τους στο cloud, για τις επιχειρήσεις ένα μακροπρόθεσμο ενδιαφέρον όσον αφορά για τους παρόχους cloud είναι να μπορούν να κάνουν τη φορητότητα των δεδομένων εύκολη, πλήρης και όσο το δυνατόν αποδοτική. Η εφαρμογή lock-in είναι η πιο εμφανής

μορφή lock-in, παρόλο που δεν είναι ειδικά για τις υπηρεσίες cloud. Οι SaaS πάροχοι αναπτύσσουν συνήθως μια προσαρμοσμένη εφαρμογή ειδικά για τις ανάγκες της αγοράς-στόχου τους. Οι SaaS πελάτες με μια μεγάλη βάση χρηστών μπορεί να συνεπάγεται σε μια πολύ υψηλού κόστους μετατροπή κατά την μετάβαση σε άλλο πάροχο SaaS, καθώς η εμπειρία του τελικού χρήστη επηρεάζεται. Σε περίπτωση που ο πελάτης έχει αναπτύξει προγράμματα για να αλληλοεπιδράσουν με τους παρόχους API άμεσα, για παράδειγμα για την ενοποίηση με άλλες εφαρμογές, αυτές θα πρέπει επίσης να ξαναγραφούν για να ληφθεί υπόψη το νέο API του παρόχου.

- PaaS Lock-in: Το PaaS lock-in μπορεί να συμβεί τόσο στο επίπεδο API, δηλαδή στην πλατφόρμα των API κλήσεων, όσο και στο συνθετικό επίπεδο. Για παράδειγμα ο πάροχος PaaS μπορεί να προσφέρει μια υψηλής απόδοσης αποθήκευσης δεδομένων back-end. Ο πελάτης όχι μόνο πρέπει να αναπτύξει κώδικα χρησιμοποιώντας το σύνηθες API που προσφέρεται από τον πάροχο, αλλά πρέπει επίσης να κρυπτογραφήσει ρουτίνες πρόσβασης δεδομένων με ένα τρόπο που είναι συμβατός με το back-end αποθήκευσης δεδομένων. Ο κώδικας αυτός δεν είναι απαραίτητα φορητός σε όλους τους PaaS παρόχους, ακόμη και αν ένα συμβατό API προσφέρεται, καθώς το μοντέλο πρόσβασης δεδομένων μπορεί να είναι διαφορετικό
- IaaS Lock-in: Το IaaS lock-in ποικίλει αναλόγως με την υπηρεσία υποδομής του προμηθευτή. Για παράδειγμα ένας πελάτης που χρησιμοποιεί την αποθήκευση cloud δεν θα επηρεαστεί από μη συμβατές μορφές εικονική μηχανής. Οι πάροχοι IaaS συνήθως προσφέρουν hypervisors που βασίζονται σε εικονικές μηχανές. Το λογισμικό και τα μεταδεδομένα της εικονικής μηχανής ομαδοποιούνται για τη φορητότητα συνήθως μόνο εντός του cloud του παρόχου. Η μετεγκατάσταση μεταξύ των παρόχων είναι ασήμαντη έως ότου εγκριθούν τα ανοιχτά πρότυπα, όπως το OVF. Οι IaaS πάροχοι αποθήκευσης ποικίλλουν ανάλογα με την απλουστευμένη κλειδιού/τιμής βασιζόμενη αποθήκευση δεδομένων και με την πολιτική που ενισχύουν τα αρχεία στην αποθήκευση. Ωστόσο το επίπεδο εφαρμογής εξαρτάται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της πολιτικής, για παράδειγμα του ελέγχου πρόσβασης, και έτσι μπορεί να περιορίσει την επιλογή του πελάτη για πάροχο. Το lock-in των δεδομένων είναι μια προφανής ανησυχία για τις υπηρεσίες αποθήκευσης IaaS. Καθώς οι πελάτες του cloud ωθούνε περισσότερα δεδομένα για αποθήκευση στο cloud, το lock-in των δεδομένων αυξάνεται εκτός και αν ο πάροχος του cloud προβλέπει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων [98].

- Δυσκολίες συμβατότητας (Difficulties of compatibility): Η μετανάστευση στο cloud μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την επένδυση στην επίτευξη της πιστοποίησης (π.χ. βιομηχανικές προδιαγραφές ή ρυθμιστικές απαιτήσεις) όταν ο πάροχος cloud δεν μπορεί να παρέχει αποδείξεις της δικής του συμμόρφωσης ως προς τις σχετικές απαιτήσεις. Ο πάροχος cloud δεν επιτρέπει τον έλεγχο από τον πελάτη του cloud. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό σημαίνει ότι η χρήση μιας δημόσιας υποδομής cloud να περιορίζει στην επίτευξη ορισμένων ειδών συμμόρφωσης όπως το PCI DSS (Payment Card Industry Data Security Standard) [86].

2.6.3.2 Νομικά Ρίσκα

- Προστασία των δεδομένων (Data protection): Στη προστασία των δεδομένων το cloud computing δημιουργεί πολλούς κινδύνους για τους πελάτες και για τους παρόχους του. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι δύσκολο για τον πελάτη του cloud (ως υπεύθυνος της διαχείρισης των δεδομένων) να ελέγχει αποτελεσματικά τις πρακτικές διαχείρισης των δεδομένων που εφαρμόζει ο πάροχος του cloud και επομένως να μην είναι σίγουρος ότι τα δεδομένα διαχειρίζονται με νόμιμο τρόπο. Αυτό το πρόβλημα επιδεινώνεται σε περιπτώσεις πολλαπλής διαβίβασης δεδομένων όπως για παράδειγμα μεταξύ συνδεόμενων cloud. Από την άλλη πλευρά, ορισμένοι πάροχοι cloud παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις πρακτικές επεξεργασίας των δεδομένων τους. Κάποιοι επίσης προσφέρουν περιλήψεις σχετικά με την πιστοποίηση που ακολουθούν για την επεξεργασία των δεδομένων τους και τις δραστηριότητες ασφάλειας και τους ελέγχους των δεδομένων που διαθέτουν, για παράδειγμα πιστοποίηση SAS70. Μπορεί να υπάρχουν στοιχεία παραβίασης της ασφάλειας τα οποία δεν κοινοποιούνται στον υπεύθυνο διαχείρισης από τον πάροχο του cloud. Ο πελάτης του cloud μπορεί να χάσει τον έλεγχο των δεδομένων του που υφίστανται επεξεργασία από τον πάροχο του cloud. Το πρόβλημα αυξάνεται σε περίπτωση που υπάρχει πολλαπλή μεταβίβαση δεδομένων. Ο πάροχος του cloud, ο υπεύθυνος διαχειριστής, μπορεί να λάβει δεδομένα που δεν έχουν νομίμως συλλεχθεί από τους πελάτες τους
- Κίνδυνοι αδειών (Permission hazards): Μπορεί σε περιβάλλοντα cloud οι όροι αδειοδότησης όπως ανάθεση συμφωνιών και οι απευθείας σύνδεση στους ελέγχους αδειών να είναι ανεφάρμοστες. Για παράδειγμα αν το λογισμικό χρεώνεται με βάση κάθε φορά που ένα νέο μηχάνημα αρχικοποιείται, τότε το κόστος αδειοδότησης του πελάτη cloud μπορεί να αυξηθεί εκθετικά, ακόμα και αν χρησιμοποιούν τον ίδιο αριθμό μηχανημάτων για την ίδια διάρκεια. Στην περίπτωση των PaaS και IaaS, υπάρχει η δυνατότητα για την δημιουργία πρωτότυπου έργου στο σύννεφο (νέες εφαρμογές, λογισμικό). Όπως με όλα τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, εάν δεν προστατεύεται από τις κατάλληλες συμβατικές ρήτρες, αυτό το πρωτότυπο έργο ενδέχεται να διατρέχει κίνδυνο [86].

2.6.3.3 Τεχνικά Ρίσκα

- Αποτυχία απομόνωσης (Isolation failure): Δυο από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του cloud computing είναι η πολλαπλή-μίσθωση και οι μοιραζόμενοι πόροι. Η συγκεκριμένη κατηγορία κινδύνου καλύπτει την αποτυχία των μηχανισμών να διαχωρίζουν την αποθήκευση, τη μνήμη, τη δρομολόγηση και ακόμη και την φήμη μεταξύ των διαφόρων ενοικιαστών (γνωστές και ως quest-hopping επιθέσεις). Παρόλα αυτά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι επιθέσεις στους μηχανισμούς της απομόνωσης των πόρων (έναντι π.χ. των hypervisors) εξακολουθούν να είναι λιγότερες σε αριθμό και πολύ πιο δύσκολο για έναν εισβολέα να τις θέσει σε εφαρμογή σε σχέση με τις επιθέσεις στα παραδοσιακά λειτουργικά συστήματα
- Κατάχρηση ρόλων υψηλού προνομίου (Abuse of high privilege roles): Ένας κακόβουλος χρήστης εσωτερικά θα μπορούσε οι δραστηριότητές του να έχουν αντίκτυπο στην εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την διαθεσιμότητα όλων των ειδών δεδομένων, όλων των ειδών των υπηρεσιών και ως εκ τούτου έμμεσα στη φήμη του οργανισμού και στην εμπιστοσύνη των πελατών. Αυτό μπορεί να θεωρεί ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση του cloud computing λόγω του

γεγονότος ότι οι αρχιτεκτονικές του cloud απαιτούν συγκεκριμένους ρόλους που είναι εξαιρετικά υψηλού κινδύνου. Παραδείγματα τέτοιων ρόλων περιλαμβάνουν τους cloud provider διαχειριστές του συστήματος και των ελεγκτών καθώς και τους διαχειριστές υπηρεσιών ασφαλείας που ασχολούνται με τις αναφορές ανίχνευσης εισβολής και την αντιμετώπιση τους. Καθώς αυξάνεται η χρήση του cloud, οι εργασζόμενοι των παρόχων cloud γίνονται όλο και περισσότερο στόχοι από κακόβουλες ομάδες με σκοπό να υποκλέψουν πληροφορίες για τους πελάτες των παρόχων cloud που εργάζονται

- Παρακολούθηση δεδομένων κατά την μεταφορά τους (Data tracking during transport): Επειδή το cloud computing είναι μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική και αυτό συνεπάγεται ότι περιλαμβάνει περισσότερα δεδομένα κατά τη μεταφορά από τις παραδοσιακές υποδομές. Για παράδειγμα τα δεδομένα πρέπει να μεταφερθούν έτσι ώστε να συγχρονίζονται πολλαπλά η διανομή εικόνων μηχανής, οι εικόνες στη συνέχεια διανέμονται σε πολλαπλές φυσικές μηχανές, μεταξύ των υποδομών cloud και των απομακρυσμένων Web πελατών. Επιπλέον, η περισσότερη χρήση των κέντρων δεδομένων υλοποιείται μέσω VPN ως περιβάλλον σύνδεσης, μια πρακτική που δεν ακολουθείται πάντα στο πλαίσιο του cloud. Οι επιθέσεις man-in-the-middle, spoofing, sniffing και οι επιθέσεις αναπαραγωγής θα πρέπει να θεωρούνται ως πιθανές πηγές κινδύνου. Επιπλέον σε ορισμένες περιπτώσεις οι πάροχοι cloud δεν προσφέρουν ρήτρα εμπιστευτικότητας ή μη αποκάλυψης. Ακόμα οι ρήτρες αυτές δεν είναι επαρκείς για να εγγυηθούν την προστασία των απόρρητων πληροφοριών του πελάτη και την τεχνογνωσία του πως αυτές μοιράζονται στο cloud
- Απώλεια κλειδιών κρυπτογράφησης (Loss of encryption keys): Στην απώλεια κλειδιών κρυπτογράφησης περιλαμβάνει την αποκάλυψη των μυστικών κλειδιών (SSL, κρυπτογράφηση αρχείων, ιδιωτικά κλειδιά πελατών κ.α) ή τους κωδικούς πρόσβασης, την απώλεια ή την καταστροφή αυτών των κλειδιών ή τη μη εξουσιοδοτημένη χρήση τους για έλεγχο ταυτότητας και μη άρνηση αναγνώρισης (ψηφιακή υπογραφή)
- Ανασφαλής ή ελλιπής διαγραφή δεδομένων (Unsafe or incomplete data deletion): Όπως με τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα έτσι και με το cloud όταν γίνεται μια αίτηση για διαγραφή ενός πόρου του, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια μη πραγματική διαγραφή των δεδομένων. Η επαρκή και η έγκαιρη διαγραφή των δεδομένων μπορεί να είναι αδύνατη ή μη επιθυμητή από την πλευρά του πελάτη είτε επειδή επιπλέον αντίγραφα των δεδομένων είναι αποθηκευμένα αλλά μη διαθέσιμα ή επειδή ο δίσκος που είναι να καταστραφεί έχει αποθηκευμένα δεδομένα από άλλους πελάτες. Στην περίπτωση της πολλαπλής-μίσθωσης και της επαναχρησιμοποίησης των πόρων υλικού, κάτι τέτοιο αποτελεί μεγαλύτερο κίνδυνο για τον πελάτη από ότι με ένα συγκεκριμένο υλικό [98].

2.6.3.4 Ρίσκα που δεν αφορούν το Cloud

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται ορισμένες απειλές οι οποίες δεν αφορούν ειδικά το cloud computing, αλλά θα πρέπει ωστόσο να ληφθούν σοβαρά υπόψη για την εκτίμηση του κινδύνου σε ένα cloud σύστημα.

- Διακοπές δικτύου (Network breaks): Οι διακοπές δικτύου είναι ένας από τους υψηλότερους κινδύνους καθώς μπορεί να επηρεάζονται ταυτόχρονα χιλιάδες πελάτες

- Διαχείριση δικτύου (Network management): Η όχι σωστή διαχείριση δικτύου μπορεί να επιφέρει προβλήματα όπως συμφόρηση στο δίκτυο, έλλειψη σύνδεσης και μη βέλτιστη χρήση του
- Τροποποίηση κίνησης δικτύου (Modifying network traffic): Η τροποποίηση της κίνησης στο δίκτυο ανάλογα με την χρήση της μπορεί να επιφέρει άλλες φορές συμφόρηση και άλλες φορές αποσυμφόρηση του
- Επιθέσεις Κοινωνικής μηχανικής (Social engineering attacks): Οι social engineering επιθέσεις είναι συνήθως αυτές που υπάρχει χειρισμός των ανθρώπων που εκτελούν ενέργειες ή κατέχουν εμπιστευτικές πληροφορίες. Αν και είναι παρόμοιο με ένα τέχνασμα εμπιστοσύνης ή απλά μιας απάτης, ο όρος συνήθως απάτη ή εξαπάτηση ισχύει για το σκοπό της συλλογής πληροφοριών ή της πρόσβασης στο σύστημα όπου στις περισσότερες περιπτώσεις ο εισβολέας χρησιμοποιεί τα στοιχεία του νόμιμου διαχειριστή του συστήματος
- Αναρμόδια Πρόσβαση στις Εγκαταστάσεις (Unauthorized access to premise): Η αναρμόδια πρόσβαση στις εγκαταστάσεις περιλαμβάνει την φυσική πρόσβαση στα μηχανήματα και σε άλλες περιοχές. Δεδομένου ότι οι πάροχοι cloud συγκεντρώνουν τους πόρους σε μεγάλα κέντρα δεδομένων και ότι ο φυσικός έλεγχος είναι πιθανό πιο ισχυρός, η παραβίαση αυτών των ελέγχων έχουν μεγάλο αντίκτυπο

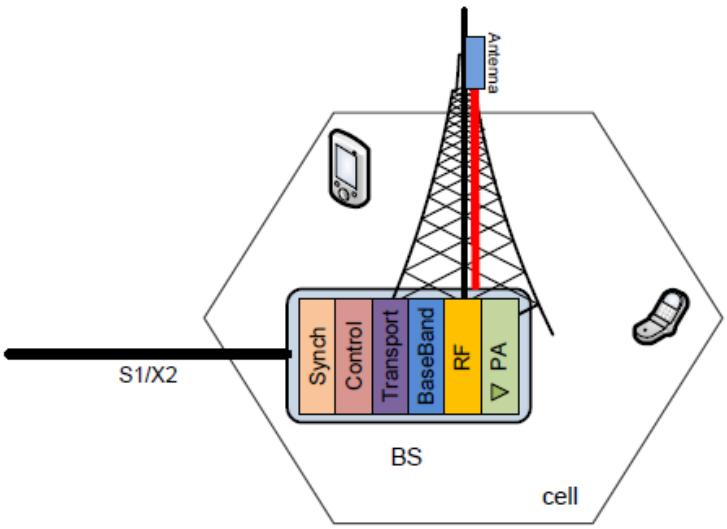
2.7 Χρήση Υπολογιστικού Νέφους στα Συστήματα 5G

Συγχωνεύοντας την Υπολογιστική Νέφους στο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network, RAN), το C-RAN έχει προβλεφθεί ως μελλοντική 5G ασύρματη αρχιτεκτονική συστημάτων. Χάρη στην πρωτοποριακή κίνηση της μετεγκατάστασης των λειτουργιών επεξεργασίας βασικής ζώνης σε μια μονάδα κεντρικοποιημένου νέφους βασικής ζώνης, το C-RAN αναμένεται να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας ώστε να είναι ένα πράσινο RAN. Επιπλέον, με την βασισμένη στο νέφος αρχιτεκτονική, πολλές νέες λειτουργικότητες και RAN σχέδια είναι έτοιμα να ενσωματωθούν τα οποία επαναπροσδιορίζουν το RAN ως ευέλικτο RAN [87].

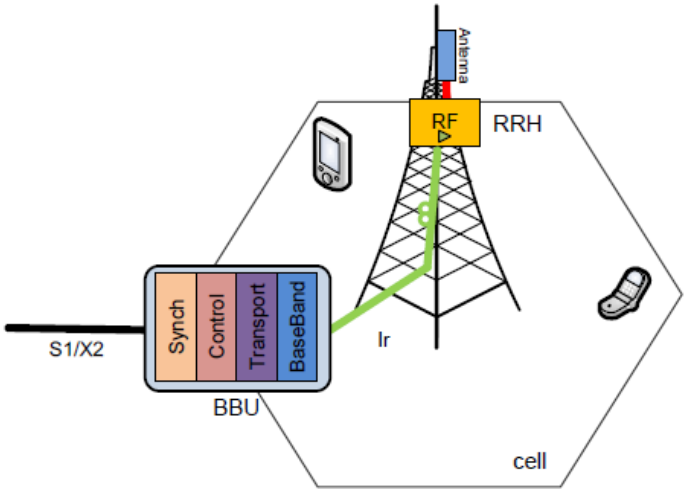
Σε αυτή την παράγραφο με χρήση της τεχνολογίας C-RAN περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Υπολογιστική Νέφους στα συστήματα πέμπτης γενιάς

2.7.1 Αρχιτεκτονική Κεντρικοποιημένου Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (C-RAN)

Στην αρχιτεκτονική Cloud Radio Access Network (ή C-RAN), οι λειτουργείες του σταθμού βάσης χωρίζονται στη Μονάδα Ραδιοσυχνοτήτων (Remote Radio Unit, RRU) και στη Μονάδα Επεξεργασίας Βασικής Ζώνης (Baseband Unit, BBU). Η μονάδα RRU βρίσκεται στην πλευρά του σταθμού βάσης και η μονάδα BBU κεντρικοποιείται σε ένα Κέντρο Δεδομένων (Data Center). Οι τρέχουσες C-RAN λύσεις χρησιμοποιούν μια οπτική ίνα μετάδοσης μεταξύ των δυο μονάδων (την fronthaul σύνδεση χρησιμοποιώντας την CPRI μετάδοση [88]) [89]. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ο παραδοσιακός σταθμός βάσης και ο σταθμός βάσης με τις διαχωρισμένε μονάδες RRH και BBU:

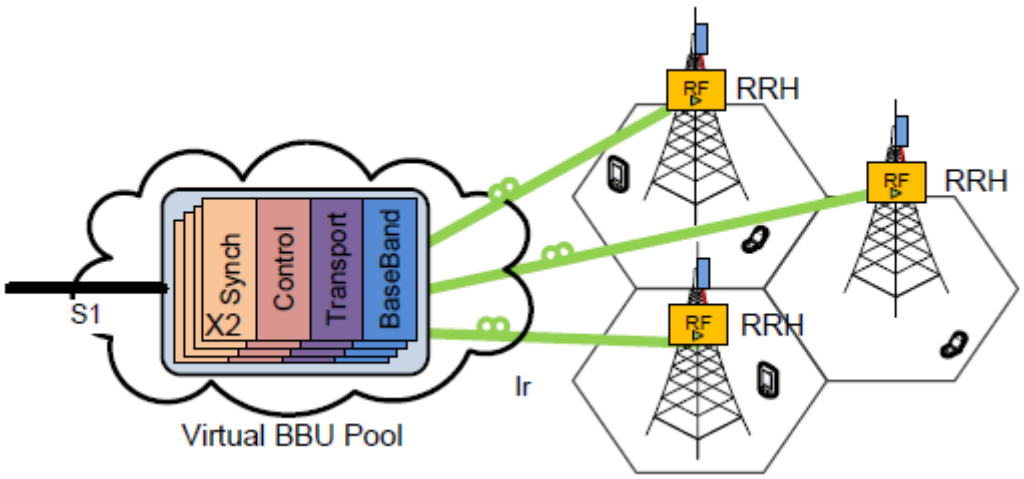


Εικόνα 36. Παραδοσιακός Σταθμός Βάσης



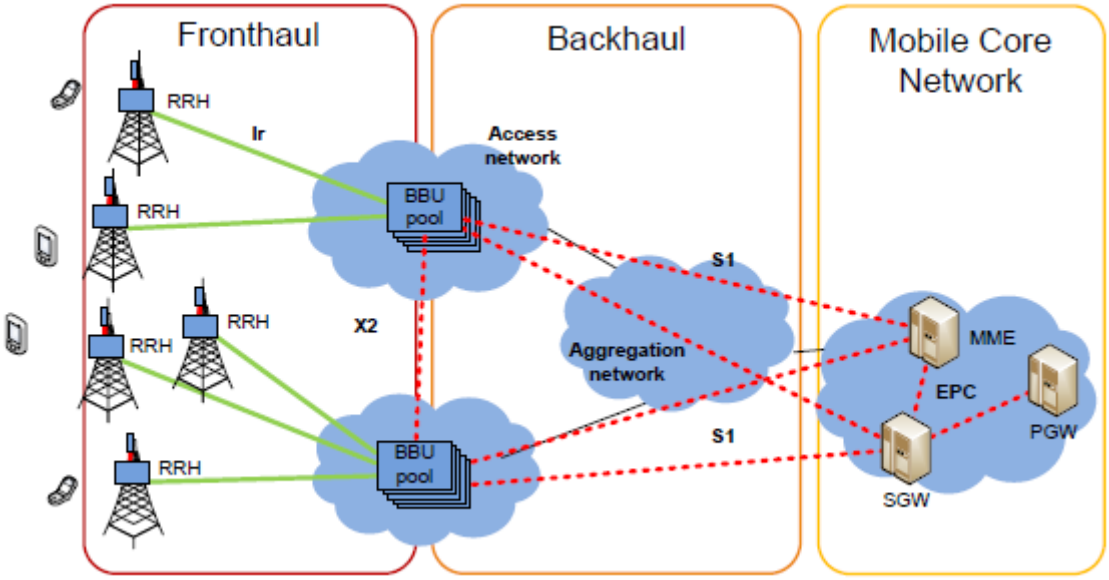
Εικόνα 37. Σταθμός βάσης με διαχωρισμένες μονάδες RRH και BBU

Το κλειδί της καινοτομίας του C-RAN είναι η αποσύνδεση των λειτουργιών επεξεργασίας του σταθμού βάσης από τις μονάδες RRH και μετεγκατάσταση αυτών των λειτουργιών σε ένα κεντρικοποιημένο νέφος που ονομάζεται BBU pool, το οποίο αποτελείται από εξυπηρετητές γενικού σκοπού. Έτσι, η λειτουργικότητα στις μονάδες RRH μπορεί να είναι τόσο λεπτή όσο το βασικό σήμα μετάδοσης [87]. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την αρχιτεκτονική C-RAN με τις μονάδες RRH:



Εικόνα 38. Αρχιτεκτονική C-RAN με RRHs

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα δίκτυο 4G LTE αρχιτεκτονικής C-RAN. Το Fronthaul μέρος εκτείνεται από την πλευρά των μονάδων RRH μέχρι την οντότητα που διαχειρίζεται τους πόρους, το BBU pool. Το Backhaul μέρος συνδέει το BBU pool με το δίκτυο κορμού. Στους σταθμούς βάσης κάθε μονάδα RRH βρίσκεται δίπλα στην αντίστοιχη κεραία και συνδέεται μέσω οπτικών ινών χαμηλής καθυστέρησης και μεγάλου εύρους ζώνης με το κεντρικοποιημένο νέφος της BBU pool.



Εικόνα 39. Δίκτυο LTE αρχιτεκτονικής C-RAN

2.7.2 Πλεονεκτήματα Αρχιτεκτονικής C-RAN

Το μεγάλο προσόν που δίνει στο C-RAN σε σύγκριση με το συμβατικό RAN αναφορικά με την μείωση ενέργειας είναι το κεντρικοποιημένο BBU pool. Πιο συγκεκριμένα, από την υπολογιστική νέφους, το RAN διαχειρίζεται τις μεταβάσεις όχι μόνο από πολλούς κατανεμημένους σταθμούς βάσης (BSs) σε ένα κεντρικοποιημένο BBU pool, αλλά επίσης από μια υποδομή ορισμένη από υλικό σε ένα περιβάλλον ορισμένο από λογισμικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, από την μια πλευρά, η τεχνολογία υπολογιστικού

νέφους σε ένα κεντρικοποιημένο BBU pool να ωθεί το RAN να είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό. Για παράδειγμα το σύστημα ψύξης είναι εγκατεστημένο σε κάθε σταθμό βάσης (BS) στο συμβατικό RAN, ωστόσο στο C-RAN, το σύστημα ψύξης είναι εγκατεστημένο σε όλο το κεντρικοποιημένο BBU pool, και η ισχύς ψύξης μπορεί να είναι προσαρμόσιμη στον αριθμό των ενεργών εξυπηρετητών, το οποίο ρυθμίζεται δυναμικά στην υπολογιστική νέφους. Από την άλλη πλευρά, το περιβάλλον που ορίζεται από λογισμικό στο BBU pool παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στο C-RAN. Για παράδειγμα, πολλές νέες λειτουργικότητες μπορούν να προστίθενται στο C-RAN με την αναβάθμιση του λογισμικού, μιας και η επεξεργασία, ο έλεγχος και η διαχείριση μέσα στο C-RAN είναι όλα ορισμένα από λογισμικό [87].

Τα κύρια πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής C-RAN είναι τα παρακάτω [89], [90]:

- Βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της εσωτερικής χρονοδρομολόγισης και τις συνεργατικές τεχνικές (γιατί η εσωτερική σηματοδότηση πραγματοποιείται στο BBU pool)
- Επιτρέπει τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας μέσω της στατιστικής πολυπλεξίας εξοικονομώντας πόρους
- Επιτρέπει τα οφέλη του NFV να εφαρμόζονται σε μερικά τμήματα της στοίβας του ράδιο πρωτοκόλλου
- Προσαρμόζεται στη μη ομοιόμορφη κίνηση και έχει δυνατότητα κλιμάκωσης
- Εξοικονομεί ενέργεια και κόστος που προέρχονται από το κέρδος της στατιστικής πολυπλεξίας μέσα στο BBU pool
- Αυξάνει την απόδοση και μειώνει τις καθυστερήσεις
- Παρέχει ευκολία στις αναβαθμίσεις δικτύου και στη συντήρηση

Η ευέλικτη κεντρικοποίηση της λειτουργικότητας RAN θα έχει επίδραση στη λειτουργία της 3GPP LTE RAN στοίβας πρωτοκόλλου και μπορεί ακόμα να περιορίζεται από εξαρτήσεις εντός αυτής. Ο παρακάτω πίνακας παρέχει μια επισκόπηση των πολλά υποσχόμενων λειτουργιών της 3GPP LTE ράδιο στοίβας πρωτοκόλλου, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μερικώς κεντρικοποιημένη. Γενικά, όσο χαμηλότερα τοποθετούμε την λειτουργία διαχωρισμού εντός της στοίβας πρωτοκόλλου, τόσο υψηλότερη είναι η επιβάρυνση και πιο αυστηρές είναι οι απαιτήσεις του backhaul. Η κεντρικοποιημένη λειτουργικότητα στο φυσικό επίπεδο (PHY) επιτρέπει υπολογιστική ποικιλομορφία η οποία εξαρτάται κατευθείαν από τον αριθμό των χρηστών ανά ράδιο σημείου πρόσβασης. Λόγω χρονικών και χωρικών διακυμάνσεων, ο υπολογιστικός φόρτος μπορεί να ισοσταθμιστεί κατά μήκος των κυψελών [91].

Πίνακας 5. Τα οφέλη και οι προκλήσεις επεξεργασίας σήματος για την κεντρικοποίηση της επιλεγμένης 3GPP LTE λειτουργικότητας ράδιο πρωτοκόλλου στο φυσικό (PHY) και στο MAC επίπεδο

CENTRALIZED FUNCTIONALITY	CENTRALIZED REQUIREMENTS	CENTRALIZATION BENEFITS	CHALLENGES FOR SIGNAL PROCESSING
DETECTION AND FEC-DECODING	■ DEPENDS ON CONTROL OVERHEAD IN UL ■ LATENCY REQ. DEPENDS ON TIMING REQ. IN DL ■ STRONG RELIABILITY	■ COOPERATIVE RECEIVER (RX) ■ COMPUTATIONAL DIVERSITY	■ PREDETECTION AT RAP TO REDUCE BH OVERHEAD ■ OPTIMAL QUANTIZATION OF SIGNALS AND EXCHANGE OVER BH
FEC-ENCODING AND MODULATION AND PRECODING	■ DEPENDS ON CONTROL OVERHEAD IN DL ■ STRONG RELIABILITY	■ COOPERATIVE TRANSMITTER (TX) ■ ADVANCED PRECODING ■ COMPUTATIONAL DIVERSITY	■ SEPARATE PRECODING DECISION AND EXECUTION AT RAP AND CENTRAL PROCESSOR ■ OPTIMAL QUANTIZATION OF SIGNALS AND EXCHANGE OVER BH
LINK RELIABILITY PROTOCOLS (E.G., HARQ)	■ DEPENDS ON ENTITY THAT PERFORMS RETRANSMISSION DECISION	■ SIMPLIFIED CENTRALIZATION OF SCHEDULING AND DECODING	■ PREDEFINED TIMING OF (N)ACK MESSAGES ■ SEPARATION OF RETRANSMISSION DECISION AND PACKET COMBINING ■ STRONG INTERACTION WITH OTHER FUNCTIONS, E.G., SCHEDULER, EN-/DECODER
SCHEDULING AND INTERCELL RRM	■ FLEXIBLE REQUIREMENTS	■ MULTICELL GAINS ■ COMPUTATIONALLY EXPENSIVE ALGORITHMS ■ GAINS DEPEND ON BH QUALITY	■ SCALABLE LATENCY REQUIREMENTS MUST BE SUPPORTED ■ INTERCELL INTERFERENCE COORDINATION (ICIC) BASED ON CHANGING QUALITY OF CHANNEL STATE INFORMATION ■ CHANGING COMPUTATIONAL COMPLEXITY

2.7.3 Προκλήσεις Αρχιτεκτονικής C-RAN

Η τρέχουσα προσέγγιση της τεχνολογίας C-RAN υιοθετεί την μεταφορά των ψηφιοποιημένων I/O δειγμάτων μεταξύ του RRU και του BBU. Η ενθυλάκωση των I/O δειγμάτων σε μια οπτική ίνα μετάδοσης ορίζεται στη προδιαγραφή CPRI. Το εύρος ζώνης που απαιτείται για το CPRI κλιμακώνεται γραμμικά με το εύρος ζώνης του συστήματος, τις κεραίες (antenna ports) και τη συχνότητα δειγματοληψίας. Με τις παραμέτρους του New Radio 5G συστήματος απαιτούνται CPRI γραμμές που πλησιάζουν τον ρυθμό των 12Tbps [92]. Ο τρέχον μέγιστος ρυθμός γραμμής για CPRI είναι 24Gbps.

Το 3GPP διερευνά νέες προσεγγίσεις για το πως η λειτουργία της επεξεργασίας σήματος μπορεί να χωριστεί μεταξύ των μονάδων RRU και BBU. Πολλές διαιρέσεις πρωτοκόλλων μεταξύ των επιπέδων RRC-PDCP-RLC-MACPHY εξετάζονται στο 3GPP. Κάθε επιλογή οδηγεί σε διαφορετικό fronthaul εύρος ζώνης και απαιτήσεις καθυστέρησης που διαφέρει σημαντικά από 10s το Mbps σε 10s το Gbps, και από 10ms σε 150μs χρόνο μετ' επιστροφής (RRT). Η ομάδα εργασίας IEEE P1914 αναπτύσσει προδιαγραφές για την μεταφορά του ωφέλιμου φορτίου των RRU/BBU από αποτελέσματα που προκύπτουν από διάφορες επιλογές διαχωρισμού πάνω στα πακέτα μεταφοράς των δικτύων. Η ομάδα προδιαγραφών CPRI αναπτύσσει επίσης μια βελτιωμένη λύση μετάδοσης που ονομάζεται eCPRI η οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει Ethernet καθώς επίσης οπτική μεταφορά.

Οι διάφορες λειτουργίες επεξεργασίας σήματος και λειτουργίες πρωτοκόλλου ενός σταθμού βάσης δεν μπορούν να εικονικοποιηθούν με μια απλή πλατφόρμα υλικού όπως γίνεται μέσα στον Πυρήνα του Δικτύου. Η απόδοση της επεξεργασίας απαιτεί εκατομμύρια πράξεις ανά δευτερόλεπτο (millions of operations per second - MOPS) για υπολογιστικές λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο στο φυσικό επίπεδο (π.χ. FFT/FEC) με ακόμα να απαιτεί ASIC ή FPGAs. Οι λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου όπως ο Έλεγχος Ραδιοζεύξεων (Radio Link Control, RLC) μπορεί να υλοποιηθεί με πόρους γενικού υπολογιστικού σκοπού. Εξαιτίας αυτού, το επίπεδο της Υποδομής της

Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (Network Function Virtualisation Infrastructure, NFVI) ενός κέντρου δεδομένων BBU είναι πιο σύνθετο από αυτό που προτείνεται για το Δίκτυο Πυρήνα.

2.7.4 Κεντρικοποιημένη Επεξεργασία στο BBU pool

Η κεντρικοποιημένη επεξεργασία (centralized processing) στο BBU pool μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την χρήση υπολογιστικού νέφους. Πιο αναλυτικά παρουσιάζονται παρακάτω οι εφαρμογές της κεντρικοποιημένης επεξεργασίας [87].

2.7.4.1 Συντονισμένες Πολυεκπομπές και Περιορισμένη Χωρητικότητα Δικτύου Κορμού

Κατά την τελευταία δεκαετία, οι συντονισμένες πολυεκπομπές (CoMP) έχουν προσελκύσει την ερευνητική προσοχή τόσο της ακαδημίας όσο και της βιομηχανίας, που σκοπεύει να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος, ειδικά για τους τελικούς χρήστες. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να αποκτηθεί η υψηλή απόδοση του CoMP, όπως η συσταδοποίηση και ο συγχρονισμός.

Η ανάδειξη του C-RAN παρέχει ένα ιδανικό περιβάλλον για να υλοποιηθεί το CoMP, μιας και οι περισσότερες προκλήσεις στο CoMP καταργούνται από την κεντρικοποιημένη επεξεργασία του C-RAN. (π.χ. ο συγχρονισμός). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος του C-RAN μπορεί να μειωθεί αξιοποιώντας το CoMP. Για παράδειγμα, το σύνολο των ενεργών μονάδων RRH μπορούν να ρυθμιστούν από έναν αλγόριθμο συσταδοποίησης στο CoMP. Έτσι, οι αδρανείς μονάδες RRH μπορούν να μεταβούν σε λειτουργία αναμονής για να εξοικονομηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Μια τυπική CoMP τεχνική είναι η κοινή μετάδοση, η οποία αντιγράφει τα δεδομένα των χρηστών σε πολλαπλούς συντονισμένους σταθμούς βάσης (BS) και μεταδίδει τα δεδομένα κάθε χρήστη ταυτοχρόνως από τους πολλαπλούς συντονισμένους σταθμούς βάσης (BS). Εφαρμόζοντας την κοινή μετάδοση στο C-RAN σημαίνει ότι τα δεδομένα κάθε χρήστη πρέπει να είναι διαμοιρασμένα μεταξύ όλων των συντονισμένων μονάδων RRH και των συνδεδεμένων τους fronthauls. Αυτό προκαλεί μια παρενέργεια στο C-RAN: η χωρητικότητα των fronthauls γίνεται απαιτητική. Επομένως είναι επιτακτικό να λαμβάνεται υπόψη η περιορισμένη χωρητικότητα των fronthauls.

Για να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο fronthaul, μια άλλη προσέγγιση προκαλεί συμπίεση στο fronthaul. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς στο [93] διερευνούν συμπίεση μέσα στις ζεύξεις ανόδου στο C-RAN fronthaul. Αξιοποιώντας την συσχέτιση μεταξύ των RRH, προτείνουν ένα κοινό αλγόριθμο αποσυμίεσης και αποδιαμόρφωσης στις ζεύξεις ανόδου του C-RAN fronthaul, δηλαδή την από κοινού διεξαγωγή αποσυμπίεσης και ανίχνευσης σε ένα βήμα, για να ελαχιστοποιήσουν τον ρυθμό μετάδοσης στο fronthaul και να εγγυηθούν μια αποδεκτή παραμόρφωση του αποσυμπιεσμένου σήματος.

2.7.4.2 Πολυεκπομπή

Το παρόν RAN είναι σχεδιασμένο να διανέμει πληροφορία σε καθορισμένους παραλήπτες βάση απλής εκπομπής. Όμως, στο 5G, η απλή εκπομπή μπορεί να μην είναι μια καλή επιλογή για μερικά σενάρια επικοινωνίας (π.χ. ζωντανή μετάδοση βίντεο), τόσο από την ενεργειακή αποδοτικότητα όσο και από την αποτελεσματικότητα του ραδιοφάσματος, ειδικά όταν η χωρητικότητα fronthaul είναι λιγοστή.

Εξαιτίας της κεντρικοποιημένης επεξεργασίας, η πολυεκπομπή έχει προταθεί ως μια πολλά υποσχόμενη αντικατάσταση της απλής εκπομπής στο C-RAN για μερικά σενάρια επικοινωνίας. Ως φυσικό αποτέλεσμα, η κατανάλωση ενέργειας στη μετάδοση στο C-RAN προβλέπεται να μειωθεί αξιοποιώντας την πολυεκπομπή, αποδίδοντας όφελος στη πολυπλεξία. Για παράδειγμα, στο [94] οι συγγραφείς ερευνούν την πολυεκπομπή μορφοποίησης δέσμης για διαφορετικές ομάδες χρηστών στο C-RAN για να ελαχιστοποιήσουν το σταθμισμένο ποσό του κόστους του backhaul και της μετάδοσης ισχύος. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα της απόδοσης αξιοποιώντας την πολυεκπομπή αντί την απλή εκπομπή

2.7.4.3 Θέματα Πληροφορίας Κατάστασης Καναλιού

Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των μονάδων RRH και των εξοπλισμών των χρηστών (UE), η πληροφορία κατάστασης καναλιού (channel state information, CSI) γίνεται τεράστια στο C-RAN. Έτσι, αυτό που καλείται «κατάρα» της επίδρασης των διαστάσεων θα είναι ένα πιθανό εμπόδιο για την βελτίωση της απόδοσης της κεντρικοποιημένης επεξεργασίας. Υπάρχουν μερικές εργασίες οι οποίες εξετάζουν τη μείωση της CSI επιβάρυνσης στο C-RAN. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς στο [95] προτείνουν μια μέθοδο απόκτησης CSI με συμπίεση, η οποία μόνο αποκτά τους στιγμιαίους συντελεστές καναλιού για ένα υποσύνολο των καναλιών και χρησιμοποιεί στατιστικές CSI για τις υπόλοιπες. Από την πλευρά της κατανάλωσης ενέργειας, μειώνοντας την επιβάρυνση CSI σημαίνει ότι η κατανάλωση ενέργειας για ανταλλαγή CSI μεταξύ των μονάδων RRH και των εξοπλισμών των χρηστών (UEs) μπορεί επίσης να περικοπεί.

Αντιμετωπίζοντας τις ελλείψεις το CSI είναι πάντα ένα μεγάλο θέμα στις ασύρματες επικοινωνίες, και γίνεται πιο σημαντικό για τις διεργασίες της κεντρικοποιημένης επεξεργασίας στο C-RAN, μιας και ακόμα και μια μικρή ατέλεια στο CSI μεταξύ του εκτιμώμενου και του πραγματικού συντελεστή του καναλιού μπορεί να οδηγήσει σε μια μη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Πρόσφατα, οι συγγραφείς στο [96] κάνουν χρήση του πλαισίου στοχαστικής βελτιστοποίησης για να ασχοληθούν με τον θόρυβο και την καθυστέρηση του CSI στο C-RAN. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση της ατέλειας του CSI μπορεί να μειωθεί με την προτεινόμενή τους προσέγγιση.

2.7.4.4 Περιβάλλον Ορισμένο από Λογισμικό

Εκτός από την κεντρικοποιημένη ιδιότητα επεξεργασίας, μια καινοτόμα μετάβαση του C-RAN είναι αυτή με την εισαγωγή του Cloud Computing με το BBU pool να μετατρέπεται από υποδομή ορισμένη από υλικό σε ένα περιβάλλον ορισμένο από λογισμικό. Σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται ορισμένες πρόσφατες εξελίξεις στο C-RAN με την χρήση του περιβάλλοντος ορισμένου από λογισμικό [87].

2.7.4.4.1 Υπηρεσία ελαστικής κλιμάκωσης

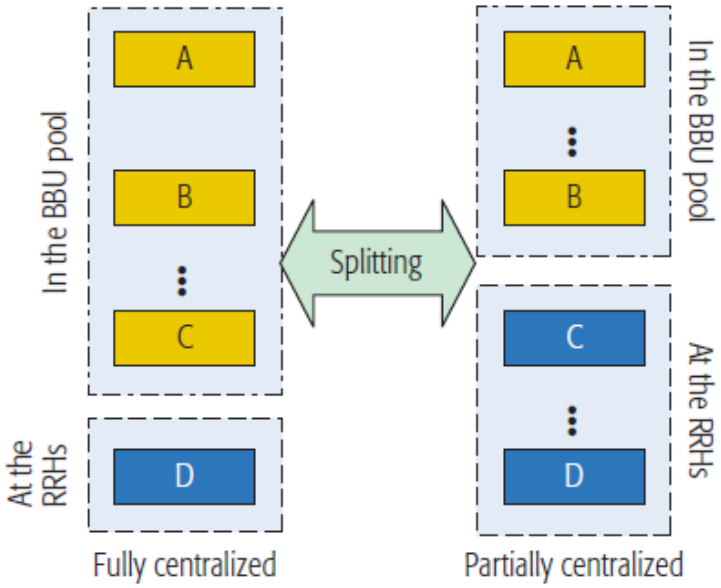
Το Cloud Computing έχει τα παρακάτω πέντε διάσημα χαρακτηριστικά τα οποία είναι αυτοεξυπηρέτηση κατά απαίτηση (on-demand self-service), ευρεία πρόσβαση στο δίκτυο (broad network access), συγκέντρωση πόρων (resource pooling), ταχεία ελαστικότητα (rapid elasticity) και μετρούμενη υπηρεσία (measured service). Αυτά τα χαρακτηριστικά το έχουν προωθήσει ως ένα δημοφιλές και επιτυχές υπολογιστικό πρότυπο κατά την τελευταία δεκαετία. Εισάγοντας το Cloud Computing στο BBU pool, το C-RAN επίσης κληρονομεί αυτά τα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα το χαρακτηριστικό της ταχείας ελαστικότητας στο C-RAN μπορεί να ερμηνευθεί με την έννοια ότι, στο BBU pool, ο διαχειριστής μπορεί δυναμικά να αυξάνει (scale up) και να μειώνει (scale down) τους απαραίτητους υπολογιστικούς πόρους για να βελτιώσει τη χρήση των πόρων. Επίσης καλείται αυτή η διαδικασία μέσα στο BBU pool ως υπηρεσία ελαστικής κλιμάκωσης (elastic service scaling).

2.7.4.4.2 Διαχωρισμός λειτουργικότητας

Η πιο κοινή αρχιτεκτονική στο C-RAN είναι αυτή ενός πλήρως κεντρικοποιημένου συστήματος όπου η επεξεργασία, ο έλεγχος και οι λειτουργίες διαχείρισης βρίσκονται στο BBU pool, και τα RRH απλά κρατάνε βασικές RF (radio frequency) λειτουργικότητες για μετάδοση και λήψη σήματος. Ωστόσο, εξαιτίας ορισμένων πρακτικών περιορισμών (π.χ. περιορισμένης χωρητικότητας δικτύου κορμού), ένα πλήρως κεντρικοποιημένο σύστημα μπορεί να μην είναι βέλτιστο σε ορισμένα σενάρια.

Με το περιβάλλον που είναι ορισμένο από λογισμικό, ο C-RAN διαχειριστής μπορεί εύκολα να υλοποιήσει σύστημα διαχωρισμού λειτουργιών αντί για ένα πλήρως κεντρικοποιημένο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής μπορεί να αποφασίσει για κάθε λειτουργική μονάδα αν θα υλοποιηθεί σε κάθε μια BBU pool ή στις RRH δυναμικά, βάση των διαφορετικών σεναρίων εφαρμογής.

Για παράδειγμα η παρακάτω εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαχωρισμός λειτουργιών (functionality splitting) στη στοίβα του C-RAN ράδιο πρωτοκόλλου [97].



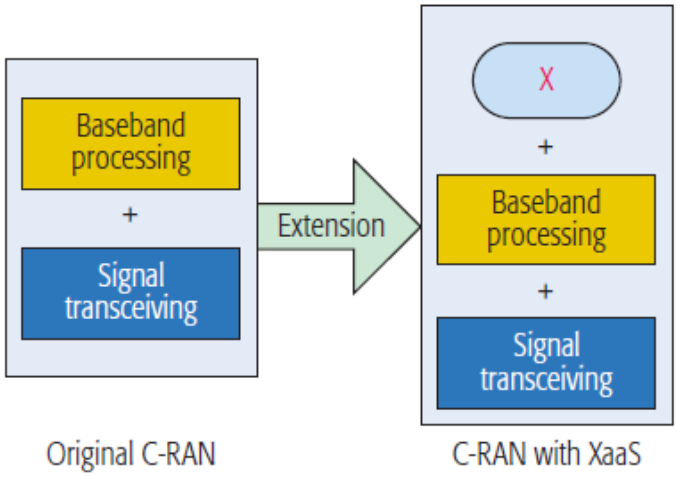
Εικόνα 40. Διαχωρισμός λειτουργικότητας στο C-RAN

Η αριστερή πλευρά απεικονίζει ένα πλήρες κεντρικοποιημένο σενάριο, στο οποίο τα modules {A, B, …, C} σημαίνουν {διαχείριση δικτύου (network management, NM), έλεγχος εισόδου/συμφόρησης (admission/congestion control, A/CC), διαχείριση ράδιο πόρων (radio resource management, RRM), έλεγχος πρόσβασης μέσου (media access control, MAC), φυσικό επίπεδο (physical layer, PHY)}, και το module D αντιστοιχεί στο RF module. Για να μειωθεί το ποσοστό κίνησης στο fronthaul, μερικά modules μπορούν να μετεγκατασταθούν στην πλευρά RRH, όπως φαίνεται στην δεξιά πλευρά, όπου {A, …, B} αναπαριστά τα {NM, A/CC} και το {C, …, D} αναπαριστά τα {RRM, MAC, PHY, RF}. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μερική κεντρικοποίηση του C-RAN.

2.7.4.4.3 Επέκταση λειτουργικότητας:

Υπάρχουν δυο κύριες λογικές λειτουργικότητες στο αυθεντικό C-RAN: επεξεργασία βασικής ζώνης και μετάδοση σήματος, όπου η λειτουργικότητα επεξεργασίας βασικής ζώνης εκτελείται στο BBU pool, και η λειτουργία μετάδοση σήματος τοποθετείται στα RRH.

Όπως το BBU pool που βασίζεται στο cloud αποτελείται από πολλούς εξυπηρετητές γενικού-σκοπού, για να αξιοποιηθεί πλήρως το περιβάλλον που ορίζεται από λογισμικό του BBU pool, είναι λογικό και αναπόφευκτο να ενσωματωθούν περισσότερες λειτουργίες στο εσωτερικό του. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, μια νέα λειτουργία, X, προστίθεται μέσα στο C-RAN. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται επέκταση του C-RAN ως XaaS [97].



Εικόνα 41. Λειτουργία επέκτασης του C-RAN

3. MOBILE EDGE COMPUTING

3.1 Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου

Με την ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας, οι κατασκευαστές αναπτύσσουν συσκευές που παράγουν και καταναλώνουν όλο και περισσότερα δεδομένα. Ο αριθμός των συσκευών είναι τεράστιος, κάθε μια από αυτές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν και μπορούν να βρίσκονται οπουδήποτε διασκορπισμένες γεωγραφικά. Για παράδειγμα συσκευές που κατά βάση τρέχουν real-time εφαρμογές έχουν πολύ μικρή ανοχή σε καθυστερήσεις.

Αυτές οι συσκευές αποτελούν μέρος μεγαλύτερων συστημάτων τα οποία χρειάζονται υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικό χώρο για να επεξεργάζονται και να αποθηκεύουν τα δεδομένα. Εκτιμάται ότι δεκάδες δισεκατομμύρια τέτοιες συσκευές άκρων (Edge) θα αναπτυχθούν στο εγγύς μέλλον και οι ταχύτητες των επεξεργαστών τους θα αναπτύσσονται εκθετικά ακολουθώντας τον Νόμο του Moore [100]. Βέβαια, μέχρι ενός σημείου η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται στη συσκευή, γιατί από εκεί και πέρα απαιτούν περισσότερους υπολογιστικούς πόρους. Ως πρώτη λύση για την ανεύρεση αυτών των πόρων είναι το Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing). Όμως το επίπεδο των απαιτήσεων πολλές φορές καθιστά το Cloud ανέφικτο όταν για παράδειγμα ο στόχος είναι να αναπτυχθεί μια πλατφόρμα για να υποστηρίζει ένα μεγάλο εύρος IoT εφαρμογών. Επομένως συγκεντρώνοντας το τεράστιο ποσό της αδρανούς υπολογιστικής ισχύος και του αποθηκευτικού χώρου που είναι κατανεμημένα στις άκρες του δικτύου, μπορούν να αποφέρουν επαρκή χωρητικότητα για εκτέλεση εργασιών (tasks) υπολογιστικά ευαίσθητων και κρίσιμων καθυστέρησης στις κινητές συσκευές. Αυτό το πρότυπο ονομάζεται **Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου** (ή Κινητή Υπολογιστική Παρυφών) (Mobile Edge Computing, MEC) [101]. Ενώ οι μεγάλες καθυστερήσεις διάδοσης παραμένουν το κύριο μειονέκτημα για την Υπολογιστική Νέφους, το MEC, με την κοντινή πρόσβαση, είναι ευρέως αποδεκτό ότι θα είναι μια βασική τεχνολογία για την υλοποίηση διαφόρων οραμάτων για την επόμενη γενιά Internet όπως το Tactile Internet (Internet υψηλής απόδοσης) (με χιλιοστά του δευτερολέπτου χρόνο αντίδρασης) [102], το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) [103] και το Internet of Me [104].

Επί του παρόντος, ερευνητές και από την ακαδημία και από την βιομηχανία έχουν προωθήσει ενεργά την τεχνολογία MEC επιδιώκοντας τη σύντηξη των τεχνικών και θεωριών και από τους δυο κλάδους της κινητής υπολογιστικής και των ασύρματων επικοινωνιών.

Η μεταφορά των πόρων στο edge δεν αναπτύχθηκε με σκοπό να ανταγωνιστεί το cloud, αλλά για να το συμπληρώσει και να το επεκτείνει. Έτσι τοποθετήθηκαν μικρότεροι servers στις άκρες του δικτύου και πλέον ένας κατασκευαστής της πλατφόρμας είναι στην δική του ευχέρεια για το που θα τοποθετήσει τα endpoints, δηλαδή στο cloud ή στο edge, εφόσον ικανοποιούνται οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί των εφαρμογών. Όλες αυτές οι τεχνολογίες θα πρέπει να συνεργαστούν και να υπάρξει ένας έξυπνος σχεδιασμός της επικοινωνίας, της ενορχήστρωσης και της ανάθεσης πόρων για να ικανοποιηθούν οι IoT απαιτήσεις [99].

3.1.1 Ορισμός Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου

Η έννοια της Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου (**Mobile Edge Computing, MEC**) προτάθηκε αρχικά από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) το 2014 και ορίστηκε ως μια νέα πλατφόρμα η οποία "*παρέχει IT και*

ικανότητες υπολογιστικού νέφους μέσα σε Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (RAN) σε κοντινή απόσταση από συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας" [108]. Ο αρχικός ορισμός του MEC αναφέρεται στη χρήση σταθμών βάσης (BSs) για την αποφόρτωση υπολογιστικών διεργασιών από τις κινητές συσκευές. Πρόσφατα, η έννοια της υπολογιστικής ομίχλης προτάθηκε από την Cisco ως μια γενική μορφή του MEC όπου ο ορισμός των συσκευών άκρων διευρύνεται, που κυμαίνεται από smartphones μέχρι set-top boxes [123]. Αυτό οδηγεί σε μια νέα ερευνητική περιοχή που ονομάζεται Υπολογιστική Ομίχλης και Δικτύωση (**Fog Computing and Networking**) [46], [47], [48]. Ωστόσο οι περιοχές του Fog Computing και του MEC αλληλεπικαλύπτονται και οι ορολογίες χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά.

Το MEC προσφέρει δυνατότητες υπολογιστικού νέφους μέσα στο RAN [105]. Αντί να επιτρέπει την άμεση κίνηση των κινητών (mobile traffic) μεταξύ του δικτύου κορμού και των τελικών χρηστών, το MEC συνδέει κατευθείαν τον χρήστη στο πλησιέστερο νέφος υπηρεσίας στην άκρη του δικτύου. Αναπτύσσοντας το MEC στο σταθμό βάσης βελτιώνει την υπολογιστικότητα και αποφεύγει συμφορήσεις και διακοπές λειτουργίας συστήματος [106], [107].

Σύμφωνα με το white paper που δημοσιεύτηκε από τον ETSI, το MEC μπορεί να χαρακτηριστεί από [108]:

1) **Εγκαταστάσεις (On-Premises)**: Οι MEC πλατφόρμες μπορούν να τρέξουν απομονωμένες από το υπόλοιπο δίκτυο, ενώ έχουν πρόσβαση σε τοπικούς πόρους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τα σενάρια μηχανής προς μηχανή (machine-to-machine, M2M). Το MEC διαθέτει διαχωρισμό από άλλα δίκτυα που επίσης το καθιστά λιγότερο ευάλωτο
2) **Εγγύτητα (Proximity)**: Έχοντας αναπτυχθεί στην πλησιέστερη τοποθεσία, το MEC έχει το πλεονέκτημα να αναλύει και να υλοποιεί μεγάλα δεδομένα. Είναι επίσης ωφέλιμο για υπολογιστικά ενεργοβόρες συσκευές, όπως επαυξημένης πραγματικότητας (augmented reality, AR), αναλύσεις βίντεο κ.λ.π
3) **Χαμηλότερη καθυστέρηση (Lower Latency)**: Οι MEC υπηρεσίες είναι ανεπτυγμένες σε κοντινή τοποθεσία στις συσκευές των χρηστών, απομονώνοντας τα δεδομένα δικτύου από το δίκτυο κορμού. Έτσι, η εμπειρία του χρήστη είναι υψηλής ποιότητας με πάρα πολύ μικρή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης
4) **Ευαισθητοποίηση τοποθεσίας (Location Awareness)**: Οι κατανεμημένες edge συσκευές αξιοποιούν χαμηλού επιπέδου σηματοδοσία για διαμοιρασμό πληροφορίας. Το MEC λαμβάνει πληροφορία από τις edge συσκευές εντός του τοπικού δικτύου πρόσβασης για να βρει την τοποθεσία των συσκευών
5) **Πληροφορίες περιβάλλοντος δικτύου (Network Context Information)**: Οι εφαρμογές που παρέχουν πληροφορία δικτύου και υπηρεσιών δεδομένων δικτύου πραγματικού χρόνου μπορούν να ωφελήσουν επιχειρήσεις και γεγονότα υλοποιώντας το MEC στο δικό τους επιχειρησιακό μοντέλο. Με βάση των πληροφοριών πραγματικού χρόνου στο RAN, αυτές οι εφαρμογές μπορούν να προβλέψουν τη συμφόρηση της ράδιο κυψέλης και το εύρος ζώνης δικτύου. Αυτό θα τις βοηθήσει στο μέλλον να παίρνουν έξυπνες αποφάσεις για καλύτερη παροχή υπηρεσιών προς τους πελάτες

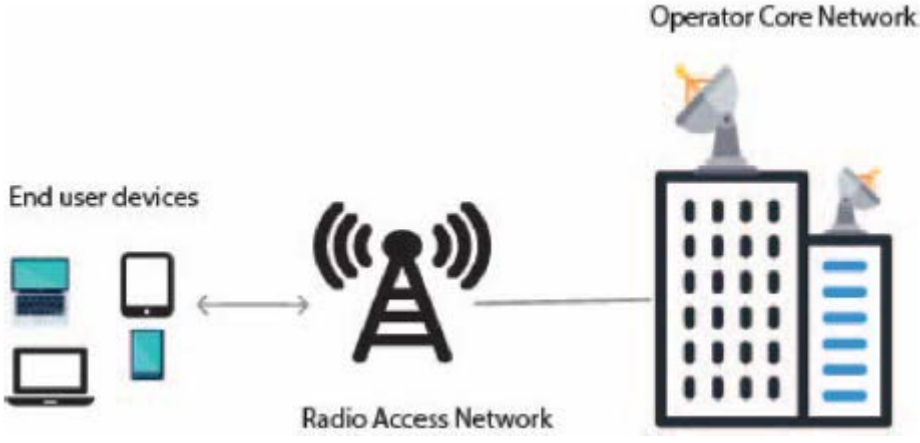
3.1.2 Αρχιτεκτονικές Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου

Επειδή οι λειτουργίες (functions) του MEC βρίσκονται κυρίως μέσα στο RAN, σε αυτή την παράγραφο πριν περιγραφούν οι MEC αρχιτεκτονικές θα γίνει μια αναφορά στην γενική αρχιτεκτονική των κυψελωτών δικτύων επικοινωνίας από την πλευρά του RAN [105].

3.1.2.1 Ρόλος του RAN στα Κυψελωτά Δίκτυα

Το RAN είναι μέρος της υποδομής του συστήματος επικοινωνίας κυψελωτού δικτύου, το οποίο διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ κινητών συσκευών ή οποιουδήποτε ασύρματης ελεγχόμενης μηχανής με το δίκτυο κορμού [109]. Στα παραδοσιακά κυψελωτά ράδιο συστήματα, ο ασύρματος εξοπλισμός χρήστη συνδέεται μέσω του RAN στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ο εξοπλισμός χρήστη (User equipment, UE) περιλαμβάνει κινητούς σταθμούς, laptops, κ.α. Το RAN καλύπτει μια ευρεία γεωγραφική περιοχή η οποία χωρίζεται σε πολλές κυψέλες και κάθε κυψέλη ενοποιείται με το δικό της σταθμό βάσης. Οι σταθμοί βάσης τυπικά συνδέονται μεταξύ τους μέσω μικροκυμάτων ή σταθερών (landlines) σε ένα ελεγκτή ασύρματου δικτύου (radio network controller , RNC), το οποίο είναι επίσης γνωστό ως ελεγκτής σταθμού βάσης (base station controller, BSC). Το RNC είναι υπεύθυνο να ελέγχει τον σταθμό βάσης και επίσης να πραγματοποιεί ορισμένες λειτουργίες διαχείρισης κινητών. Το μεγαλύτερο μέρος της κρυπτογράφησης πραγματοποιείται πριν να στείλει ο χρήστης δεδομένα στο δίκτυο κορμού. Τα RNCs συνδέονται με ένα ή δυο backhaul δίκτυα. Τα κυψελωτά δίκτυα έχουν γίνει πιο αποτελεσματικά από ότι πριν γιατί η LTE τεχνολογία παρέχει υψηλής ταχύτητας ασύρματες RAN επικοινωνίες με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης. Η αρχιτεκτονική λύση του RAN LTE πυρήνα προσαρμόζει ετερογενή δίκτυα και συστήματα παλαιού τύπου (legacy systems), όπως διασυνδέσεις αέρα του GPRS ή Παγκόσμιες Κινητές Τηλεπικοινωνίες (Universal Mobile Telecommunications, UMTS) [110]. Το UMTS είναι σύστημα τρίτης γενιάς το οποίο μπορεί να εξαρτάται από το παγκόσμιο σύστημα κινητής επικοινωνίας (GSM) που αναπτύχθηκε στην Ευρώπη.

Η γενική μορφή των κυψελωτών δικτύων παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα όπου το δίκτυο κορμού είναι συνδεδεμένο με καλώδιο (π.χ. IP/Ethernet) με το RAN και το RAN συνδέεται ασύρματα με τις συσκευές των χρηστών. Το RAN συνδέει σταθμό βάσης με το backhaul δίκτυο μέσω της διεπαφής Ethernet το οποίο υποστηρίζει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [111].



Εικόνα 42. Κυψελωτή Αρχιτεκτονική

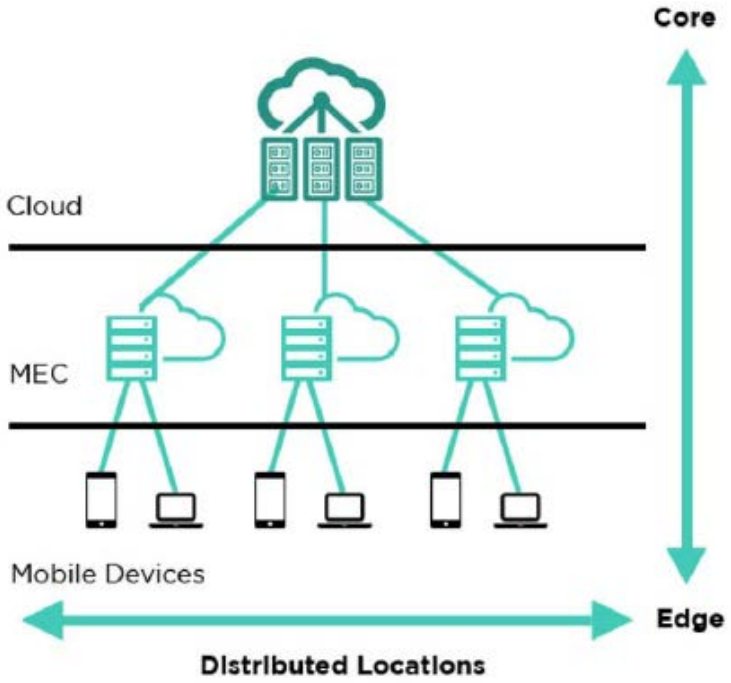
Στο παρελθόν, το IP είχε αναπτυχθεί από το Διαδίκτυο, για την οργάνωση δικτύων και υιοθετήθηκε σταδιακά από το LTE δίκτυο. Η κίνηση IP μεταξύ του RAN και του κορμού

είναι ενθυλακωμένη με το GPRS προτόκολλο διοχέτευσης με μια IPsec κρυπτογράφηση [112]. Αυτό απαγόρευσε τις υπηρεσίες IT να προστεθούν στο πλησιέστερο τρόπο στους τελικούς χρήστες. Επιπλέον, οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας είναι απρόθυμοι να αναπτύξουν εφαρμογές εξαιτίας του ρίσκου της άρνησης των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας ή μείωση της απόδοσης.

Πρόσφατα, η έννοια του Cloud RAN (C-RAN) έχει προταθεί από μερικούς φορείς εκμετάλλευσης. Το C-RAN υπόσχεται μια κεντρικοποιημένη επεξεργασία, συνεργαστικό ράδιο (collaborative radio), υπολογιστική νέφους πραγματικού χρόνου και αποδοτική ενεργειακά υποδομή [113]. Πιο συγκεκριμένα, συναθροιζει όλους τους υπολογιστικούς πόρους όλων των σταθμών βάσεων σε ένα κεντρικό pool. Στο C-RAN, τα σήματα ραδιοσυχνοτήτων από τις γεωγραφικά κατανεμημένες κεραίες συλλέγονται από απομακρυσμένες ραδιο κεφαλές και μεταδίδονται στο νέφος μέσω ενός δικτύου οπτικής μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας το C-RAN, ο αριθμός των θέσεων των κυψελών θα μειωθεί και οι χρήστες θα εποφελούνται καλύτερες υπηρεσίες, ενώ διατηρεί παρόμοια κάλυψη και μειώνει τις λειτουργικές δαπάνες [105].

3.1.2.2 Αρχιτεκτονική Τριών Επιπέδων

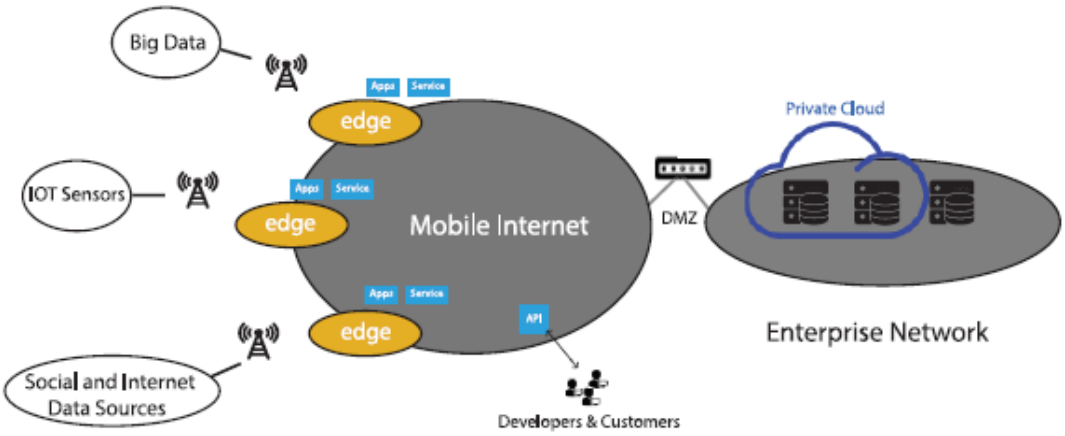
Το MEC είναι ένα επίπεδο που υπάρχει μεταξύ του Cloud και των κινητών συσκευών. Συνεπώς, η υποδομή προέρχεται από την εξής ιεραρχία τριών επιπέδων: το Cloud, το MEC και τις κινητές συσκευές [114]. Το MEC συμμορφώνεται με την υπολογιστική νέφους για να στηρίξει και να βελτιώσει τις επιδόσεις των τελικών συσκευών. Ο σχηματισμός του μοντέλου υπηρεσιών τριών-επιπέδων απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 43. Αρχιτεκτονική Τριών-Επιπέδων

Η γενική αρχιτεκτονική του MEC παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Όπως φαίνεται, διαφορετικού τύπου κινητών συσκευών και αισθητήρων όπως π.χ. IoT, μεγάλα δεδομένα (Big Data) και κοινωνικές πλατφόρμες (social platforms) συνδέονται στο δίκτυο κορμού (δηλαδή το Mobile Internet) μέσω του δικτύου edge, δηλαδή το RAN και το MEC, και το δίκτυο κορμού συνδέεται σε ένα ιδιωτικό δίκτυο νέφους. Με την εξέλιξη του RAN με βάση το LTE, έχει γίνει πιο εφικτό να αναπτύσσεται το MEC το οποίο

φέρνει τις υπηρεσίες νέφους κοντά στους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας. Έτσι, κάθε πλατφόρμα edge αναπαριστά ένα edge cloud με εφαρμογές και υπηρεσίες ειδικά για το σκοπό του κινητού περιβάλλοντος.



Εικόνα 44. Αρχιτεκτονική MEC

Το MEC αποτελείται από εξυπηρετητές γεωγραφικά κατανεμημένους ή εικονικούς εξυπηρετητές με ενσωματωμένες IT υπηρεσίες. Αυτές οι υπηρεσίες υλοποιούνται τοπικά στις κινητές εγκαταστάσεις των χρηστών, π.χ. πάρκα, τερματικά λεωφορείων, και εμπορικά κέντρα [114]. Το MEC μπορεί να χρησιμοποιήσει στοιχεία κυψελωτών δικτύων, όπως σταθμούς βάσης, σημείο πρόσβασης WiFi, ή femto σημείο πρόσβασης (δηλ., σταθμός βάσης χαμηλής ισχύος). Το MEC μπορεί να αναπτυχθεί σε σταθερές τοποθεσίες, για παράδειγμα, σε ένα εμπορικό κέντρο ή σε μια κινητή συσκευή που βρίσκεται σε οποιοδήποτε κινούμενο αντικείμενο, π.χ., αυτοκίνητο ή λεωφορείο. Το MEC μπορεί να αναπτυχθεί σε σταθμό βάσης LTE (eNodeB) ή σε μια πολυτεχνολογία (3G/LTE) συσσωμάτωσης κυψελών (multitechnology cell aggregation site). Η πολυτεχνολογία συσσωμάτωσης των κυψελών σε μια θέση μπορεί να βρίσκεται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά. Για να ωθηθεί η ευφυΐα στο σταθμό βάσης και να βελτιστοποιηθούν αποδοτικά οι RAN υπηρεσίες, η τεχνολογία MEC αναπτύσσει ένα ενεργειακό οικοσύστημα και ένα νέο συνδετικό κρίκο ο οποίος επιτρέπει στις ευφυείς και έξυπνες υπηρεσίες να βρίσκονται σε κοντινές τοποθεσίες στους κινητούς συνδρομητές.

Συνοπτικά, η βασική πρόταση του MEC είναι να προσφέρει υπολογιστική νέφους ωθώντας πόρους νέφους, όπως υπολογιστική, δίκτυο, και αποθήκευση στις άκρες του κινητού δικτύου για να καλύψει τις απαιτήσεις των εφαρμογών οι οποίες είναι υπολογιστικά ακριβές (π.χ. εφαρμογές παιχνιδιών), ευαίσθητες καθυστέρησης (π.χ. εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας) και απαιτητικές σε υψηλό-εύρος ζώνης (π.χ. κινητές αναλύσεις μεγάλων δεδομένων).

3.1.3 Πλεονεκτήματα Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεταφοράς των πόρων στο άκρο του δικτύου [115], [116]:

1) Ο όγκος δεδομένων που πρέπει να μετακινηθεί μειώνεται σημαντικά με τις υπηρεσίες εφαρμογής Edge και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποφεύγεται η δημιουργία της κίνησης. Επίσης βελτιώνεται η ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) εξαιτίας της μειωμένης απόστασης που

διανύουν τα δεδομένα καθώς επίσης μειώνονται τα έξοδα μετάδοσης και η καθυστέρηση (latency).

2) Περιορίζονται τα σημεία συμφόρησης των δεδομένων και πιθανά σημεία αποτυχίας γιατί δεν εμφανίζονται τόσο στην διαδικασία ο πυρήνας του υπολογιστικού περιβάλλοντος
3) Τα κρυπτογραφημένα δεδομένα μετακινούνται προς το κεντρικό δίκτυο με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ασφάλεια. Ακόμα τα δεδομένα περνάνε μέσα από firewalls και ελέγχονται για ιούς και από άλλα σημεία ελέγχου καθώς πλησιάζουν μια επιχείρηση

3.1.4 Κινητή Υπολογιστική για 5G: Από τα Νέφη στις Άκρες

Κατά την τελευταία δεκαετία, η δημοτικότητα των κινητών συσκευών και η εκθετική ανάπτυξη της κίνησης του Διαδικτύου έχουν ωθήσει σε τεράστιες καινοτομίες τις ασύρματες επικοινωνίες και την δικτύωση. Ειδικότερα, οι επιτυχίες των μικρών δικτύων κυψέλης, οι πολλαπλές κεραίες, και οι επικοινωνίες κυμάτων χιλιοστού υπόσχονται να παρέχουν στους χρήστες ασύρματη πρόσβαση της τάξεως του gigabit στα συστήματα επόμενης γενιάς [3]. Ο υψηλός ρυθμός και η εξαιρετικά αξιόπιστη διασύνδεση αέρα επιτρέπει να τρέχουν υπηρεσίες υπολογιστικής από τις κινητές συσκευές στα απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, το οποίο αυτό έχει ως αποτέλεσμα στον τομέα της έρευνας να ονομάζεται Κινητή Υπολογιστική Νέφους (**Mobile Cloud Computing, MCC**). Όμως υπάρχει ένας εγγενείς περιορισμός του MCC, το οποίο ονομάζεται μεγάλη απόσταση μετάδοσης από τους τελικούς χρήστες προς τα απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, το οποίο θα οδηγήσει σε υπερβολικά μεγάλο χρόνο αναμονής στις κινητές εφαρμογές. Γι’ αυτό το MCC δεν είναι κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα αναδυόμενων κινητών εφαρμογών οι οποίες είναι κρίσιμες καθυστέρησης. Επί του παρόντος, νέες αρχιτεκτονικές δικτύου σχεδιάζονται για καλύτερη για καλύτερη ενσωμάτωση της έννοιας του Cloud Computing μέσα στα κινητά δίκτυα όπως αναφέρεται στη συνέχεια.

Στα 5G ασύρματα δίκτυα, οι εξαιρετικά πυκνές συσκευές άκρης, συμπεριλαμβανομένου σταθμοί βάσης μικρής-κυψέλης, ασύρματα σημεία πρόσβασης (access points, APs), φορητοί υπολογιστές, tablets και smartphones θα αναπτυχθούν ώστε κάθε ένα να έχει την υπολογιστική ικανότητα ενός υπολογιστή πριν από μια δεκαετία. Ως εκ τούτου, ένας μεγάλος πληθυσμός συσκευών θα είναι αδρανής κάθε στιγμή. Πιο συγκεκριμένα θα είναι διαθέσιμοι για χρησιμοποίηση τεράστια υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικοί πόροι στις άκρες του δικτύου το οποίο θα είναι αρκετό να ενεργοποιηθεί πανταχού παρούσα κινητή υπολογιστική. Δηλαδή, ο κύριος στόχος των ασύρματων συστημάτων, από το 1G στο 4G, είναι μια επιδίωξη ολοένα και υψηλότερων ασύρματων ταχυτήτων για να υποστηρίζεται η μετάβαση κίνησης από φωνο-κεντρική σε πολυμεσο-κεντρική. Καθώς πλησιάζουν οι ασύρματες ταχύτητες τις αντίστοιχες καλωδιακές, η αποστολή του 5G είναι διαφορετική και πολύ περισσότερο σύνθετη, και συγκεκριμένα για την υποστήριξη της εκρηκτικής εξέλιξης του ICT και του Διαδικτύου. Όσον αφορά τις λειτουργίες, τα 5G συστήματα θα υποστηρίζουν επικοινωνίες, υπολογιστική, έλεγχο και μεταφορά περιεχομένου (communications, computing, control and content delivery, 4C). Από πλευράς εφαρμογών ένα μεγάλο εύρος νέων εφαρμογών και υπηρεσιών για το 5G αναδύεται, όπως online gaming σε πραγματικό χρόνο, εικονική πραγματικότητα (VR) και βίντεο ροή πολύ υψηλής ευκρίνειας (ultra-high-definition, UHD), τα οποία απαιτούν πρωτοφανή υψηλή ταχύτητα πρόσβασης και χαμηλή καθυστέρηση. Στην προηγούμενη δεκαετία είδαμε επίσης την απογείωση διαφορετικών οραμάτων της επόμενης γενιάς Διαδικτύου συμπεριλαμβανομένου IoT, Tactile Internet (Internet υψηλής απόδοσης) (με καθυστέρηση μιλιδευτερολέπτου), Internet-of-Me, και κοινωνικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, η

Cisco είχε προβλέψει ότι 50 δισεκατομμύρια IoT συσκευές (π.χ. αισθητήρες και συσκευές wearable) θα προστεθούν στο Διαδίκτυο μέχρι το 2020, και περισσότερες από αυτές έχουν περιορισμένους πόρους για υπολογιστική, επικοινωνία και αποθήκευση, και πρέπει να στηρίζονται σε Νέφη ή συσκευές άκρων για την επαύξηση των δυνατοτήτων τους [117]. Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι βασιζόμενοι μόνο στο Cloud Computing είναι ανεπαρκής για να πραγματοποιηθεί η φιλόδοξη καθυστέρηση του χιλιοστού του δευτερολέπτου για υπολογιστική και επικοινωνία στο 5G. Επιπλέον, η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των τελικών χρηστών και του απομακρυσμένου νέφους θα επιτρέψουν ένα τσουνάμι δεδομένων να προκαλέσει κορεσμό και πτώση του backhaul των δικτύων. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την συμπλήρωση του Cloud Computing με το MEC το οποίο σπρώχνει την κυκλοφορία, την υπολογιστική και τις λειτουργίες δικτύου (network functions) προς τις άκρες του δικτύου. Αυτό είναι επίσης ευθυγραμμισμένο με ένα βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων της επόμενης γενιάς το οποίο η πληροφορία που παράγεται τοπικά και καταναλώνεται τοπικά η οποία απορρέει από τις εφαρμογές του IoT, κοινωνικά δίκτυα και διανομή περιεχομένου [46].

Το MEC υλοποιείται βάση εικονικοποιημένων πλατφορμών αξιοποιώντας τις πρόσφατες εξελίξεις στην Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (NFV), στα Δίκτυα που βασίζονται στις Πληροφορίες (information-centric networks, ICN) και στα Δίκτυα Ορισμένα από Λογισμικό (software-defined networks, SDN). Πιο συγκεκριμένα, το NFV ενεργοποιεί μια απλή συσκευή άκρης για να παρέχει υπηρεσίες υπολογιστικής σε πολλαπλές κινητές συσκευές δημιουργώντας πολλαπλές εικονικές μηχανές (VMs) για ταυτόχρονη εκτέλεση διαφορετικών εργασιών ή διαφορετικών λειτουργιών δικτύου [118]. Από την άλλη πλευρά, το ICN παρέχει ένα εναλλακτικό παράδειγμα αναγνώρισης υπηρεσιών από άκρο-σε-άκρο για το MEC, μετατοπίζοντας το από host-centric σε information-centric για να υλοποιούνται υπολογισμοί βάση περιβάλλοντος. Τέλος, το SDN επιτρέπει στους MEC διαχειριστές δικτύου να διαχειρίζονται υπηρεσίες μέσω αφαιρετικών λειτουργιών, επιτυγχάνοντας κλιμακώσιμη και δυναμική υπολογιστική. Η κύρια εστίαση της MEC έρευνας είναι να αναπτυχθούν αυτές οι γενικές δικτυακές τεχνολογίες έτσι ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν από τις άκρες του δικτύου.

3.1.5 Η Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου στη 5G Προτυποποίηση

Το πρότυπο 5G το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με νέα λειτουργικότητα, χαρακτηριστικά και απαιτήσεις είναι ακόμα υπό εξέλιξη [119]. Για να επιτευχθούν αυτά τα οράματα, έχουν προβλεφθεί νέα χαρακτηριστικά δικτύου και λειτουργικότητες στα 5G δίκτυα για να μεταφερθούν από το υλικό στο λογισμικό χάρη στις πρόσφατες ανεπτυγμένες SDN και NFV τεχνικές. Από το 2015, το MEC (μαζί με το SDN και VFN) αναγνωρίστηκε από τον οργανισμό 5GPPP ως μια από τις βασικές αναδυόμενες τεχνολογίες για τα 5G δίκτυα καθώς είναι μια φυσική εξέλιξη των κινητών σταθμών βάσης (BSs) και της σύγκλισης του IT και της δικτύωσης τηλεπικοινωνιών [118]. Τον Απρίλιο του 2017, η 3GPP συμπεριέλαβε την υποστήριξη της υπολογιστικής άκρων ως ένα από τα υψηλότερα χαρακτηριστικά στα 5G συστήματα στο έγγραφο τεχνικών προδιαγραφών [120]. Μερικά καινοτόμα χαρακτηριστικά των 5G συστημάτων που θα ανοίξουν το δρόμο για την υλοποίηση, προτυποποίηση και εμποροποίηση του MEC είναι τα εξής [100]:

1) **Υποστήριξη λειτουργιών που προσφέρονται από τα δίκτυα 5G**: Από την πλευρά των 5G φορέων εκμετάλλευσης δικτύων, μειώνοντας την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και τον φόρτο στα δίκτυα μεταφορών είναι οι δύο κυρίαρχοι στόχοι σχεδιασμού, οι οποίοι μπορούν να επιτευχθούν με το MEC ως φορέας εκμετάλλευσης και οι εφαρμογές third part μπορούν να φιλοξενηθούν κοντά στον

εξοπλισμό των χρηστών συνδεόμενες ασύρματα. Για να ενοποιηθεί το MEC στα συστήματα 5G, οι πρόσφατες 5G τεχνικές προδιαγραφές επισημάνουν ρητά την απαραίτητη λειτουργικότητα που θα υποστηρίζει, η οποία θα πρέπει να προσφέρεται από τα 5G δίκτυα για την υπολογιστική άκρων, όπως φαίνεται παρακάτω:

- Το 5G δίκτυο κορμού θα πρέπει να επιλέγει την κίνηση που θα δρομολογείται στις εφαρμογές στα τοπικά δίκτυα δεδομένων
- Το 5G δίκτυο κορμού θα επιλέγει τη λειτουργία επιπέδου χρήστη (user plane function, UPF) στην εγγύτητα του εξοπλισμού του χρήστη (user equipment, UE) για να δρομολογεί και να εκτελεί την κυκλοφορία από τα τοπικά δίκτυα δεδομένων μέσω διεπαφής, η οποία θα πρέπει να βασίζεται στα δεδομένα συνδρομής του UE, στην UE τοποθεσία και στα δεδομένα από τη λειτουργία εφαρμογής (application function, AF)
- Τα 5G δίκτυα πρέπει να εγγυόνται τη συνεδρία (session) και τη συνέχεια της υπηρεσίας για να καταστεί δυνατή η κινητικότητα του UE και της εφαρμογής
- Το 5G δίκτυο και η λειτουργία εφαρμογής (AF) θα πρέπει να παρέχει πληροφορία το ένα στο άλλο μέσω της λειτουργίας έκθεσης δικτύου (network exposure function, NEF)
- Η λειτουργία ελέγχου πολιτικής (The policy control function, PCF) παρέχει κανόνες για QoS έλεγχο και χρέωση για την κίνηση που δρομολογείται στα τοπικά δίκτυα δεδομένων

2) **Καινοτόμα χαρακτηριστικά στο 5G για την διευκόλυνση του MEC**: Σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές ασύρματων δικτύων, τα 5G δίκτυα διαθέτουν διάφορα καινοτόμα χαρακτηριστικά τα οποία είναι επωφελείς για την υλοποίηση, την τυποποίηση και την εμπορευματοποίηση του MEC. Τρία από αυτά είναι τα παρακάτω:

- Υποστήριξη υπηρεσίας (support service requirement): Στα 5G συστήματα, τα χαρακτηριστικά του QoS (από άποψη τύπο πόρου, επίπεδο προτεραιότητας, προϋπολογισμός καθυστέρησης πακέτου, και ποσοστό σφάλματος πακέτων), τα οποία περιγράφουν την προώθηση πακέτων επεξεργασίας όπου μια ροή QoS λαμβάνει από άκρο-σε-άκρο μεταξύ του UE και του UPF, συσχετίζονται με το QoS 5G Δείκτη (QoS Indicator, 5QI). Στο [120] παρέχεται μια τυποποιημένη 5QI σε QoS απεικόνιση που δείχνει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών το οποίο μπορεί να υποστηριχθεί από τα 5G συστήματα. Ποιο συγκεκριμένα, τα 5G συστήματα μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις των ευαίσθητων-καθυστέρησης εφαρμογών (π.χ. gaming σε πραγματικό χρόνο και μηνύματα από όχημα σε οτιδήποτε (vehicular-to-everything, V2X) τα οποία έχουν αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης πακέτου, δηλαδή < 50ms και ένα σχετικά μικρό ποσοστό σφάλματος πακέτου < 10-3), και υπηρεσίες που είναι κρίσιμες για αποστολή (π.χ. σηματοδοσία push-to-talk η οποία έχει και χαμηλή καθυστέρηση (< 60ms) και απαιτήσεις μικρού ποσοστού σφάλματος πακέτων (< 10−6)). Αυτές οι εφαρμογές συμπίπτουν με τις τυπικές MEC εφαρμογές, δηλαδή το 5G δίκτυο είναι μια βιώσιμη επιλογή (viable choice) για ασύρματες επικοινωνίες στα MEC συστήματα
- Προηγμένη Στρατηγική διαχείρισης κινητικότητας (advanced mobility management strategy): Η έννοια του προτύπου κινητικότητας εισήχθη για σχεδιασμό στρατηγικής διαχείρισης κινητικότητας για τα 5G συστήματα.

Τέτοιες στρατηγικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το 5G δίκτυο κορμού για να χαρακτηριστεί και να βελτιστοποιηθεί η UE κινητικότητα. Ειδικά, το πρότυπο κινητικότητας μπορεί να καθοριστεί, να παρακολουθηθεί και να ενημερωθεί από το 5G δίκτυο κορμού με βάση την εγγραφή του UE, στατιστικά της UE κινητικότητας, τοπική πολιτική δικτύου, και UE σχετική πληροφορία [120]. Το πρότυπο κινητικότητας όχι μόνο παίζει ένα κεντρικό ρόλο στο σχεδιασμό προηγμένων συστημάτων μετάδοσης στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, αλλά επίσης γίνεται μια μη-αμελητέα σχεδίαση για πολλές MEC εφαρμογές π.χ. υπηρεσίες επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και εφαρμογές συνδεδεμένων οχημάτων (connected vehicle). Έτσι η ενοποίηση των προηγμένων στρατηγικών διαχείρισης κινητικότητας οι οποίες κάνουν πλήρη χρήση των προτύπων στα 5G δίκτυα μπορούν να βοηθήσουν να αναπτυχθεί μια αποτελεσματική ασύρματη διασύνδεση με τα MEC συστήματα. Εκτός αυτού, το πρότυπο κινητικότητας το οποίο αποκτήθηκε από το 5G δίκτυο κορμού μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω για να σχεδιαστούν κοινές ράδιο-και-υπολογιστικές στρατηγικές διαχείρισης πόρων για MEC συστήματα

- Δυνατότητα τεμαχισμού του δικτύου (capability of network slicing): Ο τεμαχισμός του δικτύου είναι μια φόρμα της ευέλικτης και εικονικής αρχιτεκτονικής δικτύου η οποία επιτρέπει πολλαπλά στιγμιότυπα δικτύου στην κορυφή μιας κοινής διαμοιραζόμενης υποδομής. Κάθε ένα από τα δικτυακά στιγμιότυπα είναι βελτιστοποιημένο για συγκεκριμένη υπηρεσία επιτρέποντας απομόνωση πόρων και προσαρμοσμένες λειτουργίες δικτύου [121]. Εξαιτίας των ετερογενών τύπων υπηρεσίας που πρέπει να υποστηρίξουν τα 5G συστήματα (διαφορετικές απαιτήσεις από πλευράς λειτουργικότητας και απόδοσης), ο τεμαχισμός δικτύου θεωρείται απαραίτητο χαρακτηριστικό στα 5G συστήματα για να υποστηρίξουν διαφορετικές υπηρεσίες που θα τρέχουν μέσω ενός ενιαίου δικτύου ραδιοπρόσβασης. Υφιστάμενες μελέτες διαπιστώνουν ότι ο τεμαχισμός δικτύου είναι υπέρτατης ανάγκης για τα παρακάτω τρία σενάρια: εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (ultra-reliable and low latency communication, URLLC), μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής (massive machine-type communication, mMTC) και βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής (enhanced mobile broadband, eMBB) [122]. Με την ικανότητα του τεμαχισμού του δικτύου στα 5G συστήματα, οι MEC εφαρμογές μπορεί να προβλεφθούν με βελτιστοποιημένους και εξειδικευμένους πόρους δικτύου οι οποίοι μπορούν να βοηθήσουν να μειωθεί η καθυστέρηση που προκύπτει από την πρόσβαση ουσιαστικά στα δίκτυα και την υποστήριξη των εντατικών προσβάσεων της MEC στους συνδρομητές της υπηρεσίας

3.2 Υπολογιστική Ομίχλης

Η Υπολογιστική Ομίχλης (Fog Computing) πρωτοαναφέρθηκε από την Cisco το 2011 και βασίζεται στην φιλοσοφία των «νεφών», τα οποία βρίσκονται ποιο κοντά στο έδαφος με την μορφή της «ομίχλης» (fog). Αυτή η τεχνολογία φέρνει το Cloud Computing ποιο κοντά στους χρήστες και συγκεκριμένα στα ασύρματα δίκτυα, προκειμένου να υποστηρίξει το όραμα του Internet of Things [123].

Το Fog Computing είναι ένα σύστημα οριζόντιας αρχιτεκτονικής που διανέμει τους πόρους και τις υπηρεσίες επεξεργασίας, αποθήκευσης, ελέγχου και δικτύωσης σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της συνέχειας Cloud to Things [124]. Ένας μεγάλος αριθμός από διάχυτες, ετερογενείς (ασύρματες ακόμα και αυτόνομες) και αποκεντροποιημένες συσκευές έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν και ενδεχομένως να συνεργάζονται μεταξύ τους ή με το δίκτυο για να εκτελέσουν διεργασίες αποθήκευσης και επεξεργασίας χωρίς ανάγκη παρέμβασης τρίτου σε ένα κλειστό περιβάλλον [125].

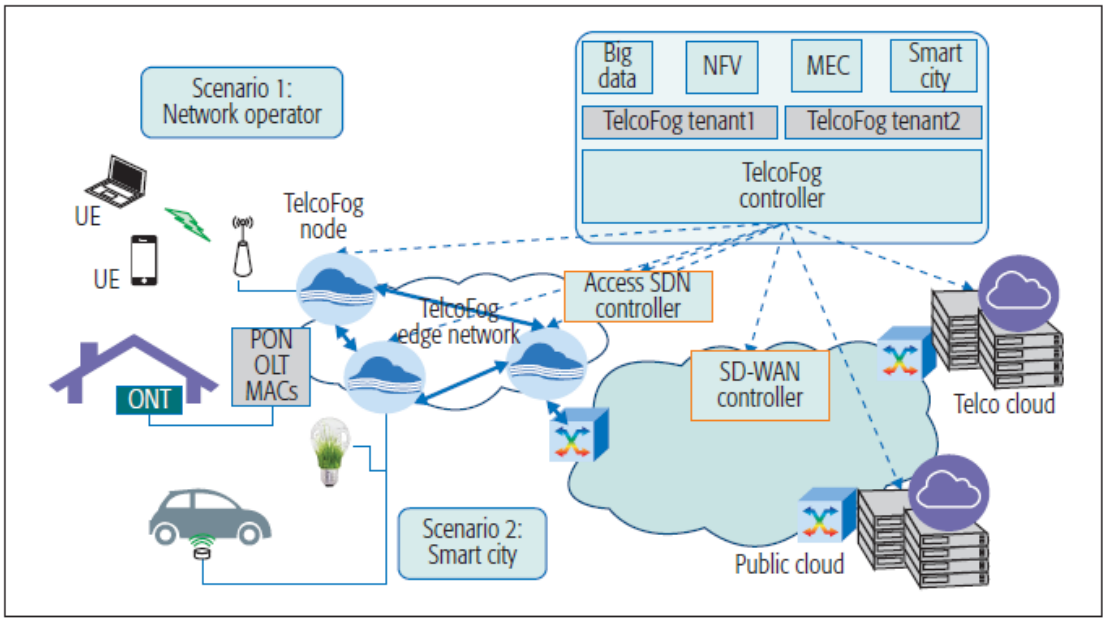
Οι Fog Computing κόμβοι τοποθετούνται μακριά από τα κυρίως Cloud Data Centers στο last hop επιτρέποντας χαμηλό και προβλέψιμο latency. Η κινητικότητα των συσκευών υποστηρίζεται με ανακατεύθυνση της εφαρμογής στην κινητή συσκευή και εν συνεχεία σύνδεση της με διαφορετικό κόμβο σε μικρότερη απόσταση, σε περιπτώσεις που μια συσκευή απομακρυνθεί από την εμβέλεια του Fog Computing κόμβου στον οποίο είναι συνδεδεμένη.

3.2.1 Αρχιτεκτονική Υπολογιστικής Ομίχλης για 5G Δίκτυα

Στο [126] προτείνουν μια καινοτόμα αρχιτεκτονική για την υποδομή της υπολογιστικής ομίχλης την οποία την ονομάζουν αρχιτεκτονική TelcoFog. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι υψηλά κατανεμημένη και εξαιρετικά πυκνή η οποία μπορεί να διατίθεται στις άκρες ενσύρματου/ασύρματου δικτύου για ένα φορέα τηλεπικοινωνιών για να παρέχει ενιαίες, αποδοτικές και νέες 5G υπηρεσίες, όπως το NFV, MEC και υπηρεσίες για third parties (π.χ., έξυπνες πόλεις, βιομηχανίες κατακόρυφης δομής (vertical industries) και IoT). Οι κατανεμημένες και προγραμματιζόμενες τεχνολογίες νέφους που προτείνονται στο TelcoFog αναμένεται ενισχύσουν τη θέση του κινητού δικτύου και τις αγορές νέφους. Το TelcoFog, από σχεδιασμού, είναι ικανό να ενσωματώσει ένα οικοσύστημα για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων το οποίο μπορεί να παρέχει υπηρεσίες NFV, MEC και IoT. Τα βασικά πλεονεκτήματα της TelcoFog είναι η δυναμική ανάπτυξη νέων κατανεμημένων υπηρεσιών χαμηλής-καθυστέρησης. Η πρωτοποριακή TelcoFog αρχιτεκτονική αποτελείται από τους παρακάτω τρεις θεμέλιους λίθους οι οποίοι είναι: κλιμακώσιμος κόμβος TelcoFog, ο οποίος ενοποιείται άψογα με την τηλεπικοινωνιακή υποδομή, ένας TelcoFog ελεγκτής, ο οποίος εστιάζει στη διασφάλιση υπηρεσιών και οι υπηρεσίες TelcoFog οι οποίες είναι ικανές να τρέχουν στην κορυφή της TelcoFog και της τηλεπικοινωνιακής υποδομής.

Οι Fog κόμβοι που τοποθετούνται στις άκρες του δικτύου απαιτείται να υποστηρίζουν ένα αριθμό ετερογενών υπηρεσιών παρέχοντας υπολογιστική, αποθήκευση, και πόρους δικτύωσης. Αυτές οι υπηρεσίες έχουν τις δικές τους απαιτήσεις από πλευράς εύρους ζώνης, καθυστέρησης, αξιοπιστίας κ.α. Επιπλέον, η υιοθέτηση της υπολογιστικής ομίχλης φέρνει την δυνατότητα την οποία πόροι νέφους δεσμεύονται για κάθε υπηρεσία και μπορούν να κατανέμονται μεταξύ πολλών λειτουργιών (γενικά εικονικοποιημένων λειτουργιών - virtualized functions), οι οποίες αρχικοποιούνται μεταξύ επιλεγμένων κόμβων ομίχλης. Η κατανομή των λειτουργιών και η μεταγενέστερη διαβίβαση της κίνησης (ελέγχου και δεδομένων) μέσω αυτών των λειτουργιών αναφέρεται ως

υπηρεσία αλυσιδωτής λειτουργίας (service function chaining, SFC) [127]. Στο εσωτερικό του TelcoFog, η έννοια του SFC υιοθετείται στην υπολογιστική ομίχλης, για να προσφέρει επιπρόσθετες υπηρεσίες σε όλα τα σενάρια (δηλ., IoT, MEC και NFV).

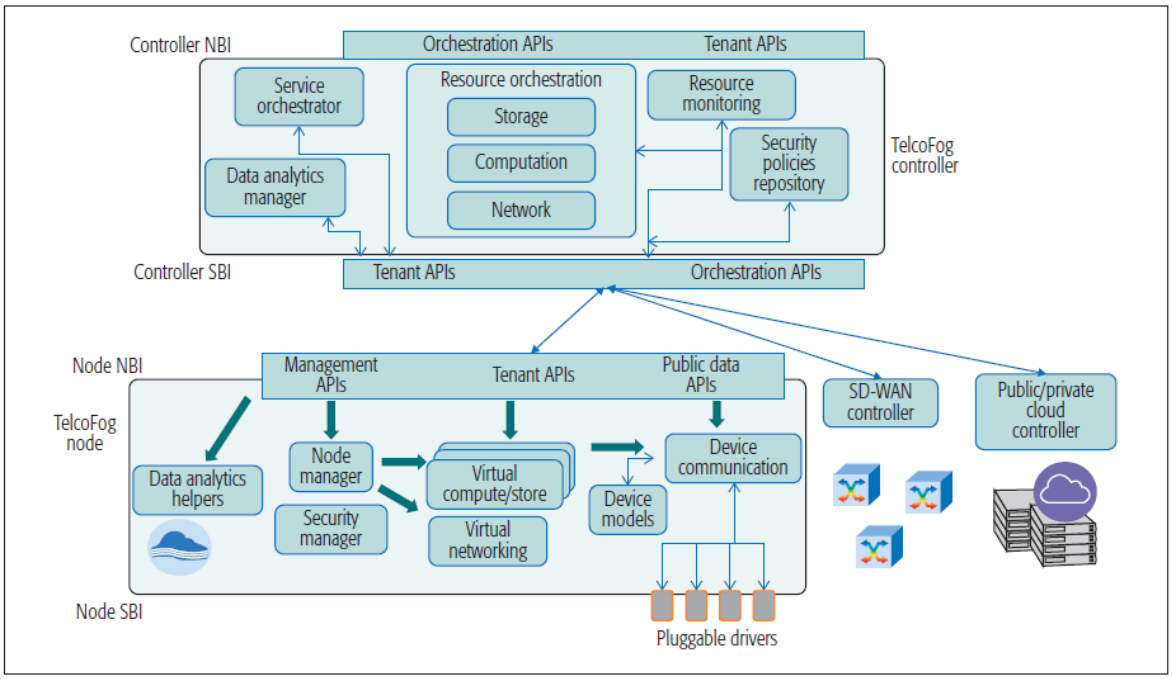


Εικόνα 45. Αρχιτεκτονική TelcoFog

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική και πως μπορεί να εισαχθεί στις άκρες της υποδομής ενός φορέα δικτύου για να εκπληρώσει τις προκλήσεις που παρουσιάζονται. Οι Fog κόμβοι τοποθετούνται στις άκρες του δικτύου για να προβλεφθούν τα παρακάτω δυο σενάρια: 1) Ενοποιημένες υπηρεσίες φορέα δικτύου και 2) Ενοποιημένες υπηρεσίες έξυπνης πόλης. Οι κόμβοι TelcoFog μπορούν να δημιουργήσουν ένα δίκτυο επικάλυψης (αναφέρεται ως ένα δίκτυο άκρων TelcoFog) στην κορυφή του φορέα δικτύου πρόσβασης για να διασυνδεθούν, επιτρέποντας διαφορετικές υπηρεσίες δικτύου (π.χ., υπηρεσίες πολυεκπομπής ή δεσμευμένες (anycast) υπηρεσίες βάση της αναδυόμενης τεχνολογίας δρομολόγησης). Και στα δυο σενάρια, ο κόμβος TelcoFog παίζει σημαντικό ρόλο στο να παρέχει την απαραίτητη κατανεμημένη και ασφαλή υπολογιστική, αποθήκευση, και δικτυακή υποδομή για να παρέχει εξειδικευμένες υπηρεσίες. Ο TelcoFog μπορεί να λειτουργεί τόσο σε μια ιεραρχική (γονιός/παιδί) όσο και σε μια αρχιτεκτονική ομότιμων για βέλτιστη δέσμευση πόρων σε πολλά δίκτυα και TelcoFog κόμβους. Επίσης αυτός μπορεί να περιλαμβάνει ένα μηχανσιμό για τεμαχισμό τόσο των πόρων TelcoFog, όσο και να παρέχει μια τυποποιημένη διαδικασία για να περιγράφει και να αναπτύσσει υπηρεσίες TelcoFog. Τέλος, για την συμπλήρωση αυτών των μηχανισμών, παρέχεται πλαίσιο μεγάλων δεδομένων και αναλύσεις.

Οι κόμβοι TelcoFog λειτουργούν ως διασυνδεδεμένοι και υψηλά κατανεμημένοι πόροι κοντά στις άκρες του δικτύου. Συνολικά, η αρχιτεκτονική TelcoFog προτείνει τις απαραίτητες τεχνολογίες για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση, ασφάλεια, και ελαστικότητα (resilient) στους TelcoFog κόμβους και τον απαραίτητο TelcoFog ελεγκτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ενορχήστρωση των πόρων TelcoFog καθώς επίσης και η εσωτερική διασύνδεσή τους μέσω των υψηλά προγραμματιζόμενων δικτύων.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συνολική περιγραφή των βασικών συστατικών και στον κόμβο TelcoFog (κάτω) και στον TelcoFog ελεγκτή (πάνω):



Εικόνα 46. Λεπτομερή Αρχιτεκτονική TelcoFog συστήματος

3.2.2 Χαρακτηριστικά Υπολογιστικής Ομίχλης

Η υπολογιστική ομίχλης είναι ένα αποκεντρωμένο «σύννεφο» στο επίπεδο του εδάφους εκεί όπου δημιουργούνται πιο συχνά τα δεδομένα. Είναι μια εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές ευαίσθητες-χρόνου όπου απαιτούν επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο καθιστώντας έτσι περιττή την αποστολή αυτών των δεδομένων στο «σύννεφο» λόγω καθυστερήσεων και ακριβού ή περιορισμένου εύρους ζώνης. Παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών υπολογιστικής ομίχλης μέσα σ' 'ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι η ανάλυση, η βελτιστοποίηση και ο προηγμένος έλεγχος σε ένα κέντρο εργασίας κατασκευής, μονάδα λειτουργίας, εντός και μεταξύ των μονάδων-επιχειρήσεις, όπου οι αισθητήρες, ελεγκτές, ιστορικές, αναλυτικές μηχανές μοιράζονται δεδομένα διαδραστικά σε πραγματικό χρόνο. Στα άνω άκρα της υπολογιστικής ομίχλης είναι η τοπική υπολογιστική δύναμη όπως τα συστήματα παραγωγής που εκτείνονται σε κέντρα εργασίας και τις λειτουργίες της μονάδας, υψηλότερα ακόμα είναι τα περιφερειακά σύννεφα και τέλος το σύννεφο σε επίπεδο επιχείρησης. Η υπολογιστική ομίχλη δεν είναι ανεξάρτητη του cloud computing, αλλά συνδέεται με την αποστολή επεξεργασμένων συνοπτικών πληροφοριών και σε αντάλλαγμα λαμβάνει πληροφορίες που απαιτούνται σε τοπικό επίπεδο.

Τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος υπολογιστικής ομίχλης είναι τα παρακάτω [123]:

- Τοποθεσία edge, με γνώση τοποθεσίας και χαμηλή καθυστέρηση (Edge location, location awareness, and low latency): Αυτές οι αρχές του Fog μπορούν να εντοπίζονται σε πρόωρες προτάσεις (early proposals) για να υποστηρίζονται σημεία πρόσβασης με πλούσιες υπηρεσίες στην άκρη του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης (π.χ. gaming, βίντεο ροή και επαυξημένη πραγματικότητα)
- Γεωγραφική κατανομή (Geographical distribution): Σε αντίθεση με τα πιο κεντρικοποιημένα Cloud, οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές που στοχεύει το Fog απαιτούν ευρέως κατανεμημένες υλοποιήσεις. Το Fog, για παράδειγμα, θα παίξει ένα ενεργό ρόλο στη παράδοση υψηλής ποιότητας ροής σε κινούμενα οχήματα,

μέσω των τοποθετημένων proxies και σημείων πρόσβασης κατά μήκος των εθνικών οδών και των διαδρομών

- Δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας για να παρακολουθούν το περιβάλλον, και το Smart Grid είναι άλλα παραδείγματα εκ φύσεως κατανεμημένων συστημάτων, τα οποία απαιτούν κατανεμημένη υπολογιστική και πόρους αποθήκευσης
- Πολύ μεγάλος αριθμός από κόμβους, ως συνέπεια της ευρείας γεωγραφικής κατανομής, όπως αποδεικνύεται στα δίκτυα αισθητήρων γενικά, και συγκεκριμένα στο Smart Grid
- Υποστήριξη για κινητικότητα (Support for mobility): Είναι απαραίτητο για πολλές Fog εφαρμογές να επικοινωνούν κατευθείαν με κινητές συσκευές, και έτσι να υποστηρίζουν τεχνικές κινητικότητας, που να αποσυνδέουν την ταυτότητα υποδοχής από την ταυτότητα τοποθεσίας, και απαιτούν ένα κατανεμημένο σύστημα καταλόγου
- Αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο (Real-time interactions): Σημαντικές Fog εφαρμογές περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις πραγματικού χρόνου από ότι την επεξεργασία βάση τεμαχίων (batch processing)
- Επικράτηση της ασύρματης πρόσβασης (Predominance of wireless access)
- Ανομοιογένεια (Heterogeneity): Οι Fog κόμβοι έρχονται με διαφορετικές μορφές και θα αναπτύσσονται σε μεγάλο εύρος περιβαλλόντων
- Διαλειτουργικότητα και ομοσπονδοποίηση (Interoperability and federation): Η απρόσκοπτη υποστήριξη ορισμένων υπηρεσιών (ροή είναι ένα καλό παράδειγμα) απαιτούν τη συνεργασία διαφόρων παρόχων. Έτσι, τα Fog συστατικά πρέπει να διαλειτουργούν και οι υπηρεσίες πρέπει να είναι ενωμένες μεταξύ τομέων
- Υποστήριξη για on-line αναλύσεις και αλληλεπίδραση με το Νέφος. Το Fog τοποθετείται να παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση και επεξεργασία των δεδομένων κοντά στην πηγή

Η χρήση υπολογιστικής ενέργειας υψηλής απόδοσης είναι λίαν απαραίτητη προκειμένου να πραγματοποιηθούν ενέργειες όπως ανάλυση, πρόβλεψη, κατέβασμα, αποθήκευση, καθαρισμός, φιλτράρισμα και βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Αυτό όμως δεν σημαίνει απαραίτητα υψηλό κόστος, γιατί εμπορικοί υπολογιστές με ένα κοινό λειτουργικό σύστημα και με μέτριες αποδόσεις είναι αρκετοί.

Για να σχεδιαστεί ένα τέτοιο σύστημα, αντλούνται στοιχεία από την εμπειρία, τις αρχιτεκτονικές, τα εργαλεία και τις επιτυχίες των γιγάντων της πληροφορικής όπως η Google, Amazon, Youtube, Facebook, Twitter και πολλά αλλα. Έχουν δημιουργήσει ισχυρές υπολογιστικές αρχιτεκτονικές υψηλής απόδοσης που εκτείνονται σε παγκόσμια κέντρα δεδομένων. Έχουν παράσχει εργαλεία ανάπτυξης, γλώσσες όπως η Google GO που είναι κατάλληλες για υψηλής ταχύτητας παράλληλη κατανεμημένη επεξεργασία και ισχυρές υπηρεσίες δικτύωσης και web services. Έχοντας μια παρόμοια ανάγκη, μπορούν διάφορες επιχειρήσεις να υιοθετήσουν παρόμοιες αρχιτεκτονικές υπολογιστών υψηλών επιδόσεων για να παραδώσουν και να μοιραστούν τα αποτελέσματα εκεί που χρειάζονται σε πραγματικό χρόνο.

3.2.3 Ασφάλεια στην Υπολογιστική Ομίχλης

Η υπολογιστική ομίχλης είναι ένα σύστημα οριζόντιας αρχιτεκτονικής που διανέμει τους πόρους και τις υπηρεσίες πληροφορικής και ελέγχου, αποθήκευσης και δικτύωσης επικοινωνιών πιο κοντά στις πηγές δεδομένων [130]. Η υπολογιστική ομίχλη μέσω της συνεχούς επικοινωνίας ομίχλης και πραγμάτων, μπορεί να λύσει τις προκλήσεις του εύρους ζώνης, της καθυστέρησης και των επικοινωνιών που συνδέονται με τα δίκτυα επόμενης γενιάς που θα χρησιμοποιούν IoT, 5G και την τεχνητή νοημοσύνη. Μέσα από αυτή την κατανεμημένη προσέγγιση της αρχιτεκτονικής, είναι επίσης ιδανική αρχιτεκτονική ασφάλειας του κυβερνοχώρου. Η υπολογιστική ομίχλης επιτρέπει σε βιομηχανικές επιχειρήσεις την τυποποίηση αρχιτεκτονικών ασφαλείας σε IoT πλατφόρμες, τους προμηθευτές και τους πελάτες. Από τη σχεδίαση, η ομίχλη φιλοξενεί τις μοναδικές αρχιτεκτονικές και τα τρωτά σημεία του IoT. Λειτουργεί στην περιοχή μεταξύ σύννεφου και πραγμάτων, παρά στην περίμετρο, για να προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένοι θεμελιώδεις τρόποι που το fog computing κάνει το IoT πιο ασφαλή [131]:

- Υπολογιστική και Έλεγχος: Ο έλεγχος και η υπολογιστική με το fog computing διενεργείται κοντά στην συσκευή του τελικού χρήστη, σε αντίθεση με την απομακρυσμένη αποθήκευση δεδομένων σε κέντρα δεδομένων ή κυψελοειδή δίκτυα. Σε αυτό το κατανεμημένο περιβάλλον, οι απειλές ή επιθέσεις θα χρειαστεί να περάσουν τους κόμβους της ομίχλης, η οποία μπορεί να εντοπίσει γρήγορα ασυνήθιστη δραστηριότητα και να μετριαστεί πριν περάσει από το σύστημα
- Αποθήκευση δεδομένων: Όμοια και στην αποθήκευση δεδομένων, τα δεδομένα που συλλέγονται από τις συσκευές ή που είναι διασκορπισμένα στις συσκευές των τελικών χρηστών διαχειρίζονται κατάλληλα και προστατεύονται από την κατανεμημένη υποδομή ασφαλών κόμβων ομίχλης
- Επικοινωνία και Δικτύωση: Η επικοινωνία και η δικτύωση με την υπολογιστική ομίχλης πραγματοποιείται στη συσκευή του τελικού χρήστη ή κοντά σε αυτή και δεν δρομολογείται όλη η κίνηση μέσω των δικτύων κορμού. Αυτό παρέχει επίσης ένα πλεονέκτημα προστασίας ιδιωτικής ζωής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στις εφαρμογές που χρησιμοποιούν το D2D πρότυπο ασύρματης συσκευής, η ομίχλη μειώνει τις πιθανότητες των υποκλοπών λόγω του ότι κρατούν την επικοινωνία με τα συστήματα σε κοντινή απόσταση
- Το Fog computing μπορεί να προστατεύει τις μικρότερες συσκευές με περιορισμένους πόρους οι οποίες έχουν μικρή ή καθόλου ικανότητα να υπερασπιστούν τους εαυτούς τους ενάντια σε εκλεπτυσμένες επιθέσεις στον κυβερνοχώρο (όπως η επίθεση Dyn), μπορούν να συνεργάζονται με ένα κατανεμημένο πολυεπίπεδο δίκτυο κόμβων ομίχλης και διακομιστές του cloud με σκοπό να επιτευχθούν τα απαραίτητα επίπεδα προστασίας σύμφωνα με το δόγμα “άμυνα εις βάθος”.

Ένας κόμβος ομίχλης μπορεί να εντοπίσει μπορεί να εντοπίσει ασυνήθιστη δραστηριότητα κάνοντας χρήστη ενός απλού λογισμικού προστασίας. Τα ύποπτα στοιχεία και οι ασυνήθιστες δραστηριότητες μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν για παραβιάσεις ασφάλειας, προστασίας της ιδιωτικής ζωής και τη διαθεσιμότητα. Επιπλέον, ένας μικρός αισθητήρας μπορεί να αναμένεται να λειτουργήσει πέντε ή περισσότερα χρόνια με την εσωτερική μπαταρία του και αυτό μπορεί να μην παρέχει αρκετή ενέργεια για ισχυρή κρυπτογράφηση. Ένας κοντινός κόμβος ομίχλης μπορεί να εκτελέσει τος πιο εξελιγμένες λειτουργίες ασφαλείας που είναι απαραίτητες για την προστασία του.

Ακόμα, το fog computing μπορεί να διατηρήσει τα διαπιστευτήρια ασφαλείας και το λογισμικό στις νεότερες εκδόσεις τους σε ένα μεγάλο αριθμό συσκευών στην κλίμακα του παγκόσμιου IoT περιβάλλοντος. Επειδή είναι αδύνατο κάθε συσκευή να συνδέεται με το νέφος για την ενημέρωση των διαπιστευτηρίων και του λογισμικού της, αρκετές φορές την ημέρα, οι κόμβοι ομίχλης έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχουν τα διαπιστευτήρια ασφαλείας σε τεράστιους αριθμούς συσκευών που βασίζονται σε εφαρμογές ή/και την ιδιοκτησία ταυτόχρονα χωρίς να διακόπτεται η επικοινωνία τους. Επιπλέον το fog computing μπορεί να παρακολουθεί την κατάσταση ασφαλείας των κατανεμημένων συστημάτων με επεκτάσιμο και αξιόπιστο τρόπο. Στον κόσμο του IoT είναι απαραίτητο να είναι σε θέση αν διατυπωθεί με ένα αξιόπιστο τρόπο, αν ένας μεγάλος αριθμός κατανεμημένων συσκευών και συστημάτων λειτουργούν με ασφάλεια και εμπιστοσύνη. Πολλές από τις σημερινές παραβιάσεις έχουν σχεδιαστεί για να στέλνουν μηνύματα κατάστασης που κάνουν τις διεργασίες να φαίνονται φυσιολογικές. Τέτοιου είδους επιθέσεων η ομίχλη έχει την υποδομή για να τις ανιχνεύσει.

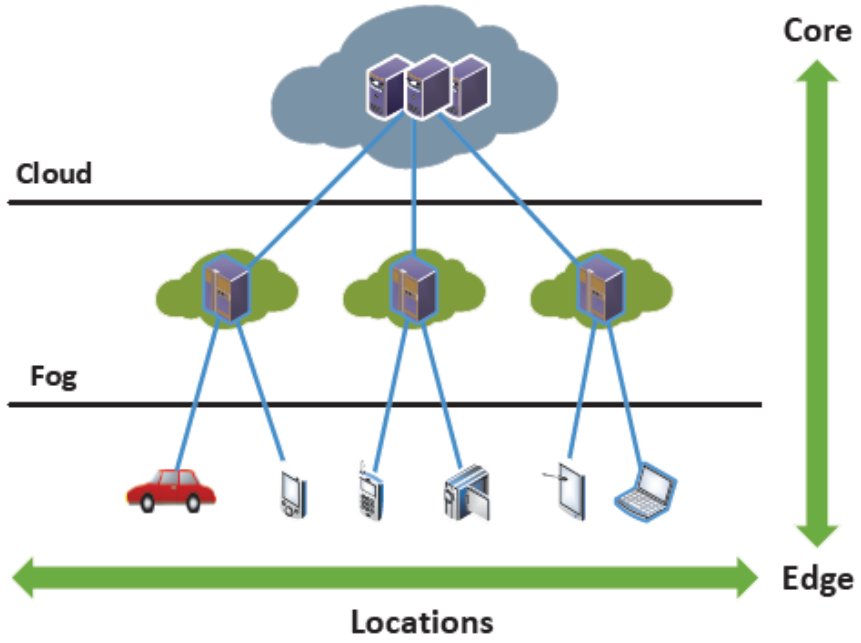
Τέλος, το fog computing σε πραγματικό χρόνο παρέχει υπηρεσίες αντιμετώπισης περιστατικών που επιτρέπουν σε συστήματα IoT να ανταποκριθούν σε κινδύνους / παραβιάσεις χωρίς διακοπή των υπηρεσιών τους. Αυτό είναι μια ιδιαίτερα κρίσιμη λειτουργία σε βιομηχανίες όπου τα συστήματα και οι διεργασίες IoT παρέχουν στις επιχειρήσεις μεγάλη παραγωγή εσόδων και κλείνοντας τις διεργασίες δεν είναι καθόλου πρακτική επιλογή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα παρακάτω:

- Κακόβουλο λογισμικό μολύνει μια γεννήτρια παραγωγής ρεύματος. Αν κλείσει η γεννήτρια μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στο δίκτυο ακόμα και διακοπές ρεύματος. Το fog computing μπορεί να ανταποκριθεί με ασφάλεια και κατά τις εργασίες συντήρησης να διατηρήσει το σύστημα χωρίς αποσυνδέσεις
- Κακόβουλο λογισμικό μολύνει ένα συνδεδεμένο αυτοκίνητο ενώ αυτό βρίσκεται εν κινήσει. Αν κλείσει ο κινητήρας του αυτοκινήτου δεν είναι σωστή επιλογή πόσο μάλλον αν βρίσκεται το αυτοκίνητο σε εθνική οδό. Το fog computing μπορεί να ανιχνεύσει το κακόβουλο λογισμικό και κατά την κίνηση του αυτοκινήτου να επιλύσει το πρόβλημα

3.3 Εφαρμογές Κινητής Υπολογιστικής

3.3.1 Αρχιτεκτονική των Εφαρμογών Υπολογιστικής Ομίχλης

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική των Εφαρμογών της Υπολογιστικής Ομίχλης (Fog Computing). Συγκεκριμένα απεικονίζεται το δίκτυο ομίχλης να βρίσκεται πιο κοντά στις έξυπνες συσκευές με την επεξεργασία των δεδομένων να πραγματοποιείται πιο κοντά στις συσκευές και η επεξεργασμένη πληροφορία στη συνέχεια αποστέλλεται στο cloud.



Εικόνα 47. Αρχιτεκτονική Fog Computing Εφαρμογών

Η υπολογιστική νέφους έχει αρχίσει να επεκτείνεται από μια νεότερη έννοια, την υπολογιστική ομίχλης η οποία είναι καλύτερη και μεγαλύτερη από το σύννεφο [128], [129]. Η υπολογιστική ομίχλης όμοια με την υπολογιστική νέφους παρέχεις επίσης στους χρήστες του δεδομένα, αποθήκευση, υπολογιστική και υπηρεσίες εφαρμογών. Τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν την ομίχλη από το σύννεφο είναι η υποστήριξη της κινητικότητας, η εγγύτητά της προς τους τελικούς χρήστες και η πυκνή γεωγραφική κατανομή του. Οι υπηρεσίες φιλοξενούνται στην άκρη του δικτύου ή ακόμα και σε συσκευές όπως set-top-boxes ή σημεία πρόσβασης. Με τον τρόπο αυτό, η υπολογιστική ομίχλη βοηθά στη μείωση του χρόνου της καθυστέρησης υπηρεσίας και ακόμη βελτιώνει την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μια ακόμα καλύτερη εμπειρία χρήστη. Η υπολογιστική ομίχλης υποστηρίζει ακόμα τις IoT εφαρμογές που απαιτούν προβλεπόμενη καθυστέρηση ή καθυστέρηση σε πραγματικό χρόνο. Ένα αντικείμενο στο IoT είναι αυτό το οποίο μπορεί να εκχωρηθεί μια διεύθυνση IP και παρέχεται με την ικανότητα να μεταφέρει δεδομένα μέσω δικτύου. Μερικά από αυτά μπορεί να καταλήξουν να δημιουργούν πολλά δεδομένα. Όμως μεταδίδοντας όλα αυτά τα δεδομένα στο cloud και στη συνέχεια μεταδίδοντας απάντηση πίσω, καταλήγουμε να δημιουργούμε τεράστια ζήτηση σε εύρος ζώνης και κατά συνέπεια μεγάλη καθυστέρηση. Στην υπολογιστική ομίχλης ένα μεγάλο μέρος της επεξεργασίας πραγματοποιείται σε ένα rooter δημιουργώντας έτσι μια εικονική πλατφόρμα που παρέχει υπηρεσίες δικτύωσης, υπολογιστικής και αποθήκευσης μεταξύ των cloud computing κέντρων δεδομένων και των τελικών συσκευών. Οι υπηρεσίες αυτές είναι κεντρικής σημασίας τόσο για την υπολογιστική νέφους όσο και για την υπολογιστική

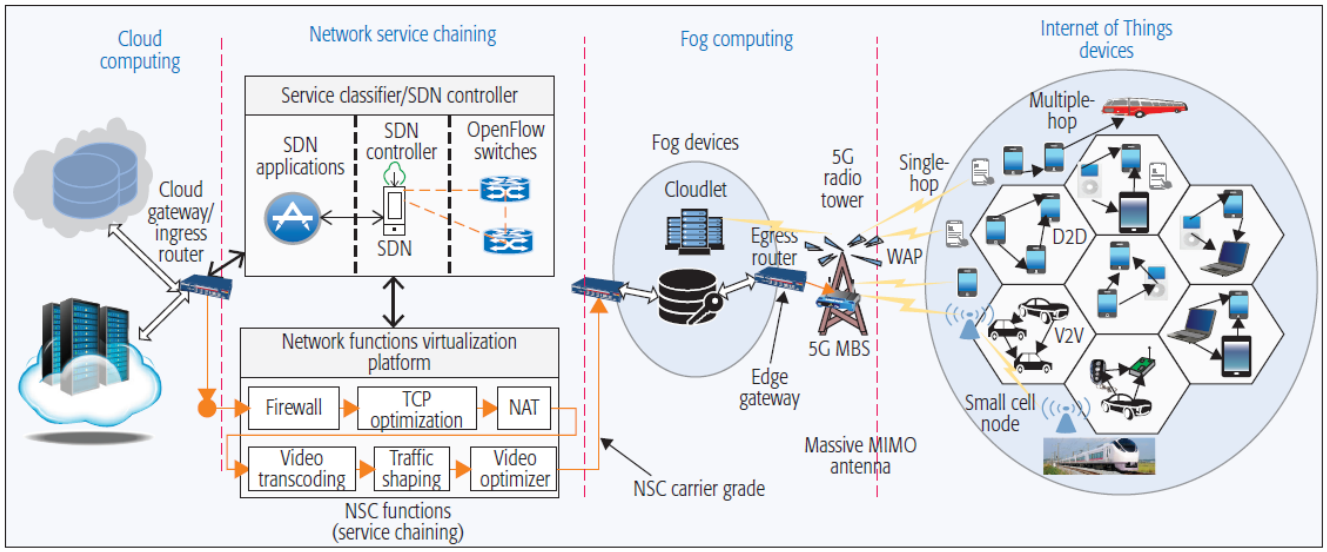
ομίχλης. Επίσης το fog computing έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει μια νέα κατηγορία συγκεντρωτικών υπηρεσιών και εφαρμογών όπως η έξυπνη κατανομή ενέργειας. Στην έξυπνη κατανομή ενέργειας, όλες οι εφαρμογές εξισορρόπησης ενέργειας του φορτίου θα τρέξουν σε συσκευές στην άκρη του δικτύου που θα μεταβαίνουν αυτόματα σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή με βάση την διαθεσιμότητα, τη ζήτηση και τις χαμηλότερες τιμές. Η χρήση της υπολογιστικής ομίχλης μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία της καινοτομίας με καινοτόμους τρόπους περιλαμβάνοντας εφαρμογές αυτό-ίασης, αυτό-οργάνωσης και αυτό-μόρφωσης για βιομηχανικά δικτυακά προϊόντα όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2 Δυνατότητες και Χαρακτηριστικά των Διαδικτύων των Πραγμάτων.

3.3.2 Μοντέλο Αλυσίδας Υπηρεσιών Δικτύου (NSC) στο 5G

Το Μοντέλο Αλυσίδας Υπηρεσιών Δικτύου (Network Service Chaining, NSC) είναι ένα ευέλικτο μοντέλο υπηρεσιών που χρησιμοποιείται στο SDN και NFN για να αυτοματοποιήσει τις εικονικές συσκευές δικτύου αντί για τις χειροκίνητες συνδέσεις. Το NFV έχει την ικανότητα της τμηματοποίησης δικτύου το οποίο επιτρέπει την εικονικοποίηση του φυσικού δικτύου για να δημιουργήσει ένα λογικό δίκτυο το οποίο αποτελείται από στιγμιότυπα συσκευών. Μερικά παραδείγματα των λειτουργιών NFV είναι η ανίχνευση εισβολής και το σύστημα πρόληψης (IDS/IPS), τείχη προστασίας, η μετάφραση διεύθυνσης δικτύου (network address translation, NAT), η επανακωδικοποίηση video (video transcoding), βελτιστοποίηση TCP, TCP διακομιστή μεσολάβησης (proxy) και η εξισορρόπηση φόρτου [132].

Το SDN είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία η οποία βοηθά στην απλοποίηση της σχεδίασης και διαχείρισης δικτύου. Βασίζεται στον προγραμματισμό βάση λογισμικού παρά βάση υλικού, επιτρέποντας έτσι την μετατροπή λογισμικού για την αναβάθμιση των πολιτικών του δικτύου. Το SDN αποτελείται από τα παρακάτω τρία επίπεδα: το επίπεδο δεδομένων (OpenFlow switches), το επίπεδο ελέγχου (SDN Controller), και το επίπεδο εφαρμογής. Όλες οι πολιτικές του δικτύου είναι προγραμματιζόμενες στον SDN Controller και όλες αντικατοπτρίζονται και στο επίπεδο εφαρμογής και στο επίπεδο δεδομένων [133].

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το NSC μοντέλο στο δίκτυο 5G όπου το νέφος και οι κόμβοι ομίχλης (Fog Nodes, FN) ενοποιούνται για να εξυπηρετούν τις IoT συσκευές. Το NSC εκτελεί ροή επεξεργασίας δεδομένων χρησιμοποιώντας το μοντέλο αλυσίδας υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις προσεγγίσεις βάσης SDN. Τα δεδομένα μεταδίδονται από τον πυρήνα των κέντρων δεδομένων (data centers) με την βοήθεια του δρομολογητή εισόδου (ingress router) και της πύλης (gateway) στις τελικές συσκευές. Για την παρακολούθηση της συνολικής κίνησης, ένας SDN Controller λειτουργεί με την πλατφόρμα NFV. Στην παρακάτω εικόνα, η σκούρα πορτοκαλί γραμμή αναπαριστά μια συνεχή αλυσίδα λειτουργιών δικτύου που συνδυάζει μια σειρά από δίκτυα επιπέδου-παρόχου για να αυτοματοποιήσει τις εικονικές λειτουργίες των πόρων του δικτύου και να παρέχει μια υψηλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) στις συσκευές IoT χρησιμοποιώντας ένα δρομολογητή εξόδου (egress router). Ο σκοπός του μοντέλου NSC είναι να μειώσει τις δαπάνες κεφαλαίου (CAPEX) και τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX), ενεργοποιώντας μια γρήγορη ανάκαμψη από βλάβη, και να απλοποιήσει την εγκατάσταση/τροποποίηση των νέων υπηρεσιών στον SDN Controller.



Εικόνα 48. Μοντέλο Αλυσίδας Υπηρεσιών Δικτύου στη 5G Ασύρματη Αρχιτεκτονική

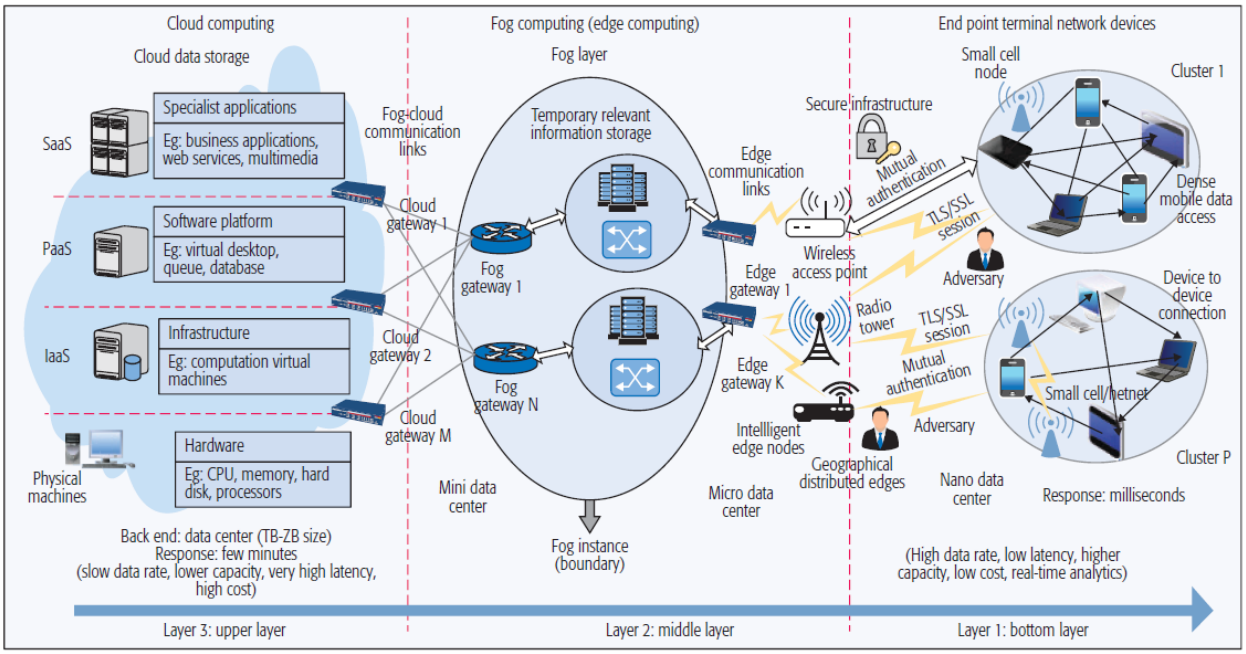
Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το NSC μοντέλο στο 5G, μπορεί να μειωθεί ο φόρτος δεδομένων για να επιτευχθεί η βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) στους τελικούς χρήστες. Η μείωση του φόρτου δεδομένων χρειάζεται όταν υπάρχει έλλειψη εύρους ζώνης, συνεπώς διανέμεται ο φόρτος σε κοντινά δίκτυα. Μια πιθανή λύση για την μείωση του φόρτου είναι η μετάβαση από κυψελοειδείς ζώνες είτε σε Wi-Fi δίκτυο, μικρές κυψέλες, ή σε δίκτυο με ανεκτές τις καθυστερήσεις (delay-tolerant network, DTN) [133]. Επιπρόσθετα της SDN και NFV τεχνολογίας μαζί με το NSC μοντέλο, τα 5G δίκτυα επίσης λειτουργούν σε συνεργασία με διάφορες ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας όπως MIMO και μικρές κυψέλες, για να φιλοξενήσει υψηλά ποσοστά δεδομένων. Το Massive MIMO περιλαμβάνει πολλαπλές συστοιχίες κεραιών συγχωνευμένες σε κάθε σταθμό βάσης για να μεταδίδουν υψηλές ροές δεδομένων ταυτόχρονα [133]. Η τεχνολογία 5G παρέχει τις καλύτερες υπηρεσίες στις IoT συσκευές με την κατευθείαν επικοινωνία μεταξύ οχήματος προς όχημα (vehicle-to-vehicle, V2V) και συσκευής προς συσκευή (device-to-device, D2D) με ένα απλό hop και μονοπάτια multihop. [134].

3.3.2.1 Υπολογιστική Ομίχλης

Για να έχουμε γρήγορο χρόνο απόκρισης όσον αφορά την εξάντληση των πόρων, χρειάζεται αποφόρτωση των υπολογιστικών υπηρεσιών στους κοντινούς πόρους του νέφους. Στο πλαίσιο αυτό, το cloudlet/MEC (Mobile Edge Computing) είναι ένα πρωτότυπο μοντέλο για αποφόρτωση των απομακρυσμένων υπηρεσιών νέφους στις άκρες του δικτύου για την εξυπηρέτηση των κοντινών κινητών συσκευών (π.χ. έξυπνες συσκευές, tablets, wearable smart devices). Το μοντέλο cloudlet λειτουργεί στο επίπεδο LAN μέσω ενός W-FI ή κινητό δίκτυο, και αντιμετωπίζει προβλήματα όπως: κατανάλωση μπαταρίας, καθυστέρηση και το κόστος όταν εκτελούνται εφαρμογές σε κινητές συσκευές. Οι κινητοί χρήστες εξυπηρετούνται από το μοντέλο της υπολογιστικής ομίχλης αποφορτώνοντας τις υπολογιστικές υπηρεσίες με ένα απλό hop ασύρματης πρόσβασης, και έτσι παρέχουν γρήγορο χρόνο απόκρισης όπως απεικονίζεται στην εικόνα 48. Οι υπηρεσίες cloudlet λειτουργούν σε εφαρμογές έξυπνων κινητών, όπως αναγνώριση προσώπου και φωνής, GPS πλοήγηση, και υγειονομική περίθαλψη [134].

3.3.2.2 Αρχιτεκτονική του Επιπέδου Υπολογιστικής Ομίχλης

Η Υπολογιστική Ομίχλης χαρακτηρίζεται από οφέλη όπως η διαλειτουργικότητα, υποστήριξη κινητικότητας, ανοιχτή επικοινωνία, ισχυρή απόδοση, αυτόνομη ασφάλεια, ευκινησία (agility) με σχετικά χαμηλή καθυστέρηση μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου [135]. Με την Υπολογιστική Ομίχλης, η κατανεμημένη υπολογιστική υποδομή όπου φιλοξενούνται οι υπηρεσίες των χρηστών χρησιμοποιείται από τις συσκευές στις άκρες του δικτύου όπως gateways, σημεία πρόσβασης, δρομολογητές και έξυπνοι μεταγωγείς με τις οποίες μεταδίδονται τα δεδομένα, αντί να επικοινωνούν κατευθελιαν σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων. Οι fog συσκευές είναι έξυπνες δικτυακές συσκευές οι οποίες μπορούν να πάρουν έξυπνες αποφάσεις και να αποθηκεύουν δεδομένα για να παρέχουν λειτουργίες υπολογισμών και δρομολόγισης.



Εικόνα 49. Λεπτομερή αρχιτεκτονική συστήματος για την ενοποίηση του cloud, fog και των τελικών τερματικών συστημάτων

Η παραπάνω εικόνα δείχνει το επίπεδο του fog, που αποτελείται από ένα στιγμιότυπο fog (fog instance, FI) και κόμβους fog (fog nodes, FNs). Αυτά είναι τα όρια του fog μεσα στα οποία μόνο σχετικές πληροφορίες εξορύσσονται και αποθηκεύονται προσωρινά. Με την βοήθεια συνδέσεων επικοινωνίας, τα πακέτα μεταφέρονται από τα gateways του cloud στα fog gateways και αντιστρόφως. Οι fog κόμβοι κάνουν τοπική επεξεργασία, υπολογισμούς, αποθηκεύουν και αναλύουν δεδομένα. Η αρχιτεκτονική fog computing υποδιαιρείται σε δυο διαφορετικά συστατικά:

- Fog κόμβοι αφαίρεσης (Fog abstraction nodes) είναι κοντά στο cloud gateway για να παρέχουν ανάλυση, οπτικοποίηση και προστασία
- Το fog επίπεδο ενορχίστρωσης αποτελείται από ένα “foglet”, το οποίο είναι κοντά στις IoT συσκευές για να παίρνει τα αιτήματα των τελικών χρηστών. Αυτό το επίπεδο φροντίζει για την ανοχή σε σφάλματα, την διαχείριση πόρων και ασφάλειας σε σχέση με το μοντέλο ανάπτυξης υπηρεσιών στις άκρες [135].

3.3.2.3 Υπολογιστική Ομίχλης βασισμένη στα 5G Ασύρματα Δίκτυα

Σύμφωνα με το [136], η Υπολογιστική Ομίχλης βασισμένη στο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (Fog-Computing based Radio Access Network, FC-RAN) είναι το πιο δημοφιλές πρότυπο στα 5G ασύρματα δίκτυα για εκχωρήσεις καναλιού, ενέργειας, και αποδοτικότητα φάσματος. Τα πλεονεκτήματα του 5G δικτύου πάνω στις συσκευές άκρων περιγράφονται ως ακολούθως:

- Το 5G υποστηρίζει IoT συσκευές 100 φορές γρηγορότερα σε σύγκριση με το 4G/LTE δίκτυο
- Στο 5G, ο ρυθμός δεδομένων των χρηστών είναι περίπου 10-32 Gb/s σε σύγκριση με το 4G που είναι 100-150 Mb/s, φτάνοντας στην κορυφή του ρυθμού δεδομένων αυξανόμενη σχεδόν 30 φορές
- Στο 4G, μεγάλος χρόνος αναμονής παρουσιάζεται στην υπολογιστική νέφους αλλά χρησιμοποιώντας Fog Nodes σε συσχέτιση με το 5G δίκτυο, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end, E2E) μειώνεται σχεδόν 10 φορές
- Στο 5G, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας στην επικοινωνία D2D αυξάνεται 10 φορές
- Το εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο (γύρω στα 60 GHz) στο 5G σε σύγκριση με το 4G που έχει χαμηλό εύρος ζώνης (10 MHz)

3.4 Διαφορές Κινητής Υπολογιστικής (MEC) και Κινητής Υπολογιστικής Νεφών (MCC)

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων MEC και MCC από πλευράς υπολογιστικού διακομιστή, απόστασης στους τελικούς χρήστες και τυπικής καθυστέρηση, κ.λ.π. Σε σύγκριση με το MCC, το MEC έχει τα πλεονεκτήματα της επίτευξης χαμηλής κατανάλωσης, εξοικονόμησης ενέργειας για τις κινητές συσκευές, υποστήριξη υπολογιστικής βάση περιβάλλοντος (context-aware computing) και βελτίωση της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας για κινητές εφαρμογές.

Πίνακας 6. Σύγκριση των MEC και MCC συστημάτων

	MEC	MCC
Υλικό διακομιστή (Server Hardware)	Κέντρα δεδομένων μικρής κλίμακας με μέτριους πόρους	Κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας (το κάθε ένα περιέχει μεγάλο αριθμό διακομιστών υψηλής-ικανότητας)
Τοποθεσία διακομιστή (Server Location)	Συνύπαρξη ασύρματων gateways, WiFi routers και LTE BSs	Εγκατεστημένο σε ειδικές εγκαταστάσεις, με μέγεθος όσο πολλά γήπεδα ποδοσφαίρου
Ανάπτυξη (Deployment)	Αναπτυγμένο από τηλεπικοινωνιακούς φορείς, πωλητές MEC, επιχειρήσεις και οικιακούς χρήστες. Απαιτεί lightweight ρυθμίσεις και σχεδιασμό	Ανεπτυγμένο από IT εταιρίες, π.χ. Google και Amazon, σε μερικά σημεία σε όλο τον κόσμο. Απαιτεί πολύπλοκες ρυθμίσεις και σχεδιασμό
Απόσταση από τους τελικούς χρήστες	Μικρή (δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα)	Μεγάλη (μπορεί σε ολόκληρες ηπείρους)

(Distance to end users)		
Χρήση του Backhaul (Backhaul usage)	Σπάνια χρήση Μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης	Συχνή χρήση Πιθανό να προκαλέσει συμφόρηση
Διαχείριση συστήματος (System management)	Ιεραρχικός έλεγχος (κεντρικός / κατανεμημένος)	Κεντρικός έλεγχος
Υποστηριζόμενη καθυστέρηση (Supportable latency)	Λιγότερο από δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου	Μεγαλύτερο από 100 χιλιοστά του δευτερολέπτου
Εφαρμογές (Applications)	Εφαρμογές κρίσιμης-καθυστέρησης και υπολογιστικά-χρονοβόρες π.χ. AR, αυτόματη οδήγηση, διαδραστικό online gaming	Εφαρμογές ανθεκτικές στη καθυστέρηση και υπολογιστικά-χρονοβόρες π.χ. online social networking και mobile commerce/health/learning

Τα παρακάτω πλεονεκτήματα περιγράφονται εν συντομία μέσω μερικών παραδειγμάτων και εφαρμογών και είναι τα εξής [100]:

3.4.1.1 Χαμηλή καθυστέρηση

Η καθυστέρηση για μια υπηρεσία κινητής είναι το συνάθροισμα των τριών μερών: διάδοση, καθυστέρηση υπολογιστική και επικοινωνίας, ανάλογα με την απόσταση διάδοσης, υπολογιστική χωρητικότητα, και ρυθμός δεδομένων, αντίστοιχα. Αρχικά, οι αποστάσεις πληροφοριών και διάδοσης για το MEC είναι τυπικά δεκάδες μέτρα για τις περιπτώσεις των πυκνών μικρών-κυψελών δικτύων ή μεταδόσεις από συσκευή προς συσκευή (D2D), και τυπικά όχι παραπάνω από 1km σε γενικές περιπτώσεις. Σε αντίθεση, το Cloud Computing απαιτεί μεταδώσεις από τους τελικούς χρήστες στους κόμβους στα δίκτυα κορμού ή κέντρα δεδομένων με αποστάσεις που κυμαίνονται από δέκα χιλιόμετρα μέχρι ολόκληρες ηπείρους. Αυτό οδηγεί σε πολύ μικρότερη καθυστέρηση (low latency) στο MEC από αυτή στο MCC. Δεύτερον, το MCC απαιτεί την πληροφορία να περάσει από πολλά δίκτυα συμπεριλαμβανομένου δίκτυα ραδιοπρόσβασης, backhaul δίκτυο και το Διαδίκτυο, όπου ο έλεγχος της κυκλοφορίας, η δρομολόγηση και άλλες λειτουργίες διαχείρισης δικτύου να συμμετέχουν σε υπερβολική καθυστέρηση. Με την επικοινωνία περιορισμένη στις άκρες του δικτύου, το MEC δεν έχει τέτοια θέματα. Τέλος, για την υπολογιστική καθυστέρηση, το νέφος έχει μια τεράστια δύναμη υπολογισμού η οποία είναι μερικές τάξεις μεγέθους υψηλότερη από αυτή μιας edge συσκευής (π.χ. ενός σταθμού βάσης BS). Ωστόσο το νέφος πρέπει να διαμοιράζεται από μεγάλο αριθμό από χρήστες από ότι μια edge συσκευή μειώνοντας το κενό τους στην καθυστέρηση υπολογισμού. Επιπλέον, ένα μοντέρνο BS είναι αρκετά ισχυρό για να τρέχει εξαιρετικά εξελιγμένα υπολογιστικά προγράμματα. Για παράδειγμα, το edge cloud σε ένα σταθμό βάσης έχει 102-104 φορές υψηλότερη υπολογιστική ικανότητα από την ελάχιστη απαίτηση (π.χ. ένα CPU με 3.3GHz, 8GB RAM, 70GB αποθηκευτικό χώρο) για να τρέξει το Call-of-Duty, ένα δημοφιλές παιχνίδι σκοπευτή. Γενικά πειράματα έχουν δείξει ότι η συνολική καθυστέρηση για το MCC είναι στο εύρος 30-100ms [137]. Αυτό είναι αποδεκτό για πολλές εφαρμογές κρίσιμες-καθυστέρησης όπως ένα online gaming σε πραγματικό χρόνο, εικονικά αθλήματα και αυτόνομη κίνηση, τα οποία μπορεί να απαιτούν απτή ταχύτητα με καθυστέρηση κατά προσέγγιση 1ms [138]. Σε αντίθεση με την μικρές αποστάσεις διάδοσης και απλά πρωτόκολλα, το MEC έχει την δυνατότητα να υλοποιεί την καθυστέρηση απτού-επιπέδου για 5G εφαρμογές κρίσιμες καθυστέρησης.

3.4.1.2 Κινητή εξοικονόμηση ενέργειας

Λόγω του μικρού μεγέθους τους, οι IoT συσκευές έχουν περιορισμένη ενεργειακή αποθήκευση αλλά αναμένεται να συνεργάζονται και να εκτελούν προηγμένες διεργασίες όπως επιτήρηση, ανίχνευση πλήθους (crowd-sensing) και παρακολούθησης υγείας [139]. Ενεργοποιώντας δεκάδες δισεκατομμύρια IoT συσκευών παραμένει μια βασική πρόκληση για το σχεδιασμό IoT δεδομένου ότι η συχνότερη επαναφόρτιση μπαταρίας / αντικατάσταση είναι μη πρακτική αν όχι αδύνατη. Υποστηρίζοντας την αποφόρτηση υπολογιστικής, το MEC ξεχωρίζει ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την παράταση της ζωής της μπαταρίας για τις IoT συσκευές. Ειδικά, διεργασίες υπολογιστικά-εντατικές μπορούν να αποφορτωθούν από τις IoT συσκευές προς τις edge συσκευές έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειά τους. Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας (energy saving) από αποφόρτωση υπολογιστικής έχουν αποδειχθεί σε πειράματα, π.χ. η ολοκλήρωση μέχρι 44-φορές μεγαλύτερου υπολογιστικού φόρτου για μια πολυμεσική εφαρμογή eyeDentify [140] ή η αύξηση της ζωής της μπαταρίας από 30-50% για διαφορετικές εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας [141]

3.4.1.3 Ευαισθησία περιβάλλοντος

Άλλο ένα βασικό χαρακτηριστικό το οποίο διαφοροποιεί το MEC από το MCC είναι η ικανότητα του MEC εξυπηρετητή να αξιοποιεί την εγγύτητα των edge συσκευών στους τελικούς χρήστες για να ιχνηλατεί τις πληροφορίες τους σε πραγματικό χρόνο, τις τοποθεσίες και τα περιβάλλοντα. Συμπέρασμα βάση αυτή της πληροφορίας επιτρέπει να παραδίδονται στους τελικούς χρήστες σχετικές υπηρεσίες (context-aware services) [142], [143]. Για παράδειγμα, ο οδηγός βίντεο ενός μουσείου, που είναι μια εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας, μπορεί να προβλέψει τα ενδιαφέροντα των χρηστών βάση της θέσης τους μέσα στο μουσείο για να μεταδώσει αυτόματα περιεχόμενα σχετικά π.χ. έργα τέχνης και αντίκες [144]. Άλλο παράδειγμα είναι το CTrack σύστημα που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης για να ιχνηλατήσει και να προβλέψει τις πορείες μεγάλου αριθμού χρηστών με σκοπό την κυκλοφοριακή παρακολούθηση, πλοήγηση, δρομολόγηση και τη διαχείριση εξατομικευμένου ταξιδιού [145]

3.4.1.4 Προστασία προσωπικών δεδομένων / ασφάλειας

Η δυνατότητα βελτίωσης της προστασίας της ιδιωτικής ζωής και της ασφάλειας (privacy / security enhancement) των κινητών εφαρμογών είναι επίσης ένα ελκυστικό πλεονέκτημα του MEC σε σύγκριση με το MCC. Στα MCC συστήματα, οι πλατφόρμες Cloud Computing είναι απομακρυσμένα δημόσια μεγάλα κέντρα δεδομένων, όπως το Amazon EC2 και το Microsoft Azure, τα οποία είναι ευπαθή σε επιθέσεις εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης πληροφοριών των χρηστών. Επιπλέον η ιδιοκτησία και η διαχείριση των δεδομένων των χρηστών είναι χωριστά στο MCC, το οποίο μπορεί να προκαλέσει θέματα διαρροής ιδιωτικών δεδομένων και απώλεια δεδομένων [146]. Η χρήση διακομιστών κοντά στις άκρες παρέχει μια υποσχόμενη λύση για την καταστρατήγηση αυτών των προβλημάτων. Από την μια πλευρά, εξαιτίας της κατανεμημένης ανάπτυξης, της μικρής κλίμακας, και της μικρότερης συγκέντρωσης πολύτιμων πληροφοριών, οι MEC εξυπηρετητές είναι πολύ λιγότερο πιθανό να γίνουν στόχος επίθεσης. Δεύτερον, πολλοί MEC εξυπηρετητές μπορούν να έχουν ιδιόκτητα cloudlets, τα οποία θα διευκολύνουν την ροή πληροφοριών. Εφαρμογές που απαιτούν ευαίσθητες πληροφορίες συναλλαγής μεταξύ των τελικών χρηστών και των εξυπηρετητών θα επωφεληθούν από το MEC. Για παράδειγμα, η επιχειρηματική ανάπτυξη του MEC μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή της μεταφόρτωσης

περιορισμένων δεδομένων και υλικού στο απομακρυσμένο κέντρο δεδομένων, όπως διαχειρίζεται ο ίδιος ο διαχειριστής της επιχείρησης την εξουσιοδότηση, έλεγχο πρόσβασης και ταξινομεί διαφορετικά επίπεδα παροχής υπηρεσιών χωρίς την χρήση εξωτερικής μονάδας [147].

3.5 Διαφορές Υπολογιστικής Νέφους και Υπολογιστική Ομίχλης

Η έννοια της Υπολογιστικής Ομίχλης (Fog Computing) είναι παρόμοια αυτή της Υπολογιστικής Νέφους (Cloud Computing). Αλλά λαμβάνοντας υπ' όψη μερικές παραμέτρους φαίνεται η διαφορά μεταξύ των δυο αυτών στενών εννοιών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικά του Cloud Computing και του Fog Computing [125], [148]:

Πίνακας 7. Συγκριτική ανάλυση του Cloud Computing και του Fog Computing

Χαρακτηριστικά	Cloud Computing	Fog Computing
Θέσεις κόμβων διακομιστών (Location of servers)	Εντός του Διαδικτύου	Στα άκρα του τοπικού δικτύου
Απόσταση μεταξύ Client και Server (Distance between client and server)	Πολλαπλά βήματα	Ένα/Μερικά βήματα
Καθυστέρηση (Latency)	Υψηλή	Χαμηλή
Καθυστέρηση Jitter	Υψηλή	Πολύ Χαμηλή
Ασφάλεια (Security)	Αδυναμία ελέγχου τοπικά	Τοπικά Ελέγξιμο
Γνώση Τοποθεσίας (Location awareness)	Όχι	Ναι
Ευαισθησία (Vulnerability)	Μεγαλύτερη πιθανότητα	Μικρότερη πιθανότητα
Γεωγραφική Κατανομή (Geographical distribution)	Συγκεντρωτικά	Πυκνά και Κατανεμημένα
Αριθμός κόμβων διακομιστών (Number of server nodes)	Λίγοι	Μεγάλος
Αλληλεπιδράσεις πραγματικού χρόνου (Real time interactions)	Δεν υποστηρίζεται πλήρως	Υποστηρίζεται
Συνδεσιμότητα στα άκρα του δικτύου (kind of last mile connectivity)	Ενσύρματα/Ασύρματα	Κυρίως Ασύρματα
Κινητικότητα (Mobility)	Περιορισμένη υποστήριξη	Υποστηρίζεται
Έλεγχος (Control)	Πλήρης	Μερικός
Πρόσβαση Υπηρεσιών (Service access)	Μέσω του δικτύου κορμού	Στα άκρα σε φορητή συσκευή
Διαθεσιμότητα (Availability)	99,99%	Εξαιρετικά Ευμετάβλητη
Αριθμός Χρηστών/συσκευών (# of users/devices)	Δεκάδες/Εκατοντάδες εκατομμύρια	Δεκάδες Δισεκατομμύρια
Τιμή ανά διακομιστή (price per server device)	$ 1500 – 3000	$ 50 – 200
Παραγωγή Δεδομένων (Main content generation)	Άνθρωπος	Συσκευές

Αφετηρία Γέννησης Δεδομένων (Content generation)	Κεντρική Τοποθεσία	Οπουδήποτε
Κατανάλωση περιεχομένου (Content consumption)	Τερματικές Συσκευές	Οπουδήποτε
Λογισμικό Εικονικής υποδομής (Software virtual infrastructure)	Κεντρικοί Εταιρικοί Διακομιστές	Συσκευές των χρηστών

3.6 Διαφορές Υπολογιστικής Ομίχλης και Κινητής Υπολογιστικής

Η Υπολογιστική Ομίχλης (Fog Computing) και η Κινητή Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (Mobile Edge Computing) είναι δυο όροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, αλλά υπάρχουν ορισμένες βασικές διαφορές οι οποίες είναι οι εξής [149]:

- **Απλή-μίσθωση έναντι πολλαπλής-μίσθωσης (Single-tenant vs multi-tenant)**: Ενώ η υπολογιστική ομίχλης είναι απλής-μίσθωσης, το σύνολο των συσκευών ανήκουν σε ιδιοκτησία μιας εταιρίας, η κινητή υπολογιστική στα άκρα του δικτύου είναι μια εφαρμογή πολλαπλής-μίσθωσης και δίνει προτεραιότητα σε πολλαπλούς φορείς.
- Η υπολογιστική ομίχλης παρατηρείται συνήθως σε συσκευές πύλης με υπολογιστικές και αποθηκευτικές ικανότητες, από τους προμηθευτές συμπεριλαμβανομένου της Intel, HPE και Dell. Σε αντίθεση, η κινητή υπολογιστική στα άκρα του δικτύου εστιάζει σε εξωτερικές εφαρμογές όπως έλεγχος κίνησης των αυτόνομων οχημάτων και τη δημόσια ασφάλεια. Έχουν αναπτυχθεί πολλές περιπτώσεις χρήσης για το MEC, οι οποίες κυμαίνονται από αυτόνομη λειτουργία οχημάτων, προηγμένη ρομποτική μέχρι και επαυξημένη πραγματικότητα
- **Το σημείο στο οποίο γίνεται η επεξεργασία δεδομένων (The point at which data is processed)**: Και η ομίχλη και η άκρη (edge) προβλέπουν κατανεμημένη ανάλυση πλησίον του τόπου προέλευσης των δεδομένων, μειώνοντας την καθυστέρηση στην μετάδοση των IoT δεδομένων στο Cloud. Ωστόσο, ενώ η ομίχλη επεξεργάζεται τα δεδομένα πιο κοντά στα τοπικά δίκτυα, το MEC ωθεί αυτό ακόμα πιο κοντά στην πηγή
- **Προσέγγιση στη συνδεσιμότητα (Approach to connectivity)**: Η υπολογιστική ομίχλης συνδυάζει τις λειτουργίες συνδεσιμότητας, ενώ η κινητή υπολογιστική στα άκρα του δικτύου ευνοεί κάθε στοιχείο να λειτουργεί ανεξάρτητα. Τελικά, ο αριθμός των αιτήσεων που εμπίπτουν στο IoT είναι τόσο τεράστιος που θα απαιτηθούν τόσο η υπολογιστική ομίχλης όσο και η κινητή υπολογιστική στα άκρα του δικτύου. Οι απαιτήσεις καθυστέρησης των βιομηχανικών εφαρμογών καθώς επίσης η ασφάλεια πληροφοριών και η εταιρική πολιτική θα χρειαστεί και τα δυο να δουλέψουν μαζί για να είναι πλήρως επιτυχημένα

4. INTERNET OF THINGS

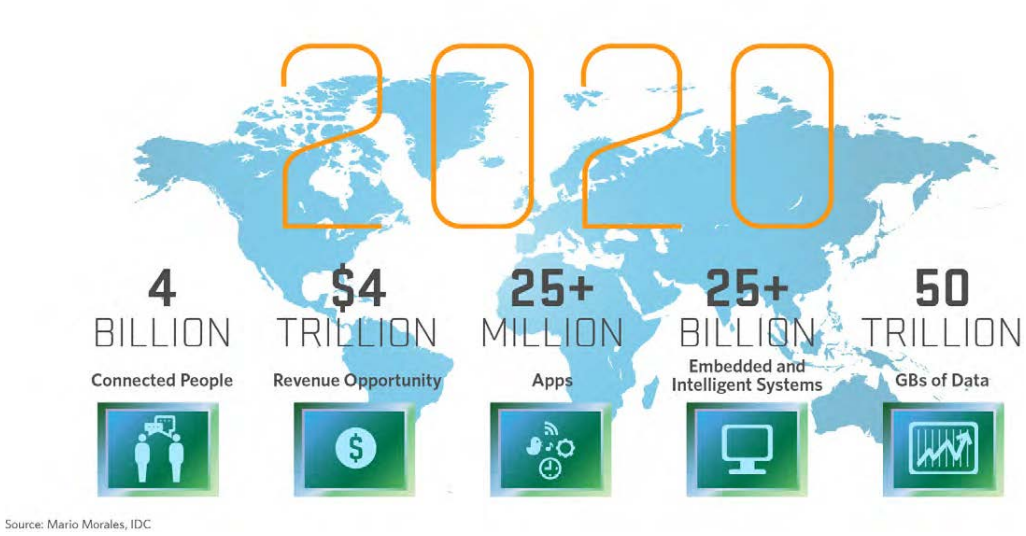
4.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) είναι ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων που περιέχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, λογισμικά, αισθητήρες και έχουν την ικανότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο το οποίο τους επιτρέπει να επικοινωνούν και να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες και πραγματοποιώντας διάφορες ενέργειες. Το IoT δίνει την δυνατότητα στα αντικείμενα αυτά να ελέγχονται απομακρυσμένα μέσω της υπάρχουσας δικτυακής υποδομής ενσωματώνοντας έτσι το φυσικό κόσμο με τα υπολογιστικά συστήματα αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια αλλά μειώνοντας παράλληλα και το κόστος. Ακόμα το IoT εξοπλίζεται με αισθητήρες που αποτελεί μέρος των έξυπνων συστημάτων όπως έξυπνα σπίτια, οχήματα και πόλεις. Κάθε ένα από αυτά τα αντικείμενα αναγνωρίζεται μοναδικά από το ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα και μπορεί να λειτουργήσει και αυτόνομα αλλά και σε συνδυασμό με την υπόλοιπη δικτυακή υποδομή.

Επειδή το Fog Computing επεκτείνει το Cloud Computing πρότυπο στις άκρες του δικτύου, δημιουργεί έτσι μια νέα γενιά εφαρμογών και υπηρεσιών. Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα χαρακτηριστικά του Fog Computing είναι τα εξής: χαμηλή καθυστέρηση και γνώση της τοποθεσίας, ευρεία γεωγραφική κατανομή, κινητικότητα, πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων, κυρίαρχος ρόλος της ασύρματης πρόσβασης, ισχυρή παρουσία ροής, εφαρμογές πραγματικού κόσμου και τέλος ανομοιογένεια. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν το Fog Computing να είναι η πιο κατάλληλη πλατφόρμα για ένα μεγάλο αριθμό από κρίσιμων υπηρεσιών και εφαρμογών του Internet of Things όπως: Συνδεδεμένα Οχήματα (Connected Vehicle), Έξυπνο δίκτυο (Smart Grid), Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities) και γενικά, Ασύρματοι Αισθητήρες και Δίκτυα Ενεργοποιητών (Wireless Sensors and Actuators Networks, WSANs) [123].

Ο όρος Internet of Things εισήχθη από τον Kevin Ashton το 1999. Το πεδίο του IoT έγινε γνωστό από το Auto-ID center του MIT αλλά και από σχετικές δημοσιεύσεις ανάλυσης αγοράς. Η ταυτοποίηση ραδιοσυχνοτήτων (RFID) θεωρήθηκε ως προϋπόθεση για το Internet of Things όπου αν όλα τα αντικείμενα ήταν εξοπλισμένα στην καθημερινότητα με αναγνωριστικά, θα μπορούσαν να διαχειρίζονται από υπολογιστές. Εκτός από το RFID, η σήμανση των αντικειμένων θα μπορούσε να γίνει και μέσα από τεχνολογίες όπως κοντινού τύπου επικοινωνίας, κώδικες QR, barcodes και ψηφιακή υδατογράφηση.

Στις μέρες μας ο όρος Internet of Things χρησιμοποιείται για να δηλώσει την προηγμένη συνδεσιμότητα συσκευών, συστημάτων και υπηρεσιών πέρα από την τεχνολογία Machine To Machine (M2M) επικοινωνία αφού καλύπτει μια ποικιλία πρωτοκόλλων και εφαρμογών. Βάση του Gartner, θα υπάρχουν σχεδόν 26 δισεκατομμύρια συσκευές στο Internet of Things μέχρι το 2020 και πάνω από 30 δισεκατομμύρια συσκευές θα συνδέονται ασύρματα από το IoT μέχρι το 2020 [150].



Εικόνα 50. Πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών στο IoT μέχρι το 2020

Η Cisco για να παρακολουθεί τον εκτιμώμενο αριθμό συνδεδεμένων αντικειμένων από τον Ιούλιου του 2013 μέχρι τον Ιούλιο του 2020, δημιούργησε ένα μετρητή συνδέσεων. Το γεγονός ότι οι συσκευές συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω ραδιοσημάτων χαμηλής ισχύος αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να χρησιμοποιούν Wi-Fi ή Bluetooth. Επίσης διερευνάται η μείωση του κόστους και ενέργειας στα πλαίσια των Chirp Networks. Ποιο συγκεκριμένα είναι υπό διερεύνηση η ιδέα που όλες οι συσκευές να χρησιμοποιούν μια IP διεύθυνση για μοναδικό αναγνωριστικό [151].

Αδιαμφισβήτητα το Internet of Things φαίνεται να είναι η επόμενη εξέλιξη του Διαδικτύου και η διασύνδεση των πραγμάτων και των ενσωματωμένων υπολογιστών θα έχει ευεργετικά αποτελέσματα που θα έχουν αντίκτυπο στην εκπαίδευση, την επικοινωνία, τις επιχειρήσεις, την επιστήμη αλλά και σε όλη την ανθρωπότητα.

4.1.1 Χαρακτηριστικά του IoT

Για την γεφύρωση του χάσματος μεταξύ εικονικού κόσμου και φυσικού, έρχονται σε συνεργασία διάφορες τεχνολογίες και συμπληρωματικές τεχνικές εξέλιξης, οι οποίες παρέχουν τις παρακάτω δυνατότητες:

- Τα αντικείμενα μπορούν να δικτυώνονται με τους πόρους του διαδικτύου ή το ένα με το άλλο κάνοντας χρήση δεδομένων και υπηρεσιών και να ενημερώνουν την κατάστασή τους. Οι ασύρματες τεχνολογίες όπως το GSM, UMTS, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee και διάφορα άλλα πρότυπα που είναι υπό ανάπτυξη καθώς επίσης και τα προσωπικά ασύρματα δίκτυα (WPANs) παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για την επίτευξη της επικοινωνίας.
- Τα αντικείμενα έχουν την δυνατότητα να διευθυνσιοδοτούνται και να επιβεβαιώνονται ή να ρυθμίζονται εξ' αποστάσεως.
- Τα αντικείμενα μπορούν να ταυτοποιηθούν μέσω των τεχνολογιών RFID, NFC (Near Field Communication) και Bar Code (οπτικά αναγνώσιμοι κώδικες). Η αναγνώριση μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός διαμεσολαβητή που μπορεί να είναι μια συσκευή αναγνώρισης RFID ή ένα κινητό τηλέφωνο. Η ταυτοποίηση οδηγεί στην αναγνώριση αντικειμένων παρέχοντας πληροφορίες που

σχετίζονται με το ίδιο και οι οποίες μπορούν ν' ανακτηθούν από ένα διακομιστή του δικτύου.

- Τα αντικείμενα έχουν αισθητήρες όπου μπορούν να συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον τους αλληλοεπιδρώντας άμεσα με αυτό.
- Τα αντικείμενα είναι εξοπλισμένα με ενεργοποιητές για να μπορούν να διαχειρίζονται το περιβάλλον τους. Αυτοί οι ενεργοποιητές μέσω του δικτύου μπορούν να διαχειριστούν διεργασίες στον πραγματικό κόσμο.
- Τα έξυπνα αντικείμενα είναι εξοπλισμένα μ' ένα επεξεργαστή καθώς επίσης έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν δεδομένα. Αυτά τα αντικείμενα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία και παροχή πληροφοριών που μπορεί να προέρχονται από αισθητήρες ή ακόμα μπορούν να παρέχουν και ένα είδους μνήμη σε προϊόντα δείχνοντας την χρήση τους.
- Τα έξυπνα αντικείμενα μπορούν να γνωρίζουν την φυσική τους θέση μέσω της χρήσης του GPS ή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας καθώς επίσης μπορούν να εντοπίζονται μέσω αυτών. Επίσης οι τεχνολογίες όπως ραδιοφάροι (όπως για παράδειγμα γειτονικοί WLAN σταθμοί βάσης ή RFID readers με καθορισμένες συντεταγμένες) ή οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό της θέσης των έξυπνων αντικειμένων.
- Τα έξυπνα αντικείμενα μπορούν να αλληλοεπιδρούν με τους ανθρώπους είτε έμμεσα είτε άμεσα (π.χ μέσω ενός έξυπνου κινητού). Μερικά καινοτόμα παραδείγματα είναι ευέλικτες πολυμερείς βάσεις εικόνας και φωνής, μέθοδοι αναγνώρισης χειρονομιών.
- Οι περισσότερες εφαρμογές κάνουν χρήση ενός μόνο υποσυνόλου των παραπάνω δυνατοτήτων γιατί στο να εφαρμοστούν στο σύνολό τους έχει πολύ κόστος και μεγάλη τεχνική συνεισφορά.

Εικόνα 51. Σχηματική αναπαράσταση του IoT

4.2 Δυνατότητες και Χαρακτηριστικά των Διαδικτύων των Πράγματων

Το IoT θα αυξήσει εκθετικά την κλίμακα και την πολυπλοκότητα των σημερινών συστημάτων πληροφορικής και επικοινωνιών. Επομένως η Αυτονομία είναι επιτακτική ανάγκη για τα IoT συστήματα.

Η αυτονομία των IoT είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που θα επιτρέπει στα συστήματα να αυτό-διαχειρίζονται την πολυπλοκότητα των στόχων και των διαφόρων πολιτικών που ορίζονται από τον άνθρωπο. Στόχος είναι το σύστημα να παρέχει τις ιδιότητες: προσαρμογή, οργάνωση, βελτιστοποίηση, διαμόρφωση, προστασία, θεραπεία, ανακάλυψη, περιγραφή κ.λ.π [152].

4.2.1 Αυτό-προσαρμογή

Εικόνα 52. Αυτό-προσαρμογή στο IoT

Η αυτό-προσαρμογή (self-adaptation), από το φυσικό μέχρι το επίπεδο εφαρμογών, αποτελεί την βασική ιδιότητα που επιτρέπει την επικοινωνία των κόμβων, τη χρησιμοποίηση των υπηρεσιών ώστε να υπάρχει μια άμεση αντίδραση του IoT στο διαρκώς μεταβαλλόμενο πλαίσιο βάση των πολιτικών επιχείρησης ή των στόχων που ορίζονται από τον άνθρωπο.

Για να μπορεί να υποστηριχθεί η αυτό-προσαρμογή στο IoT, κύριοι παράγοντες είναι τα πρωτόκολλα οργάνωσης δικτύου, η αυτόματη ανακάλυψη υπηρεσιών και οι δεσμοί σε επίπεδο εφαρμογών. Έτσι τα συστήματα IoT μπορούν να δώσουν αυτό-προσαρμοζόμενες αποφάσεις.

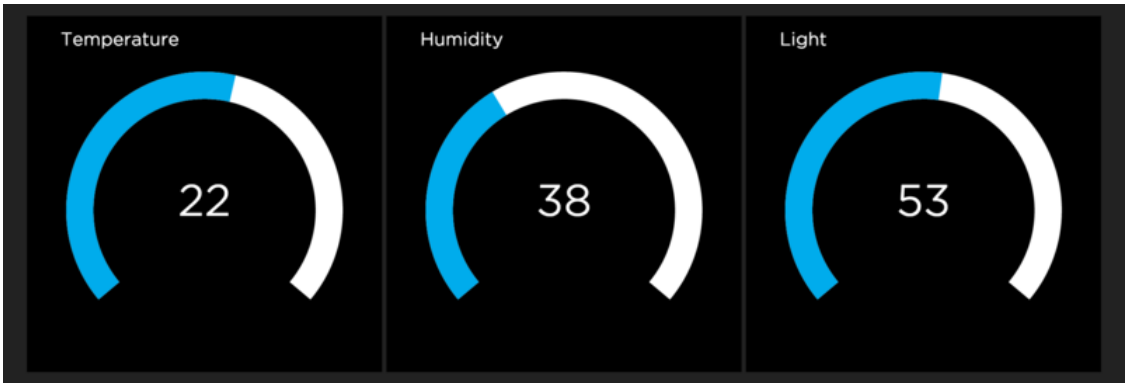
4.2.2 Αυτό-οργάνωση

Εικόνα 53. Αυτό-οργάνωση στο IoT

Στο IoT είναι απολύτως φυσιολογικό να υπάρχουν κόμβοι που να συνδέονται και να αποσυνδέονται στο δίκτυο αυθόρμητα. Σε αυτή τη περίπτωση το δίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να αναδιοργανώνεται. Η αυτό-οργάνωση (self-organization) γι' αυτό το σκοπό παρέχει ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία έχουν μεγάλο αντίκτυπο στις IoT εφαρμογές εξασφαλίζοντας την αδιάκοπη ανταλλαγή δεδομένων σε όλα τα ετερογενή δίκτυα.

Επίσης εξετάζονται λύσεις ομαδοποίησης χωρίς την χρήση ενός κεντρικού σημείου ελέγχου, λόγω του μεγάλου αριθμού των κόμβων. Επομένως για να μεγιστοποιήσουμε τη διάρκεια ζωής και την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας του IoT συστήματος είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει εστίαση στην κατανάλωση ενέργειας των κόμβων.

4.2.3 Αυτό-βελτίωση



Εικόνα 54. Αυτό-βελτίωση στο IoT

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μεγάλη διάρκεια ζωής και γενικά η ανάπτυξη του IoT συστήματος είναι απαραίτητο να γίνεται στις συσκευές βέλτιστη χρήση των πόρων όπως: της μνήμης, το εύρος ζώνης, της επεξεργασίας και της ισχύς.

Έτσι το σύστημα, στα πλαίσια της αυτό-βελτίωσης (self-optimization), θα πρέπει να κάνει από μόνο του τις απαραίτητες ενέργειες προκειμένου να επιτύχει τους στόχους της εξοικονόμησης ενέργειας σε συνδυασμό με τις υψηλές επιδόσεις και την ποιότητα των υπηρεσιών.

4.2.4 Αυτό-ρύθμιση

Εικόνα 55. Αυτό-ρύθμιση στο IoT

Επειδή τα IoT συστήματα αποτελούνται από πάρα πολλούς κόμβους και συσκευές όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές, η διαμόρφωση και η ρύθμιση του όλου συστήματος είναι περίπλοκη και πολύ δύσκολη να πραγματοποιηθεί από ανθρώπινο παράγοντα. Έτσι το ίδιο το IoT σύστημα θα πρέπει να παρέχει διαμόρφωση απομακρυσμένων εγκαταστάσεων ώστε να μπορούν να διαμορφώνονται αυτόματα παράμετροι βάση των αναγκών των εφαρμογών και των χρηστών έχοντας λάβει τα αντίστοιχα μηνύματα αυτοδιαχείρισης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως αυτό-ρύθμιση (self-configuration)

Αυτό είναι εφικτό να γίνει μέσα από ρυθμίσεις συσκευής και του δικτύου με παραμέτρους για εγκατάσταση, απεγκατάσταση, αναβάθμιση λογισμικού ή ακόμα και από παραμέτρους απόδοσης.

4.2.5 Αυτό-προστασία

Εικόνα 56. Αυτό-προστασία στο IoT

Το IoT θα πρέπει να είναι σε θέση να προστατεύεται αυτόματα, αυτό-προστασία (self-protection), από διάφορες κακόβουλες επιθέσεις που στόχο θα έχουν τον έλεγχο των φυσικών στοιχείων του περιβάλλοντος (επειδή το IoT είναι στενά συνδεδεμένο με τον φυσικό κόσμο) ή την απόκτηση προσωπικών δεδομένων.

Η αυτό-προστασία θα πρέπει να είναι σε τέτοιο επίπεδο ώστε να προστατεύει διαφορετικά επίπεδα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής, χωρίς όμως να είναι εις βάρος της ποιότητας των υπηρεσιών και των δυνατοτήτων του.

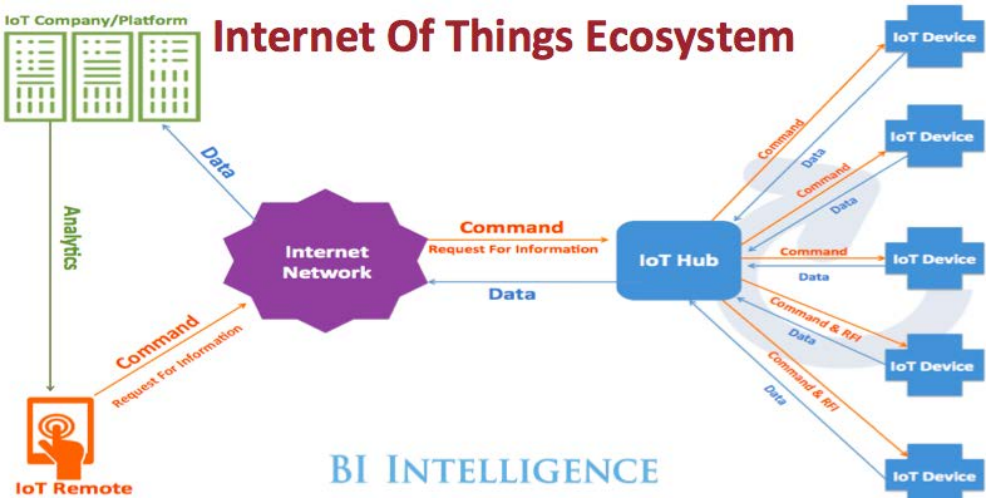
4.2.6 Αυτό-ίαση

Εικόνα 57. Αυτό-ίαση στο IoT

Η αυτό-ίαση (self-healing) στο IoT σύστημα έχει ως στόχο την άμεση ανίχνευση και διάγνωση τυχών προβλημάτων καθώς και άμεση επίλυση και διόρθωσή τους με αυτόνομο τρόπο. Τα IoT συστήματα πρέπει να παρακολουθούν διαρκώς την κατάσταση των διαφόρων κόμβων και κάθε φορά που παρατηρούν διαφορετική συμπεριφορά από την αναμενόμενη, να τα εντοπίζουν και να εκτελούν τις κατάλληλες ενέργειες για να επαναφέρεται η συμπεριφορά στην αρχική κατάσταση διορθώνοντας έτσι τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα διορθωτικής κίνησης μπορεί να είναι η εγκατάσταση μιας νέας ενημέρωσης λογισμικού ή η εγκατάσταση ενός patch που θα διορθώνει κάποιο bug της εφαρμογής.

4.2.7 Αυτό-περιγραφή



Εικόνα 58. Αυτό-περιγραφή στο IoT

Σ' ένα IoT σύστημα, τα πράγματα και οι διάφοροι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές πρέπει για την επίτευξη της επικοινωνίας με άλλα αντικείμενα και την αλληλεπίδραση μαζί τους να μπορούν να περιγράψουν με εκφραστικό τρόπο τα χαρακτηριστικά και τις ικανότητές τους.

Οι γλώσσες περιγραφής θα πρέπει να εξειδικευτούν και να προσαρμοστούν σε σημασιολογικό επίπεδο προκειμένου να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ της εκφραστικότητας, του μεγέθους της περιγραφής ακόμα και της συνέπειας. Επομένως η αυτό-περιγραφή (self-description) είναι πολύ σημαντική και θεμελιώδης ιδιότητα για την επικοινωνία και την αλληλεπίδραση μεταξύ των συσκευών και των πόρων.

4.2.8 Αυτό-ανακάλυψη

Η αυτό-ανακάλυψη (self-discovery) σε συνδυασμό με την αυτό-περιγραφή παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του IoT συστήματος. Αυτό γιατί οι διάφορες IoT συσκευές και υπηρεσίες πρέπει να ανακαλύπτονται δυναμικά και η χρήση τους από άλλες συσκευές πρέπει να γίνεται με διαφάνεια. Για να είναι ένα σύστημα πλήρως δυναμικό θα πρέπει να απαρτίζεται από ισχυρές συσκευές και υπηρεσίες καθώς επίσης να έχει διάφορα πρωτόκολλα ανακάλυψης υπηρεσιών και περιγραφών.

4.2.9 Αυτό-προμήθεια ενέργειας

Εικόνα 59. Αυτό-προμήθεια ενέργειας στο IoT

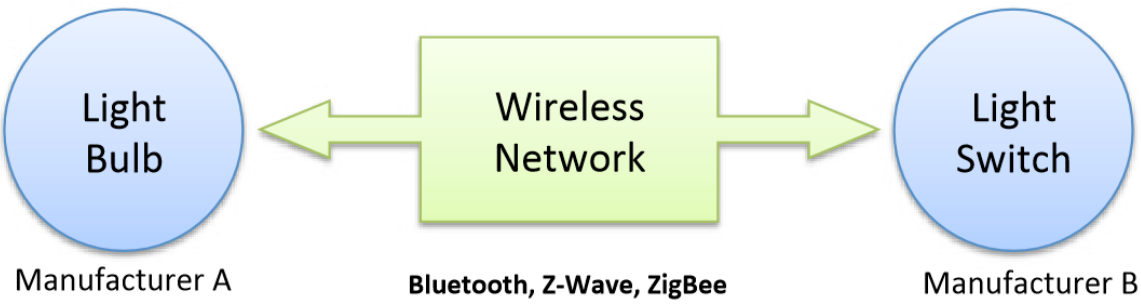
Ακόμα ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για τα συστήματα IoT είναι η αυτό-προμήθεια ενέργειας (self-energy-supplying). Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος θα πρέπει να γίνεται μέσα από τεχνικές συλλογής ενέργειας όπως ηλιακά πάνελ, θερμικά κ.λ.π σε αντίθεση με τις μπαταρίες που αφ' ενός πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά και αφ' ετέρου έχουν αρνητική επίδραση στο περιβάλλον.

4.3 Μοντέλα Επικοινωνίας

Το Μάρτιο του 2015, το Συμβούλιο Αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου (Internet Architecture Board, IAB) κυκλοφόρησε ένα κατευθυντήριο έγγραφο αρχιτεκτονικής για τη δικτύωση των έξυπνων αντικειμένων που περιγράφει ένα πλαίσιο τεσσάρων κοινών μοντέλων επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από συσκευές IoT. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου ξεχωριστά [153].

4.3.1 Μοντέλο Device-to-Device

Το μοντέλο επικοινωνίας Device-to-Device αντιπροσωπεύει δυο ή περισσότερες συσκευές που συνδέονται άμεσα και επικοινωνούν μεταξύ τους, χωρίς την μεσολάβηση κάποιου ενδιάμεσου server. Αυτές οι συσκευές επικοινωνούν μέσω πολλών τύπων δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των IP δικτύων ή το Internet. Συχνά, ωστόσο αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως Bluetooth, 40 Z-Wave, 41 ή ZigBee42 για την καθιέρωση device-to-device επικοινωνίας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



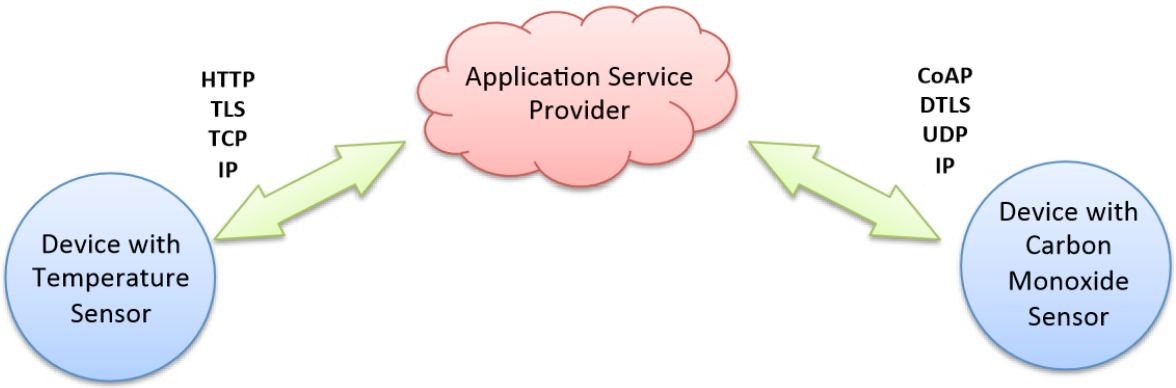
Εικόνα 60. Μοντέλο επικοινωνίας Device-to-Device

Οι συσκευές που συμμορφώνονται με ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας μπορούν να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν μηνύματα για να επιτευχθεί η λειτουργία τους. Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές

όπως τα συστήματα οικιακού αυτοματισμού, που συνήθως χρησιμοποιούν μικρά πακέτα δεδομένων πληροφοριών για την επικοινωνίας μεταξύ συσκευών με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Οικιακές IoT συσκευές όπως λαμπτήρες, διακόπτες φωτισμού, θερμοστάτες και κλειδαριές στις πόρτες συνήθως στέλνουν μικρές ποσότητες πληροφοριών μεταξύ τους (για παράδειγμα ένα μήνυμα κατάστασης της κλειδαριάς της πόρτας ή ενεργοποίηση της εντολής «φως»). Οι συσκευές αυτές έχουν συχνά άμεση σχέση μεταξύ τους και έχουν συνήθως ενσωματωμένη ασφάλεια, αλλά χρησιμοποιούν επίσης μοντέλα δεδομένων για συγκεκριμένες συσκευές που απαιτούν παραπάνω προσπάθειες ανάπτυξης από τους κατασκευαστές τους. Αυτό σημαίνει ότι οι κατασκευαστές συσκευών θα πρέπει να στραφούν στην υλοποίηση συσκευών με συγκεκριμένες μορφές δεδομένων και όχι ανοιχτές προσεγγίσεις που επιτρέπουν την χρήση τυποποιημένων μορφών δεδομένων. Από την πλευρά του χρήστη, αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του μοντέλου device-to-device δεν είναι συμβατά, αναγκάζοντας τον να επιλέξει μια οικογένεια συσκευών που χρησιμοποιούν ένα κοινό πρωτόκολλο. Για παράδειγμα, η οικογένεια των συσκευών που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Z-Wave δεν είναι συμβατή με την οικογένεια συσκευών που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο ZigBee. Αυτές οι συμβατότητες παρόλο που περιορίζουν τις επιλογές των χρηστών, σε συσκευές που χρησιμοποιούν ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο, οι χρήστες επωφελούνται από το γεγονός ότι τα προϊόντα μιας συγκεκριμένης οικογένειας μπορούν να επικοινωνήσουν καλύτερα μεταξύ τους [154].

4.3.2 Μοντέλο Device-to-Cloud

Στο μοντέλο Device-to-Cloud, η IoT συσκευή συνδέεται κατευθείαν σε μια διαδικτυακή υπηρεσία cloud όπως ένας πάροχος υπηρεσιών εφαρμογής, ώστε να ανταλλάσσει δεδομένα και να διαχειρίζεται την κίνηση μηνυμάτων. Αυτή η προσέγγιση συχνά εκμεταλλεύεται υπάρχοντες μηχανισμούς επικοινωνίας όπως η παραδοσιακή ενσύρματη Ethernet ή Wi-Fi συνδέσεις για να εγκαταστήσει μια σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του IP δικτύου, το οποίο τελικά συνδέεται με την cloud υπηρεσία όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 61. Μοντέλο επικοινωνίας Device-to-Cloud

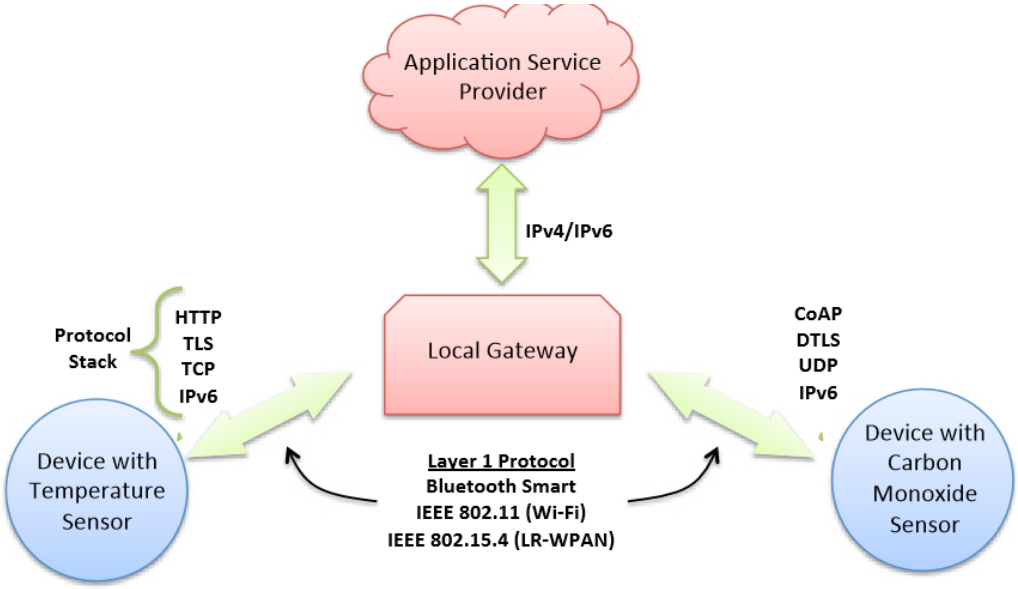
Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται από μερικές IoT συσκευές όπως το Learning Termostat της Nest Labs και η StartTV της Samsung. Στην περίπτωση της Learning Termostat της Nest, η συσκευή μεταδίδει δεδομένα σε μια cloud βάση δεδομένων όπου τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλύουν την κατανάλωση της οικιακής ενέργειας. Επίσης αυτή η σύνδεση με το cloud δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να αποκτήσει πρόσβαση εξ' αποστάσεων στον θερμοστάτη του μέσω ενός smartphone ή μέσω web, και επιπλέον υποστηρίζει αναβαθμίσεις λογισμικού για τον θερμοστάτη. Όμοια με την τεχνολογία SmartTV της Samsung, η

τηλεόραση χρησιμοποιεί μια διαδικτυακή σύνδεση για να μεταδίδει τις διαδραστικές λειτουργίες αναγνώρισης ομιλίας που διαθέτει η τηλεόραση. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μοντέλο Device-to-Cloud προσθέτει αξία στον χρήστη επεκτείνοντας τις δυνατότητες της συσκευής πέρα από τα εγγενή της χαρακτηριστικά [155].

Όταν γίνεται προσπάθεια ενοποίησης συσκευών, μπορούν να προκύψουν προσπάθειες στη διαλειτουργικότητα οι οποίες είναι φτιαγμένες από διαφορετικούς κατασκευαστές. Συχνά η συσκευή και η υπηρεσία cloud είναι από τον ίδιο προμηθευτή. Αν χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα δεδομένων βιομηχανικής ιδιοκτησίας μεταξύ της συσκευής ίσως να δεσμεύεται από συγκεκριμένη υπηρεσία cloud, περιορίζοντας ή αποτρέποντας τη χρήση εναλλακτικών παρόχων υπηρεσιών. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κλειδώματος προμηθευτών (vendor lock-in). Ταυτόχρονα, οι χρήστες μπορούν να είναι σίγουροι ότι μπορούν να ενσωματωθούν οι συσκευές που είναι σχεδιασμένες για τη συγκεκριμένη πλατφόρμα [156].

4.3.3 Μοντέλο Device-to-Gateway

Στο μοντέλο Device-to-Gateway, η IoT συσκευή συνδέεται μέσω μιας υπηρεσίας ALG (Application-Level Gateway) ως αγωγός για να επιτευχθεί μια σύνδεση με την υπηρεσία cloud. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο Device-to-Gateway διαθέτει λογισμικό εφαρμογής, το οποίο δρα ως διαμεσολαβητής μεταξύ της συσκευής και της cloud υπηρεσίας και παρέχει ασφάλεια και άλλες λειτουργίες όπως δεδομένα ή μετάφραση πρωτόκολλων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο Device-to-Gateway:



Εικόνα 62. Μοντέλο επικοινωνίας Device-to-Gateway

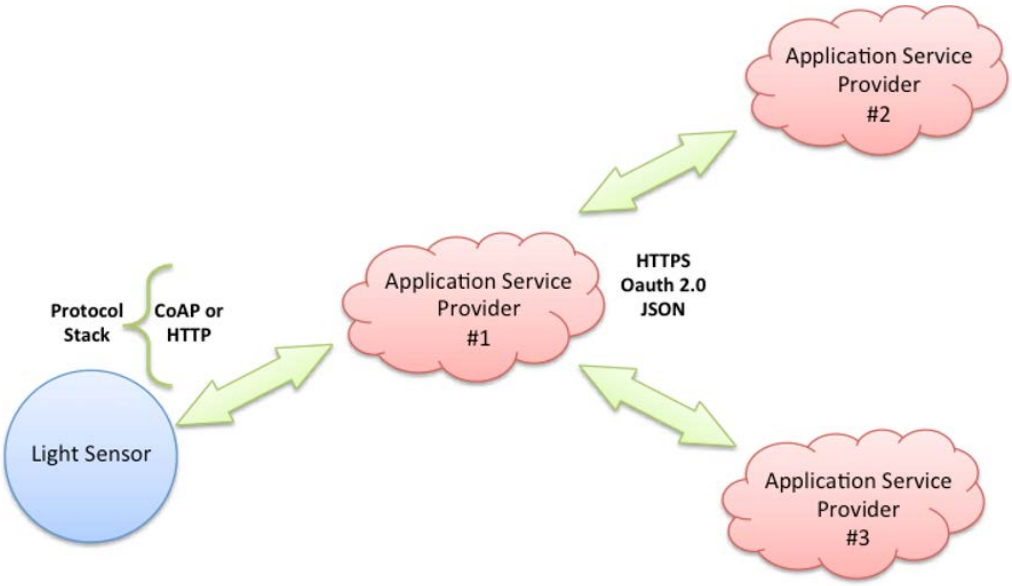
Οι συσκευές που χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο επικοινωνίας είναι τα smartphones, τα οποία τρέχουν εφαρμογές για να επικοινωνήσουν με τις IoT συσκευές και να μεταφέρουν δεδομένα σε μια cloud υπηρεσία. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται συχνά σε συσκευές όπως personal fitness trackers (συσκευές εκγύμνασης) οι οποίες δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας σε μια cloud υπηρεσία παρά μόνο μέσω των smartphones τα οποία λειτουργούν ως μεσάζοντες για την σύνδεση των συσκευών εκγύμνασης στο σύννεφο.

Άλλη μορφή του μοντέλου επικοινωνίας Device-to-Gateway είναι η ανάδυση των συσκευών «Hub» σε εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού. Τα «Hub» είναι συσκευές που

λειτουργούν ως Local Gateway μεταξύ των μεμονωμένων IoT συσκευών και μιας cloud υπηρεσίας, αλλά μπορούν επίσης να γεφυρώσουν το χάσμα της διαλειτουργικότητας μεταξύ των IoT συσκευών. Για παράδειγμα, το Hub SmartThings είναι μια αυτόνομη συσκευή Gateway που έχει εγκατεστημένους Z-Wave και Zigbee πομποδέκτες για να μπορεί να επικοινωνεί και με τις δυο οικογένειες των συσκευών. Στη συνέχεια συνδέεται με την υπηρεσία cloud SmartThings, επιτρέποντας στο χρήστη να αποκτήσει πρόσβαση στις συσκευές χρησιμοποιώντας μόνο μια εφαρμογή smartphone και μια σύνδεση στο Internet. Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται συχνά για την ενσωμάτωση νέων έξυπνων συσκευών σε ένα ήδη υπάρχων σύστημα με συσκευές που δεν είναι διαλειτουργικές. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η συνεχής και απαραίτητη ανάπτυξη του συστήματος και του λογισμικού εφαρμογών το κάνει πολύπλοκο και με μεγάλο κόστος [157].

4.3.4 Μοντέλο Back-End Data-Sharing

Το μοντέλο Back-End Data-Sharing αφορά μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας που επιτρέπει στους χρήστες να εξάγουν και να αναλύουν τα δεδομένα του έξυπνου αντικειμένου από μια cloud υπηρεσία, σε συνδυασμό με τα δεδομένα από άλλες πηγές. Η προσέγγιση αυτή είναι μια επέκταση του μοντέλου επικοινωνίας Device-to-Cloud, που επιτρέπει στις IoT συσκευές να ανεβάζουν δεδομένα μόνο για ένα πάροχο υπηρεσιών εφαρμογής. Το μοντέλο Back-End Data-Sharing επιτρέπει τα δεδομένα που συλλέγονται από μια IoT συσκευή να συγκεντρώνονται και να αναλύονται. Για παράδειγμα ένας εταιρικός χρήστης που είναι υπεύθυνος για ένα συγκρότημα γραφείων ενδιαφέρεται να συγκεντρώσει και να αναλύσει τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας που παράγονται από όλους τους IoT αισθητήτες και τα Internet-enabled συστήματα που βρίσκονται στις εγκαταστάσεις της εταιρίας. Στο μοντέλο Device-to-Cloud τα δεδομένα κάθε αισθητήρα ή IoT συστήματος αποθηκεύονται σε μια stand-alone βάση δεδομένων. Το μοντέλο Back-End Data-Sharing θα επιτρέψει στην εταιρία να έχει εύκολη πρόσβαση και ανάλυση των δεδομένων που παράγονται από όλο το φάσμα των συσκευών στο κτίριο. Επίσης, αυτό το είδος της αρχιτεκτονικής διευκολύνει τη ανάγκη για φορητότητα των δεδομένων. Η αρχιτεκτονική Back-End Data-Sharing επιτρέπει στους χρήστες να μετακινούν τα δεδομένα τους όταν εναλλάσσουν IoT συσκευές, χωρίς πρόβλημα. Παράδειγμα του μοντέλου Back-End Data-Sharing παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 63. Μοντέλο επικοινωνίας Back-End Data-Sharing

Για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των Back-End συστημάτων, η αρχιτεκτονική αυτού του μοντέλου είναι μια πολύ καλή προσέγγιση. Όμως αυτό το μοντέλο επικοινωνίας είναι τόσο αποτελεσματικό όσο και τα υποκείμενα σχέδια του IoT συστήματος, δηλαδή οι αρχιτεκτονικές Back-End Data-Sharing δεν μπορούν να ξεπεράσουν πλήρως τα κλειστά σχέδια του συστήματος IoT [158].

4.4 Εφαρμογές του IoT

Οι εφαρμογές του IoT είναι στην πραγματικότητα πάρα πολλές και έχουν απεριόριστες δυνατότητες. Μπορούν να εφαρμοστούν στους παρακάτω τομείς: το περιβάλλον, την αλληλεπίδραση των ανθρώπων, τις έξυπνες αγορές, τις συσκευές οικιακής χρήσης, τις έξυπνες πόλεις και πολλά άλλα παραδείγματα που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια [159].

4.4.1 Έξυπνο σπίτι

Εικόνα 64. Έξυπνο σπίτι στο IoT

Τα σπίτια του μέλλοντος θα έχουν επίγνωση για το θα συμβαίνει στο εσωτερικό του από άποψη χρήσης πόρων, ασφάλειας και άνεσης. Στόχος είναι η μείωση κόστους και εξασφάλισης καλύτερων επιπέδων άνεσης καθώς επίσης η αντιμετώπιση θεμάτων ασφαλείας μέσω ειδικών συστημάτων ασφαλείας για ανίχνευση τυχόν πυρκαγιάς ή διάρρηξης.

Θα υπάρχει συνεργασία διαφόρων φορέων στο σπίτι του κάθε χρήστη όπως κατασκευάστριες εταιρίες, φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιών και διαδικτύου, εταιρίες προστασίας και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας κ.α ώστε:

- Να παρακολουθείται η κατανάλωση ενέργειας και νερού για να παρέχονται οι κατάλληλες συμβουλές για μείωση των πόρων και του κόστους
- Να ενεργοποιούνται και ν' απενεργοποιούνται οι συσκευές εξ' αποστάσεως για την αποφυγή ατυχημάτων και την εξοικονόμηση ενέργειας
- Να ανιχνεύονται τα παράθυρα και οι πόρτες για να καταγράφονται οι παραβιάσεις και να αποτρέπονται οι εισβολείς
- Να ελέγχονται οι προσβάσεις σε ζώνες περιορισμένης πρόσβασης για να εντοπίζονται τυχόν εισβολείς σε τέτοιες περιοχές

4.4.2 Έξυπνες πόλεις

Εικόνα 65. Έξυπνες πόλεις στο IoT

Η έξυπνη πόλη ορίζεται ως μια αστική περιοχή που δημιουργεί βιώσιμη ανάπτυξη και υψηλή ποιότητα ζωής. Ποιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά μιας έξυπνης πόλης περιλαμβάνουν τους βασικούς τομείς όπως: την οικονομία, τους ανθρώπους, το περιβάλλον, την διακυβέρνηση και γενικότερα τις συνθήκες διαβίωσης. Έχοντας τις παραπάνω υποδομές και το κοινωνικό κεφάλαιο, θα υπάρχει μεγάλη ωφέλεια σε πολλούς τομείς από τις ψηφιοποιημένες έξυπνες πόλεις:

- Θα παρακολουθούνται οι δονήσεις και γενικά η κατάσταση των συνθηκών σε κτήρια, γέφυρες και αρχαία μνημεία
- Θα παρακολουθείται ο ήχος σε πολυσύχναστες περιοχές (π.χ περιοχές που υπάρχουν πολλά κέντρα διασκέδασης) και σε κεντρικά σημεία
- Θα εντοπίζονται οι έξυπνες συσκευές, tablets και γενικά οποιαδήποτε συσκευή κάνει χρήση της τεχνολογίας WiFi ή Bluetooth
- Ο φωτισμός στα φώτα στους δρόμους θα προσαρμόζεται βάση των καιρικών συνθηκών
- Θα ανιχνεύονται τα επίπεδα των σκουπιδιών στους κάδους για την καλύτερη διαχείριση και βελτιστοποίηση των δρομολογίων συλλογής απορριμμάτων
- Οι αυτοκινητόδρομοι θα είναι ποιο έξυπνοι, προβάλλοντας στους οδηγούς προειδοποιητικά μηνύματα ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και με την κυκλοφοριακή συμφόρηση

4.4.3 Έξυπνη βιομηχανία

Εικόνα 66. Έξυπνη βιομηχανία στο IoT

Οι εταιρίες θα μπορούν να παρακολουθούν τα προϊόντα τους μέσω ετικετών αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι εταιρίες να βελτιώσουν την παραγωγικότητά τους ενώ θα έχουν μειώσει τα έξοδά τους.

Ακόμα θα μπορούν να παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο τα μηχανήματα με χρήση διασυνδεδεμένων αισθητήρων και έτσι η συντήρησή τους θα γίνεται ποιο εύκολα αυξάνοντας την απόδοση και το όριο ζωής του εξοπλισμού του εργοστασίου. Δηλαδή θα παρέχονται τέτοιοι αυτοματισμοί που θα συνεπάγονται την μείωση του ανθρώπινου δυναμικού, αντικαθιστώντας τους υπαλλήλους με κατάλληλους αισθητήρες, bar code αναγνώστες και πολύπλοκα ρομπότ. Από την άλλη πλευρά, θα δημιουργηθούν πολλές θέσεις εργασίας για την συντήρηση και επισκευή ή ακόμα και επαναπρογραμματισμού αυτών των έξυπνων συσκευών.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω θα υπάρχουν οι παρακάτω δυνατότητες στην έξυπνη βιομηχανία:

- Θα παρακολουθούνται τα τοξικά επίπεδα του φυσικού αερίου και οξυγόνου στους χώρους εργασίας εξασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια των εργαζομένων και των εμπορευμάτων της εταιρίας
- Θα παρακολουθείται η θερμοκρασία στον εσωτερικό χώρο της βιομηχανίας καθώς επίσης και η θερμοκρασία στα ψυγεία που θα φυλάσσονται ευαίσθητα εμπορεύματα
- Θα παρακολουθείται και θα αξιολογείται ο εσωτερικός χώρος με χρήση παθητικών ετικετών (RFID, NFC) και ενεργού ZigBee

4.4.4 Έξυπνο περιβάλλον

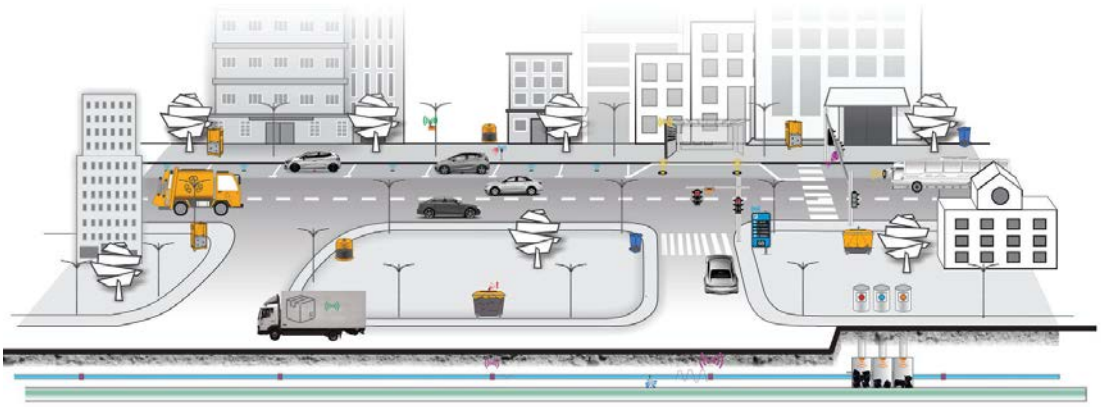
Εικόνα 67. Έξυπνο περιβάλλον στο IoT

Το έξυπνο περιβάλλον είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον φυσικό κόσμο που περιέχει ορατούς αισθητήρες, ενεργοποιητές, οθόνες και υπολογιστικά στοιχεία τα οποία είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω του δικτύου.

Ο άνθρωπος μπορεί να αλληλοεπιδρά με το σύστημα αυτό δίνοντας του μια ευχάριστη εμπειρία και οι παρακάτω δυνατότητες:

- Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των αερίων καύσης και των συνθηκών που μπορεί να προκαλέσουν πυρκαγιά
- Έλεγχος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των εργοστασίων, των αυτοκινήτων και των τοξικών αερίων σε αγροτικές περιοχές
- Παρακολούθηση του επιπέδου χιονιού σε πραγματικό χρόνο, έλεγχος και ενημέρωση για πιθανή πτώση χιονοστιβάδων
- Ανίχνευση επικίνδυνων καιρικών φαινομένων, υγρασία εδάφους, πιθανές σεισμικές δονήσεις

4.4.5 Έξυπνες μεταφορές

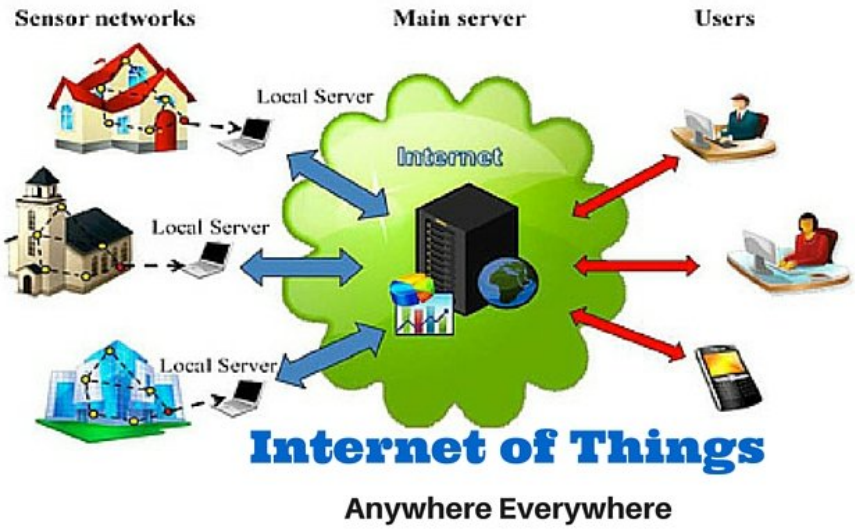


Εικόνα 68. Έξυπνες μεταφορές στο IoT

Στις έξυπνες μεταφορές το IoT βελτιώνει το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού στίγματος και αναγνώρισης εμπορευμάτων. Έτσι θα είναι δυνατό σε πραγματικό χρόνο να υπάρχει συγχρονισμός πληροφοριών και παρακολούθηση των μεταφορών επιτρέποντας την έξυπνη επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων και των εμπορευμάτων. Συγκεκριμένα θα είναι δυνατό να γίνεται:

- Παρακολούθηση των πεζών και των οχημάτων προκειμένου να βελτιστοποιείται η κυκλοφορία και η κίνηση στους δρόμους για την αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης
- Παρακολούθηση των χώρων στάθμευσης για να γνωστοποιούνται οι ελεύθερες θέσεις στάθμευσης στην πόλη
- Παρακολούθηση των χτυπημάτων και δονήσεων καθώς επίσης και σχετικός έλεγχος των δεμάτων για την ασφαλή μεταφορά τους κατά την διάρκεια της μεταφοράς
- Αναζήτηση των αντικειμένων στις αποθήκες
- Ανίχνευση εύφλεκτων εμπορευμάτων και απομόνωσή αυτών κατά την διάρκεια της μεταφοράς
- Παρακολούθηση προϊόντων ελέγχοντας τους χώρους που υπάρχουν επικίνδυνα προϊόντα ή φάρμακα

4.4.6 Έξυπνη Αγορά



Εικόνα 69. Έξυπνη αγορά στο IoT

Με την χρήση του IoT θα είναι άμεσα αντιληπτές οι ανάγκες των πελατών και των επιχειρήσεων και θα συγκρίνονται οι τιμές των όμοιων προϊόντων ως προς την τιμή και θα παρέχονται οι κατάλληλες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο όχι μόνο στους πελάτες αλλά και στις επιχειρήσεις, βοηθώντας έτσι τις επιχειρήσεις να είναι ανταγωνιστικές στην παγκόσμια αγορά. Επιπλέον οι επιχειρήσεις θα έχουν τις παρακάτω δυνατότητες:

- Να παρακολουθούν/ελέγχουν τις αποθήκες και τα προϊόντα τους
- Να κάνουν πληρωμές NFC (Near Field Communications) με βάση την περιοχή ή την δραστηριότητα τους

- Να παρέχουν συμβούλους στα σημεία πώλησης και να ενημερώνουν τους πελάτες τους βάση των προτιμήσεων και των συνηθειών τους
- Να ελέγχουν τα προϊόντα στα ράφια τους και να κάνουν έξυπνη διαχείριση εμπλουτίζοντάς τα αυτόματα

4.4.7 Έξυπνη Ιατρική

Εικόνα 70. Έξυπνη ιατρική στο IoT

Άλλη μια ευελιξία που παρέχει το IoT είναι η παρακολούθηση της υγείας των ανθρώπων και η πρόληψη τους από διάφορες ασθένειες. Αυτό θα μπορεί να γίνει ακόμα και εξ' αποστάσεως με χρήση επιχειρηματικών εφαρμογών προσφέροντας τις ιατρικές υπηρεσίες τόσο στους ασθενείς όσο και σε ιατρούς για την ολοκλήρωση της ιατρικής αξιολόγησής τους. Έτσι το IoT θα καθιστά την ανθρώπινη αλληλεπίδραση πιο αποτελεσματική και θα προσφέρει μεγαλύτερη ικανοποίηση στους ασθενείς αφού θα παρέχει:

- Βοήθεια σε άτομα με ειδικές ανάγκες και ηλικιωμένους
- Έλεγχο στα ιατρικά ψυγεία για την κατάσταση των φαρμάκων, εμβολίων και άλλων ιατρικών στοιχείων
- Φροντίδα και σημεία ελέγχου για τους αθλητές
- Ιατρική παρακολούθηση των ασθενών στα νοσοκομεία και γηροκομεία.
- Βελτίωση της ποιότητας ζωής των ηλικιωμένων με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο παγκόσμιος πληθυσμός. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την χορήγηση ιατρικής συσκευής όπου θα καταγράφει καθημερινά την κατάσταση της υγείας τους με σκοπό την άμεση ενημέρωση του θεράποντος ιατρού

4.4.8 Έξυπνη ενέργεια

Εικόνα 71. Έξυπνη ενέργεια στο IoT

Στην έξυπνη ενέργεια ο κύριος στόχος είναι η εύρεση τρόπου για την καλύτερη εξοικονόμησή της. Είναι άμεσα συνδεδεμένη με το έξυπνο σπίτι και την έξυπνη πόλη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της έξυπνης ενέργειας είναι η κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας με την χρήση ηλιακών πλεγμάτων. Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας σημαντικό ρόλο παίζουν οι έξυπνοι μετρητές που έχουν πρόσβαση, έλεγχο και επικοινωνία σε εφαρμογές πλέγματος. Επιπρόσθετοι παράγοντες που βοηθούν στην έξυπνη ενέργεια είναι οι έξυπνοι θερμοστάτες, οι έξυπνοι μετατροπείς, οι ελεγκτές φόρτωσης και γενικά οι έξυπνες συσκευές.

Οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας συνδυάζοντας την προσφορά και τη ζήτηση, θα παρέχουν κίνητρα στους καταναλωτές προκειμένου να θέσουν εκτός λειτουργίας συσκευές που δεν χρειάζονται ή και να εφοδιαστούν με νέες θα καταναλώνουν λιγότερο ενέργεια.

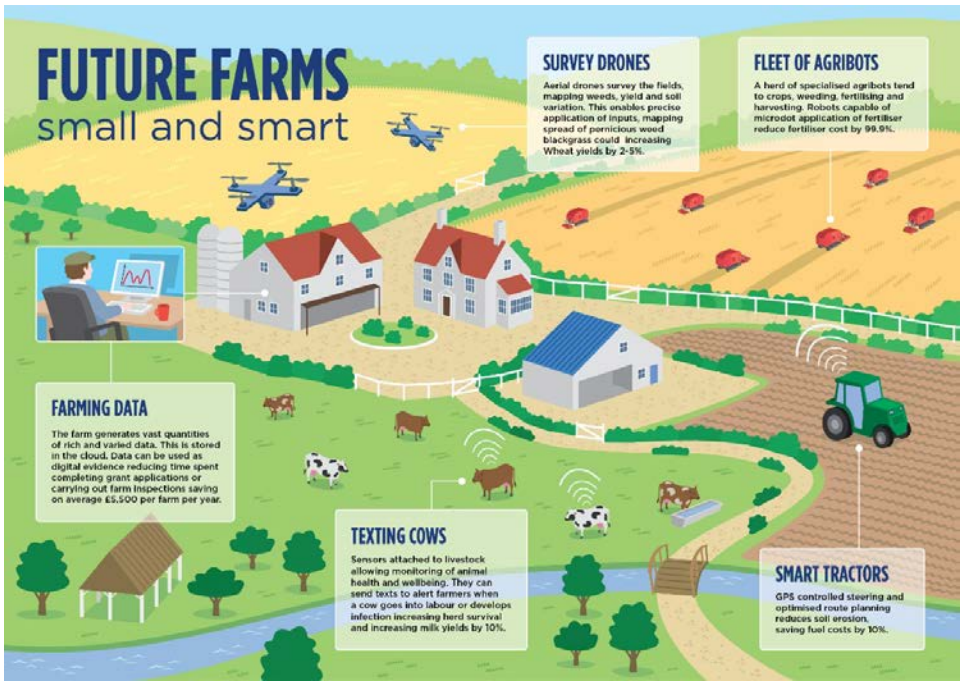
4.4.9 Έξυπνες Μετρήσεις

Εικόνα 72. Έξυπνες μετρήσεις στο IoT

Οι εφαρμογές των έξυπνων μετρήσεων προσφέρουν αξιοπιστία, ακρίβεια, ευκολία στην διαχείριση και χρήση της ενέργειας καθώς επίσης και χαρακτηριστικά χρέωσης. Με τέτοιου είδους εφαρμογές δίνονται οι παρακάτω δυνατότητες:

- Παρακολούθηση και διαχείριση της κατανάλωσης της ενέργειας
- Παρακολούθηση του επιπέδου του νερού, του πετρελαίου και φυσικού αερίου σε μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης ή και σε βυτιοφόρα
- Παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης της ηλιακής ενέργειας σε φωτοβολταϊκλες εγκαταστάσεις
- Παρακολούθηση της πίεσης και της ροής του νερού σε συστήματα τροφοδότησης και μεταφοράς νερού

4.4.10 Έξυπνη Κτηνοτροφία



Εικόνα 73. Έξυπνη κτηνοτροφία στο IoT

Στην έξυπνη κτηνοτροφία με την βοήθεια του IoT θα μπορεί να γίνεται:

- Παρακολούθηση της υγείας των ζώων εξασφαλίζοντας την ποιότητα της προμήθειας των κρεάτων που προορίζονται για κατανάλωση από τους ανθρώπους.
- Έλεγχος των συνθηκών καλλιέργειας εξασφαλίζοντας την υγεία και την αναπαραγωγή των ζώων.
- Παρακολούθηση και αναγνώριση των ζώων που βόσκουν σε μεγάλους στάβλους ή λιβάδια.
- Έλεγχος των συνθηκών των φοιτών που αναπτύσσονται ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση των χωραφιών.

4.4.11 Έξυπνη Γεωργία

Εικόνα 74. Έξυπνη γεωργία στο IoT

Ο όρος έξυπνη γεωργία βασίζεται στις διάφορες εφαρμογές και πρακτικές που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής των τροφίμων αλλά ταυτόχρονα στην μείωση των εκπομπών. Συγκεκριμένα το IoT βοηθάει στα παρακάτω:

- Στην παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους για την βελτίωση και την αύξηση της σοδειάς
- Στην παρακολούθηση του κλίματος ώστε να μεγιστοποιείται τόσο η παραγωγή όσο και η ποιότητα των φρούτων και λαχανικών
- Στην άρδευση μόνο των ξηρών ζωνών επιλεκτικά ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στη βλάστηση εδάφους
- Παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών ώστε να υπάρχει η κατάλληλη πρόβλεψη στις περιπτώσεις αλλαγής θερμοκρασίας ή ακόμα και σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως βροχές, χιόνια κ.λ.π

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία στις μέρες μας εξελίσσεται με πολύ γοργούς ρυθμούς. Αυτό συνεπάγεται ότι η αγορά κατακλύζεται από έξυπνες κινητές συσκευές, με ακόμα πιο εξελιγμένες δυνατότητες πράγμα το οποίο ωθεί τους χρήστες στην ζήτηση υπηρεσιών πολυμεσικών εφαρμογών, εκτός των διαχρονικών υπηρεσιών φωνής και μηνυμάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πολυμεσικών εφαρμογών είναι βίντεο υψηλής ανάλυσης συνεχούς ροής, υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης, υπηρεσίες τηλεϊατρικής και το on-line gaming. Οι παραπάνω υπηρεσίες σε συνδυασμό με το Δίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) αναμένεται να προκαλέσουν «έκρηξη» στην κίνηση δεδομένων δημιουργώντας έτσι μεγάλη συμφόρηση στα σημερινά δίκτυα επικοινωνιών, μεγάλες καθυστερήσεις και η ποιότητα υπηρεσίας που θα απολαμβάνουν οι τελικοί χρήστες δεν θα είναι η καλύτερη. Συνεπώς η μετάβαση σε δίκτυα επικοινωνιών νέας γενιάς (5G) είναι απαραίτητη. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς θα μπορούν να κάνουν χρήση τεχνολογιών όπως της Υπολογιστικής Νέφους (Cloud Computing) και της Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου (Mobile Edge Computing, MEC) η οποία είναι η εξέλιξη της πρώτης ικανοποιώντας τους απαιτητικούς χρήστες με την επίτευξη της ελάχιστης δυνατής καθυστέρησης και παράλληλα της μέγιστης δυνατής ρυθμοαπόδοσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν εκτενώς στο πρώτο κεφάλαιο τα συστήματα πέμπτης γενιάς όπου αρχικά παρουσιάστηκε μια ιστορική αναδρομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και στη συνέχεια αφού διερευνήθηκαν οι προκλήσεις και οι ανάγκες που υπάρχουν στα σημερινά δίκτυα επικοινωνιών, παρουσιάστηκε η προτυποποίηση των 5G συστημάτων. Επιπλέον παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική των 5G συστημάτων και αναλύθηκαν οι έξι επικρατέστερες τεχνολογίες που αναμένεται να ενορχηστρώσουν τα συστήματα πέμπτης γενιάς οι οποίες είναι mmWave, Massive MIMO, Network Function Virtualization (NFV) και Software Defined Networking (SDN), Cloud Computing και Mobile Edge Computing (MEC). Τέλος παρουσιάστηκαν ορισμένα χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα που έχουν ως στόχο την πραγματοποίηση του οράματος των δικτύων πέμπτης γενιάς.

Στη συνέχεια αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο μελετήθηκε διεξοδικά η Υπολογιστική Νέφους (Cloud Computing). Αρχικά δόθηκε ο ορισμός της Υπολογιστικής Νέφους, παρουσιάστηκε μια ιστορική αναδρομή αυτής, οι τεχνολογικές καινοτομίες της καθώς επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ως νέα τεχνολογία. Επιπλέον παρουσιάστηκαν τα είδη των μοντέλων παροχής υπηρεσιών Υπολογιστικού Νέφους που διαθέτει τα οποία είναι Υποδομή ως Υπηρεσία (IaaS), Πλατφόρμα ως Υπηρεσία (PaaS), Λογισμικό ως Υπηρεσία (SaaS) και τα μοντέλα πρόσβασης υπολογιστικών νεφών τα οποία είναι Δημόσιο νέφος, Κοινοτικό νέφος, Ιδιωτικό νέφος, Υβριδικό νέφος. Επιπροσθέτως παρουσιάστηκαν οι επικρατέστερες αρχιτεκτονικές Υπολογιστικού Νέφους, ποιες πλατφόρμες Υπολογιστικού Νέφους είναι διαθέσιμες σήμερα καθώς και πως μπορεί το Υπολογιστικό Νέφος να φανεί χρήσιμο στα δίκτυα πέμπτης γενιάς συνεισφέροντας σημαντικά στην πραγματοποίηση του οράματος των 5G δικτύων. Τέλος αναλύθηκαν θέματα ασφάλειας που προκύπτουν από την χρήση της Υπολογιστικής Νέφους τόσο σε ατομικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο επιχείρησης ή οργανισμού.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο τρία μελετήθηκε αναλυτικά η τεχνολογία της Κινητής Υπολογιστικής στα Άκρα του Δικτύου (Mobile Edge Computing, MEC). Αυτή η τεχνολογία όπως επισημάνθηκε και στην τρέχουσα εργασία ήρθε με σκοπό όχι να αντικαταστήσει το Cloud Computing, αλλά να το επεκτείνει και να το συμπληρώσει. Αυτό το καταφέρνει με την ιδιότητα που την χαρακτηρίζει να βρίσκεται κοντά στους τελικούς χρήστες, είτε αυτοί είναι κινητές έξυπνες συσκευές, tablets είτε ανήκουν στον τεράστιο κόσμο του Δικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) και να εξυπηρετεί τα

αιτήματά τους άμεσα και γρήγορα αποσυμφορίζοντας σε μεγάλο βαθμό την κίνηση στον πυρήνα του δικτύου. Επομένως αρχικά στο τρίτο κεφάλαιο περιεγράφηκε η Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου παρουσιάζοντας την αρχιτεκτονική της, τα πλεονεκτήματά της καθώς και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να φανεί χρήσιμη στα δίκτυα 5G. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε μια γενικευμένη μορφή της MEC, η Υπολογιστική Ομίχλης (Fog Computing), η οποία διευρύνει τον ορισμό των άκρων που κυμαίνονται από τα smartphones μέχρι τα set-top boxes. Αναφέρθηκαν τα χαρακτηριστικά της γενικευμένης αρχιτεκτονικής, η αρχιτεκτονική της για τα 5G δίκτυα, εφαρμογές της και ορισμένα θέματα ασφάλειας.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο κόσμος του Δικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) επιδεικνύοντας την αρχιτεκτονική του IoT, τα χαρακτηριστικά του, ποια πλατφόρμα είναι η πιο ιδανική από τις προαναφερθείσες για να μπορεί να υποστηρίξει γρήγορα και αποδοτικά αυτόν τον τεράστιο IoT κόσμο, τα μοντέλα επικοινωνίας της κάθε IoT συσκευής με άλλες συσκευές, με το Cloud και με το Gateway. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκαν λεπτομερώς οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του IoT καθώς και τις εφαρμογές τις οποίες μπορεί να υποστηρίζει οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στους τομείς όπως το περιβάλλον, στην αλληλεπίδραση των ανθρώπων, στις έξυπνες αγορές, στις συσκευές οικιακής χρήσης, στις έξυπνες πόλεις και σε πολλούς άλλους τομείς.

Ακόμα, για να γίνουν απόλυτα κατανοητές οι έννοιες μεταξύ των διαφόρων αρχιτεκτονικών και πλατφορμών προστέθηκαν συγκριτικές αναλύσεις στα αντίστοιχα κεφάλαια της εργασίας. Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο δυο για να γίνουν κατανοητές οι διαφορές μεταξύ των αρχιτεκτονικών υπολογιστικού νέφους πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση αναδεικνύοντας τις ομοιότητες και τις διαφορές τους. Επίσης στο κεφάλαιο τρία, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των υπολογιστικών Νέφους, Ομίχλης και Κινητής Υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου δίνοντας έμφαση στις ομοιότητές τους αλλά και στις πολύ λεπτές διαφορές της Υπολογιστικής Ομίχλης και της Κινητής Υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου.

Συνοψίζοντας, οι πλατφόρμες Cloud και Mobile Edge Computing προσδοκάται να επιφέρουν μεγιστοποίηση του βαθμού χρήσης των δικτυακών υποδομών των συστημάτων επόμενης γενιάς (5G) και να συνεισφέρουν στην μείωση των κεφαλαιακών και λειτουργικών εξόδων των παρόχων, αλλά πολύ περισσότερο στην βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας που απολαμβάνουν οι τελικοί χρήστες.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	**Ελληνικός Όρος**
Abstraction	Αφαίρεση
Access point	Σταθμός βάσης
Aggregate data rate	Συνολικού αριθμού δεδομένων
Amazon Storage Service	Υπηρεσία χώρου αποθήκευσης
Amazon Web Services	Amazon Διαδικτυακές υπηρεσίες
Application Layer	Επίπεδο εφαρμογής
Application plane	Επίπεδο εφαρμογής
Audio streaming	Ροή ήχου
Backhaul	Προσφέρθηκαν
Bandwidth	Εύρος ζώνης
Beachfront spectrum	Φασματική ζώνη
Bug	Σφάλμα
Business Support System	Σύστημα υποστήριξης επιχειρήσεων
Caching	Κρυφή μνήμη
Capacity	Χωρητικότητα
Care of Address	Διεύθυνση πρόνοιας
Carrier Aggregation	Συγκέντρωση Φορέα
Cloud bursting architecture	Αρχιτεκτονική εκτόξευσης νέφους
Cloud Computing	Υπολογιστική Νέφους
Cloud Controller	Ελεγκτής Νέφους
Cloud delivery model	Μοντέλο παράδοσης νέφους
Cluster Controller	Ελεγκτής Συμπλέγματος
Community cloud	Κοινοτικό νέφος
Content Delivery Networks	Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου
Control plane	Πεδίο ελέγχου
Coordinated multipoint transmission / reception	Συντονισμένη μετάδοση / λήψη πολλαπλών σημείων
Data-Sharing	Κοινή χρήση δεδομένων
Data centers	Κέντρα δεδομένων
Data plane	Πεδίο δεδομένων
Data rate	Μετάδοσης δεδομένων
Device-to-Cloud	Συσκευή σε Σύννεφο
Device-to-device	Συσκευής σε συσκευή
Downlink	Μέγιστη ταχύτητα δεδομένων στην κάθοδο
Downloading	Ταχύτητα λήψης
Dynamic scalability architecture	Αρχιτεκτονική δυναμικής κλιμάκωσης
E-banking	Ηλεκτρονική τραπεζική
E-health	Ηλεκτρονική υγεία
E-learning	Ηλεκτρονική μάθηση
Edge computing	Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου
Edge rate	Μέσος ρυθμός μετάδοσης
Elastic disk provisioning architecture	Αρχιτεκτονική παροχής ελαστικού δίσκου
Elasticity	Ελαστικότητα
Elastic resource capacity architecture	Αρχιτεκτονική ελαστικής δυναμικότητας πόρου
European Network and Information Security Agency	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Δικτύου και Ασφάλειας Πληροφοριών
Extremely high frequency	Εξαιρετικά Υψηλών Συχνοτήτων

Femtocell	Φεμπτοκυψέλες
Firewall	Τείχος προστασίας
Fog Computing	Υπολογιστική Ομίχλης
Fog Networking	Δικτύωση Ομίχλης
Foreign Agent	Ξένος πράκτορας
Hardware	Υλικό
Heterogeneous Cellular Networks	Ετερογενή κυψελωτά δίκτυα
Hybrid cloud	Υβριδικό νέφος
IMDEA Networks Institute	IMDEA Ινστιτούτο Δικτύων
Infrastructure as a Service	Υποδομή ως Υπηρεσία
Instances	Στιγμιότυπα
Interface Drivers and Agents	Οδηγοί διασύνδεσης και πράκτορες
International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
Internet	Διαδίκτυο
Internet of Things	Διαδίκτυο των πραγμάτων
Isolation failure	Αποτυχία απομόνωσης
Latency	Καθυστέρηση
Load balancer	Εξισορροπητής
Local Area Networks	Δίκτυα τοπικής περιοχής
Local Gateway	Τοπική πύλη
Loss of governance	Απώλεια διακυβέρνησης
Mainframe	Μεγάλο σύστημα υπολογιστή
Massive Multiple Input – Multiple Output	Μαζική πολλαπλή είσοδος - πολλαπλή έξοδος
Measured usage	Μετρούμενης χρησιμοποίησης
Millimeter Waves	Κύματα του χιλιοστού
Mobile Cloud Networking	Δικτύωση Κινητού Νέφους
Mobile Cloud Provider	Πάροχος Κινητού Νέφους
Modifying network traffic	Τροποποίηση κίνησης δικτύου
Multipoint transmission	Πολλαπλή μετάδοση
Multitenancy	Πολλαπλή μίσθωση
National Institute of Standards and Technology	Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και τεχνολογίας
Network breaks	διακοπές δικτύου
Network Functions Virtualization	Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου
Network Functions Virtualization Infrastructure	Υποδομή Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου
Network Layer	Επίπεδο δικτύου
Network management	Διαχείριση δικτύου
Node Controller	Ελεγκτής Κόμβου
Off-line	Εκτός σύνδεσης
On-demand usage	Χρησιμοποίηση κατ’ απαίτηση
On-line storage	Αποθήκευση σε απευθείας σύνδεση
Open Transport Protocol Layer	Ανοιχτό πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς
Open Wireless Architecture Layer	Ανοιχτό Wireless επιπέδου αρχιτεκτονικής
Operations Support System	Σύστημα υποστήριξης λειτουργιών
Patch	Μπάλλωμα
Pay-per-use	Πληρωμή με την χρήση
Peak rate	Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης
Peer-to-peer	Ομότιμος σε ομότιμο

Personal fitness trackers	Συσκευές εκγύμνασης
Phantom cells	Κυψέλες φάντασμα
Physical Layer	Φυσικό επίπεδο
Pixel	Εικονοστοιχείο
Platform as a Service	Πλατφόρμα ως Υπηρεσία
private cloud	Ιδιωτικό νέφος
public cloud	Δημόσιο νέφος
Quality of Service	Ποιότητα υπηρεσιών
Radio Access Technologies	Τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης
Redundant storage architecture	Αρχιτεκτονική πλεονάζουσας αποθήκευσης
Resiliency	Ανθεκτικότητα
Resource pooling	Δεξαμενή πόρων
Resource pooling architecture	Αρχιτεκτονική συνεκμετάλλευσης πόρων
Resources	Πόροι
RFID readers	Αναγνώστες RFID
Scaling	Κλιμάκωση
SDN Application	SDN Εφαρμογές
SDN Controller	SDN Ελεγκτής
SDN Datapath	SDN Μονοπάτι δεδομένων
SDN Northbound Interfaces	Διεπαφές SDN ανωτέρου επιπέδου
Self-adaptation	Αυτό-προσαρμογή
Self-configuration	Αυτό-ρύθμιση
Self-description	Αυτό-περιγραφή
Self-discovery	Αυτό-ανακάλυψη
Self-energy-supplying	Αυτό-προμήθεια ενέργειας
Self-healing	Αυτό-ίαση
Self-optimization	Αυτό-βελτίωση
Self-organization	Αυτό-οργάνωση
Self-protection	Αυτό-προστασία
Server	Εξυπηρετητής
Service load balancing architecture	Αρχιτεκτονική εξισορρόπησης φορτίου υπηρεσίας
Small cells - Ultra Dense Networks	Μικρές κυψέλες – Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα
smart-radio	Έξυπνο ραδιόφωνο
Smartphones	Έξυπνα κινητά
SmartTV	Έξυπνη τηλεόραση
Social engineering attacks	Επιθέσεις κοινωνικής μηχανικής
Soft cells	Μαλακές κυψέλες
Software	Λογισμικό
Software as a Service	Λογισμικό ως Υπηρεσία
Software Defined Networking	Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό
Storage Controller	Ελεγκτής Αποθήκευσης
Tablets	Ταμπλέτα
Teletext	Τηλεκείμενο
Time slots	Χρονοθυρίδες
Ubiquitous access	Πανταχού παρούσα πρόσβαση
Ultra high definition	Εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας
Unauthorized access to premise	Αναρμόδια πρόσβαση στις εγκαταστάσεις
Uplink	Μέγιστη ταχύτητα δεδομένων στην άνοδο

Uploading	Ταχύτητα μεταφόρτωσης
User-provided	Παρέχεται από τον χρήστη
Vendor lock-in	Κλείδωμα προμηθευτή
Video streaming	Βιντεο ροής
Virtualization	Εικονικοποίηση
Virtualized Network Functions	Εικονικές Δικτυακές Λειτουργίες
Virtual machine	Εικονική μηχανή
Virtual Private Network	Εικονικό ιδιωτικό δίκτυο
Web interface	Διεπαφή δικτύου
Web roles	Web ρόλοι
Wide Area Networks	Δίκτυα ευρείας περιοχής
Worker roles	Ρόλοι των εργαζομένων
Workload distribution architecture	Αρχιτεκτονική κατανομής φόρτου εργασίας

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1G	First Generation
2G	Second Generation
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3G	Third Generation
4G	Four Generation
5G	Five Generation
5G PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
ALG	Application-Level Gateway
AMI	Amazon Machine Image
API	Application Programming Interface
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWS	Amazon Web Services
BER	Bit Error Rate
BSS	Business Support System
C2	Command and Control
CC	Cluster Controller
CDMA2000	Code Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
CDN	Content Delivery Networks
CLC	Cloud Controller
CoA	Certificate of Authenticity
CoMP	Coordinated Multipoint Transmission/Reception
CRM	Customer Relationship Management
D2D	Device to Device
DAWN	Dynamic Ad-hoc Wireless Network
DCC	Distributed Computing System
DIDO	Distributed Input Distributed Output
EBS	Elastic Block Store
EC2	Elastic Compute Cloud
EHF	Extremely high frequency
ENISA	European Network and Information Security Agency
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

EVDO	Enhanced Voice-Data Optimized
FDD	Frequency Division for Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FP7	Framework Programme 7
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System For Mobile
HCN	Heterogeneous Cellular Network
HeNB	Home Node B
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IaaS	Infrastructure-as-a-Service
IAB	Internet Architecture Board
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIS	Internet Information Services
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT-A	Internet of Things Architecture
IoT	Internet of Things
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
IS-95	Interim Standard 95
IS-136	Interim Standard 136
ISG	Industry Specification Group
IT	Information Technology
ITU-D	ITU Telecommunication Development Sector
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Networks
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine

MAC	Medium Access Control
MANET	Wireless Ad Hoc Network
MCN	Mobile Cloud Networking
MD5	Message Digest
MEC	Mobile Edge Computing
MIMO	Multiple-in-Multiple-out
MMS	Multimedia Messaging Service
mmWave	Millimeter Wave
MP2MP	Multipoint-to-Multipoint
MU-MIMO	Multiuser MIMO
mWT	Millimeter Wave Transmission
NBI	Northbound Interfaces
NC	Node Controller
NFC	Near Field Communications
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
NFV	Network Function Virtualization
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NIST	National Institute of Standards and Technology
OCA	OpenNebula Cloud API
ODFM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
ONF	Open Network Foundation
OSI	Open Systems Interconnection
OSS	Operations Support System
PaaS	Platform-as-a-Service
PDC	Pacific Digital Cellular
PHYLAWS	PHYsical LAyer Wireless Security
PHY	Physical Layer
POSIX	Portable Operating System Interface
QoS	Quality of service
QR	Quick Response
RAM	Random Access Memory
RANaaS	RAN-as-a-Service
RAT	Radio Access Technologies

RDS	Relational Database Service
RFID	Radio-Frequency IDentification
S3	Simple Storage Service
SaaS	Software-as-a-Service
SAP	Systems Applications and Products
SC	Storage Controller
SDN	Software Defined Network
SIM	Subscriber Identity Module
SLA	Service Level Agreement
SMS	Short Message Service
SOAP	Simple Object Access Protocol
SQL	Structured Query Language
SQS	Simple Queue Service
SSL	Secure Socket Layer
SU-MIMO	Single User MIMO
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
TLS	Transport Layer Security
UDN	Small cells - Ultra Dense Network
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URL	Uniform Resource Locator
vCPU	Virtual Central Processing Unit
VIM	Virtual Infrastructure Manager
VM	Virtual Machine
VNFM	Virtualized Network Function Managers
VNF	Virtualized Network Function
VPC	Virtual Private Cloud
VPN	Virtual Private Network
vStorage	Virtual Storage
vSwitches	Virtual Switches
W-CDMA	Wideband Code-Division Multiple Access

WAN	Wide Area Networks
WAP	Wireless Application Protocols
WCF	Windows Communication Foundation
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMN	Wireless Mesh Networks
WWWW	Wireless World Wide Web
XML-RPC	eXtensible Markup Language - Remote Procedure Call protocol
ΕΚΠΑ	Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΚΜΕ	Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Nokia, "5G Use Cases and Requirements", white paper, July 2014
[2] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020", white paper, Feb. 2016
[3] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen Hanly, Angel Lozano, Anthony C.K. Soong, Jianzhong Charlie Zhang, "What Will 5G Be?", IEEE jsac special issue on 5g wireless communication systems, May 2014
[4] Takahiro Otsuka, Measurement Business Group R&D Division 2nd Product Development Dept, Ian Rose Technical Consultant Anritsu Limited, "5G Standardization Status in 3GPP", March 2016
[5] International Telecommunications Union, “ITU towards “IMT for 2020 and beyond” ”, http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx
[6] NTERDIGITAL, "5G Standardization Mobile World Congress 2015", Mar. 2015
[7] ITU-R, “IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”, Sep. 2015
[8] Mobile World Congress 2015, “5G Standardization”, http://www.interdigital.com/presentations/5g-standardization, March 2015
[9] 5G-PPP, 5G Infrastructure Public Private Partnership, https://5g-ppp.eu/
[10] SONATA project Deliverable D2.2 “Architecture design,” available at: http://sonata-nfv.eu/sites/default/files/sonata/public/content-files/pages/SONATAD2.2ArchitectureandDesign.pdf
[11] 5G-PPP, 5G Infrastructure Public Private Partnership, White Papers, https://5GPPP.eu/white-papers/
[12] 5G-PPP, "5G empowering vertical industries", White paper, Feb. 2016, https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/02/BROCHURE_5PPP_BAT2_PL.pdf
[13] 5G-PPP, "5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services.", White paper, Feb. 2015, https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf
[14] 5G PPP Architecture Working Group, "View on 5G Architecture", Jul. 2016, https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-5G-Architecture-WP-July-2016.pdf
[15] 5GPPP, “Living Document on 5GPPP use cases and performance evaluation models”, https://5GPPP.eu/wp-content/uploads/2014/02/5GPPP-use-cases-and-performance-evaluation-modeling_v1.0.pdf
[16] Wikipedia, “Cloud Computing”, https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing.
[17] Wikipedia, “Fog Computing”, https://en.wikipedia.org/wiki/Fog_computing
[18] FP7 - Future Networks Cluster, “5G radio network architecture”, White paper, http://fp7-semafour.eu/media/cms_page_media/9/SEMAFOUR_2014_RAScluster%20White%20paper.pdf, March 2014
[19] Wikipedia , “Extremely High Frequency”, https://en.wikipedia.org/wiki/Extremely_high_frequency
[20] I. Poole, “LTE CA : Carrier Aggregation Tutorial”, http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-carrier-channel-aggregation.php
[21] Angeliki Alexiou, University of Piraeus, "5G - on the count of three … … paradigm shifts", Wireless World Research Forum, Mar. 2015
[22] Y. Niu et al., “A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges”, Cornell University Library, February 2015
[23] R. Heath, “Millimeter Wave Cellular Systems – the Future of 5G”, http://www.profheath.org/research/millimeter-wave-cellular-systems/
[24] S. Rangan et al., “Millimeter Wave Cellular Wireless Networks : Potentials and Challenges”, Proceedings of the IEEE (Volume 102 , Issue 3), February 2014.
[25] K. Guo, “Transmit – Receive Processing in Massive MIMO systems”, http://www.ice.rwth-aachen.de/research/algorithms-projects/entry/detail/transmit-receive-processing-in-massive-mimo-systems, ICT-317669 METIS
[26] E. Luther, “5G Massive MIMO Testbed : From Theory to Reality”, http://www.ni.com/white-paper/52382/en/, Aug. 2017
[27] ETSI SDN and OpenFlow World Congress, “White Paper : Network Functions Virtualisation”, October 2012, http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf
[28] Huawei Tecnologies , “White Paper : Huawei Observation to NFV”, White paper, 2014
[29] S. Perrin, S. Hubbard, “White Paper : Practical Implementation of SDN and NFV in the WAN”, Heavy Reading, October 2013
[30] Wikipedia, “Network function virtualization”, https://en.wikipedia.org/wiki/Network_functions_virtualization
[31] ETSI SDN and OpenFlow World Congress, “Network Functions Virtualisation”, October 2013, http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper2.pdf

[32] Open Networking Foundation, “SDN Architecture Overview”, Dec 2013, https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/SDN-architecture-overview-1.0.pdf
[33] Open Networking Foundation, “Software-Defined Networking: The New Norm for Networks”, April 2012, http://www.bigswitch.com/sites/default/files/sdn_resources/onf-whitepaper.pdf
[34] TechTarget, “SDN use cases emerge across the LAN, WAN and data center”, http://searchsdn.techtarget.com/essentialguide/SDN-use-cases-emerge-across-the-LAN-WAN-and-data-center
[35] Amazon Web Services, "What is Cloud Computing?". 2013-03-19. Retrieved 2013-03-20.
[36] Baburajan, Rajani, "The Rising Cloud Storage Market Opportunity Strengthens Vendors". It.tmcnet.com. Retrieved 2011-12-02.
[37] Oestreich, Ken, "Converged Infrastructure". CTO Forum. Thectoforum.com. Archived from the original on 2012-01-13. Retrieved 2011-12-02.
[38] CenturyLinkVoice, "Where's The Rub: Cloud Computing's Hidden Costs". 2014-02-27. Retrieved 2014-07-14.
[39] The Economist, "Cloud Computing: Clash of the clouds", 2009-10-15. Retrieved 2009-11-03.
[40] Gartner, "Gartner Says Cloud Computing Will Be As Influential As E-business". Gartner. Retrieved 2010-08-22.
[41] Gruman, Galen, "What cloud computing really means". InfoWorld. Retrieved 2009-06-02.
[42] Telecompaper, "Mobile Edge Computing: a building block for 5G", Jul 14, 2015
[43] Ahmed, Arif; Ahmed, Ejaz, “A Survey on Mobile Edge Computing”, India: 10th IEEE International Conference on Intelligent Systems and Control(ISCO’16), India, 2016
[44] Wikipedia, “Mobile Edge Computing”, https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_edge_computing
[45] Etsi.org, "Mobile Edge Computing Introductory Technical White Paper”, White Paper, Retrieved 2015-10-26.
[46] M. Chiang and T. Zhang, “Fog and IoT: An overview of research opportunities,” IEEE Internet Things J., vol. 3, no. 6, pp. 854–864, Dec. 2016.
[47] S. Yi, C. Li, and Q. Li, “A survey of fog computing: Concepts, applications and issues,” in Proc. ACM Workshop Mobile Big Data, Hangzhou, China, Jun. 2015, pp. 37–42
[48] G. I. Klas, “Fog computing and mobile edge cloud gain momentum: Open fog consortium, ETSI MEC and cloudlets,” Nov. 2015, http://yucianga.info/wp-content/uploads/2015/11/15-11-22-Fog-computing-and-mobile-edge-cloudgain-momentum-%E2%80%93-Open-Fog-Consortium-ETSI-MECCloudlets-v1.pdf
[49] N. Sharma, “Eight Big Benefits of Software-Defined Networking Nirmal Sharma”, Jan. 2015 http://www.serverwatch.com/server-tutorials/eight-big-benefits-of-software-defined-networking.html
[50] G. Brown, “7 Advantages of Software Defined Networking”, http://www.ingrammicroadvisor.com/data-center/7-advantages-of-software-defined-networking
[51] A. Shapochka ,“4 Challenges Lying in the Wait of SDN”, April 2015, http://www.nojitter.com/post/240169834/4-challenges-lying-in-the-wait-of-sdn
[52] European Commission, “What is Horizon 2020?”, http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020
[53] European Commission, “TROPIC main achievements and exploitation prospects”, September 2014
[54] MCN, “Motivation”, http://www.mobile-cloud-networking.eu/site/
[55] COMBO, “Project Presentation”, http://www.ict-combo.eu/
[56] FP7 CROWD, “Connectivity management for eneRgy Optimised Wireless Dense networks”, http://www.ict-crowd.eu/
[57] Gartner, “Cloud Computing”, https://www.gartner.com/it-glossary/cloud-computing
[58] Forrester , “Cloud Computing”, https://www.forrester.com/Cloud-Computing
[59] NIST, “Final Version of NIST Cloud Computing Definition Published”, https://www.nist.gov/news-events/news/2011/10/final-version-nist-cloud-computing-definition-published
[60] Thomas Erl, Zaigham Mahmood, and Ricardo Puttini, “Cloud Computing: Concepts, Technology & Architecture”, Prentice Hall, 2013
[61] D. Gonzales et al, “Cloud-trust — A Security Assessment Model for Infrastructure as a Service (Iaas) Clouds,” IEEE Trans. Cloud Computing, vol. PP, no. 99, 2015, pp. 1–1.
[62] “Cloud Deployment Models – Private, Community, Public, Hybrid with Examples”, http://www.techno-pulse.com/2011/10/cloud-deployment-private-public-example.html
[63] Awodele Oludele, Emmanuel C. Ogu*, Kuyoro ‘Shade, Umezuruike Chinecherem, "On the Evolution of Virtualization and Cloud Computing: A Review", Journal of Computer Sciences and Applications, 2014, Vol. 2, No. 3, 40-43
[64] Leonard Kleinrock, "A Vision for the Internet", St Journal of Research - Volume 2 - Number 1 – Networked Multimedia, 2005, https://www.lk.cs.ucla.edu/data/files/Kleinrock/A%20Vision%20for%20the%20Internet.pdf

[65] Ling Qian, Zhiguo Luo, Yujian Du, and Leitao Guo, "Cloud Computing: An Overview", CloudCom 2009, LNCS 5931, pp. 626–631, 2009.
[66] ISACA, "Essential characteristics of Cloud Computing", http://www.isaca.org/Groups/Professional-English/cloud-computing/GroupDocuments/Essential%20characteristics%20of%20Cloud%20Computing.pdf
[67] Webapptester, "What is cloud computing", Jan 2013 http://webapptester.com/ti-einai-cloud-computing/
[68] The Art of Service, "Cloud Computing – The Complete Cornerstone Guide to Cloud Computing", http://www.chinacloud.cn/upload/2010-02/10021300131703.pdf
[69] Javacodegeeks, "Advantages and Disadvantages of Cloud Computing – Cloud computing pros and cons", April 2013, https://www.javacodegeeks.com/2013/04/advantages-and-disadvantages-of-cloud-computing-cloud-computing-pros-and-cons.html
[70] Sandeep Mukherji, Shashwat Srivastava, "Pros and Cons of Cloud Computing Technology", International Journal of Science and Research (IJSR), July 2016, https://www.ijsr.net/archive/v5i7/ART2016314.pdf
[71] Udemy.com, "Disadvantages of Cloud Computing Unfolded", April 2014, https://blog.udemy.com/disadvantages-of-cloud-computing/
[72] Rittinghouse J. & Ransome J., "Cloud Computing Implementation, Management, and Security", CRC Press, 2010.
[73] Chappelle D., "Introducing Windows Azure", October 2010, http://www.davidchappell.com/writing/white_papers/Introducing_the_Windows_Azure_Platform,_v1.4--Chappell.pdf
[74] CEITON Technologies, What is a Workflow Management System, http://www.ceiton.de/CMS/EN/CEITON-CTWS-media-flyer-01.pdf
[75] Tsarpalis, Eirik George, "MBrace: Cloud Computing with F#". slideshare.net. Retrieved August 27, 2015.
[76] Wikipedia, "MBrace", https://en.wikipedia.org/wiki/MBrace
[77] Hall, Alena, "Functional approach to distributed computations and Big Data with F# MBrace cloud monads. Part 2", May 19, 2015, https://lenadroid.github.io/posts/fsharp-cloud-monads-part-2.html
[78] mbraceTV, "mbrace - sneak preview". https://www.youtube.com/watch?v=fmTagG6MNPQ.. September 3, 2012.
[79] Julie Bort, "The 24 most popular cloud apps used at work, 2016, Aug 2015, http://www.businessinsider.com/the-most-popular-cloud-apps-used-at-work-2015-8/#no-20-google-apps-admin-the-administration-page-for-a-companys-google-apps-account-it-does-things-like-set-up-or-delete-user-accounts-and-select-security-policies-5
[80] Rick Blaisdell, "Most Used Cloud Apps in Enterprises", April 2016, https://rickscloud.com/most-used-cloud-apps-in-enterprises
[81] Cynthia Harvey, "75 Open Source Cloud Computing Apps", May 2015, https://www.datamation.com/cloud-computing/75-open-source-cloud-computing-apps-1.html
[82] Jensen M. et al., "On technical security issues in cloud computing", IEEE Computer society, IEEE International Conference on Cloud Computing, 2009
[83] Cloud Security Alliance, "Security Guide for Critical Areas of Focus in Cloud Computing" Dec 2009, https://cloudsecurityalliance.org/csaguide.pdf
[84] Catteddu D, Hogben G. "Cloud Computing Information Assurance Framework, EuropeaNetwork and Information Security Agency (ENISA)", 2009
[85] Craig B., "Assessing the Security Benefits of Cloud Computing", July 2008
[86] Daniele Catteddu, "Cloud Computing Benefits, risks and recommendations for information security" - European Network and Information Security Agency (ENISA), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
[87] Jianhua Tang, Ruihan Wen, Tony Q. S. Quek, and Mugen Peng, "Fully Exploiting Cloud Computing to Achieve a Green and Flexible C-RAN", Nov. 2017
[88] Ericsson AB, Huawei Technol. Co. Ltd, NEC Corp., Alcatel-Lucent and Nokia Netw., "Common public radio interface (CPRI); Interface specification v.7.0 (2015-10-09)," Oct. 2015.
[89] Mansoor Shafi, Andreas F. Molisch, Peter J. Smith Thomas Haustein, Peiying Zhu, Prasan De Silva, Fredrik Tufvesson, Anass Benjebbour, Gerhard Wunder, "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice", , June 2017
[90] Aleksandra Checko, Henrik L. Christiansen, Ying Yan, Lara Scolari, Georgios Kardaras, Michael S. Berger, Lars Dittmann, "Cloud RAN for Mobile Networks - a Technology Overview", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, 2014
[91] Dirk Wübben, Peter Rost, Jens Bartelt, Massinissa Lalam, Valentin Savin, Matteo Gorgoglione, Armin Dekorsy, and Gerhard Fettwei, "Benefits and Impact of Cloud Computing on 5G Signal Processing", IEEE Signal Processing Magazine, Nov. 2014

[92] 3GPP, “Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces,”, Tech. Rep. TR 38.801, Mar. 2016, https://www.3GPP.org
[93] T. X. Vu, H. D. Nguyen, and T. Q. S. Quek, “Adaptive Compression and Joint Detection for Fronthaul Uplinks in Cloud Radio Access Networks,” IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 11, Nov. 2015, pp. 4565–75.
[94] M. Tao et al., “Content-Centric Sparse Multicast Beamforming for Cache-Enabled Cloud RAN,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 9, Sept. 2016, pp. 6118–31.
[95] Y. Shi, J. Zhang, and K. B. Letaief, “CSI Overhead Reduction with Stochastic Beamforming for Cloud Radio Access Networks,” Proc. IEEE ICC, Sydney, Australia, June 2014, pp. 5165–70.
[96] Y. Cai, F. R. Yu, and S. Bu, “Dynamic Operations of Cloud Radio Access Networks (C-RAN) for Mobile Cloud Computing Systems,” IEEE Trans. Vehic. Tech., vol. 65, no. 3, Mar. 2016, pp. 1536–48.
[97] P. Rost et al., “Cloud Technologies for Flexible 5G Radio Access Networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 5, May 2014, pp. 68–76.
[98] Meiko Jensen, J¨org Schwenk, Horst, G¨ortz ,Nils Gruschka, Luigi Lo Iacono “On Technical Security Issues in Cloud Computing”, IEEE International Conference on Cloud Computing, 2009
[99] Dave LeClair, “The Edge of Computing: It's Not All About the Cloud”, Inovation Insights,July,2014
[100] Yuyi Mao, Changsheng You, Jun Zhang, Kaibin Huang, and Khaled B. Letaief, "A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective", IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. 19, NO. 4, Fourth Quarter 2017
[101] ETSI, “Mobile-edge computing—Introductory technical white paper,” WhitePaper, Sophia Antipolis, France, Sep. 2014, https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobile-edge_computing_-_introductory_technical_white_paper_v1%2018-09-14.pdf
[102] G. P. Fettweis, “The tactile Internet: Applications and challenges,” IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 9, no. 1, pp. 64–70, Mar. 2014.
[103] A. A. Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 4th Quart., 2015.
[104] Juniper, Sunnyvale, “Smart wireless devices and the Internet of me,” White Paper, CA, USA, Mar. 2015, http://itersnews.com/wp-content/uploads/experts/2015/03/96079Smart-Wireless-Devices-and-the-Internet-of-Me.pdf
[105] Nasir Abbas, Yan Zhang, Amir Taherkordi and Tor Skeie, "Mobile Edge Computing: A Survey", IEEE Internet of Thing Journal, Vol.5, No.1, Feb 2018
[106] Y. Jararweh et al., “The future of mobile cloud computing: Integrating cloudlets and mobile edge computing,” in Proc. 23rd Int. Conf. Telecommun. (ICT), Thessaloniki, Greece, May 2016, pp. 1–5.
[107] D. Satria, D. Park, and M. Jo, “Recovery for overloaded mobile edge computing,” Future Gener. Comput. Syst., vol. 70, pp. 138–147, May 2017, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X16302096
[108] M. Patel et al., “Mobile-edge computing—Introductory technical white paper,” White Paper, Mobile-Edge Computing (MEC) Industry Initiative, 2014.
[109] CommVerge. “Radio Access Network (RAN) Optimization”, Sep. 19, 2016, http://www.commverge.com/Solutions/SubscribersServicesManagement/RANOptimization/tabid/174/Default.aspx
[110] M. T. Beck, M. Werner, S. Feld, and S. Schimper, “Mobile edge computing: A taxonomy,” in Proc. 6th Int. Conf. Adv. Future Internet, 2014, pp. 48–54.
[111] C.-K. Park, “Performance for radio access network in mobile backhaul network,” J. Inst. Internet Broadcast. Commun., vol. 12, no. 6, pp. 297–302, 2012.
[112] Brocade, “Brocade and the Mobile Edge”, Oct. 3, 2016, https://www.brocade.com/content/dam/common/documents/content-types/solution-brief/brocade-and-themobile-edge-sb.pdf
[113] J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, “Cloud radio access network (C-RAN): A primer,” IEEE Netw., vol. 29, no. 1, pp. 35–41, Jan./Feb. 2015.
[114] T. H. Luan, L. Gao, Z. Li, Y. Xiang, and L. Sun, “Fog computing: Focusing on mobile users at the edge,” CoRR, abs/1502.01815, 2015.
[115] ETSI ISG MEC, “Mobile-Edge Computing, Introductory Technical White Paper”, September 2014
[116] Patrick McGary, “Why Edge Computing Is Here To Stay: Five Use Cases”, RTInsights.com, Oct. 2015
[117] Cisco, “The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything,” White Paper, San Jose, CA, USA, Apr. 2011, https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
[118] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher, and V. Young, “Mobile edge computing - A key technology towards 5G,” White Paper, ETSI, Sophia Antipolis, France, Sept. 2015.
[119] ERICSSON, “5G radio access—Capabilities and technologies,” White Paper, Stockholm, Sweden, Apr. 2016, https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g.pdf

[120] 3GPP, “Technical specification group services and system aspects; System architecture for the 5G systems; Stage 2 (Release 15),” 3GPP Standard TS 23.501 V0.4.0, Apr. 2017, https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144
[121] NGMN Alliance, “Description of network slicing concept,”, San Diego, CA, USA, Jan. 2016, https://www.ngmn.org/uploads/media/160113_Network_Slicing_v1_0.pdf
[122] A. Nakao, “Network softwarization and slicing: Ongoing developments in standard developing organizations,” presented at the Keynote IEEE Conf. Stand. Commun. Netw. (CSCN) Berlin, Germany, Oct./Nov. 2016, http://cscn2016.ieee-cscn.org/document.pdf
[123] Bonomi, Flavio, et al. "Fog computing and its role in the internet of things." Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. ACM, Helsinki, Finland, 2012, pp. 13--16
[124] OpenFog Consortium 2015, http://www.openfogconsortium.org/resources/#definition-of-fog-computing
[125] L.M. Vaquero, L.Rodero-Merino, “Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing”, ACM SIGCOMM Computer Comm. Review, Vol. 44, No 5, October 2014
[126] Ricard Vilalta, Victor López, Alessio Giorgetti, Shuping Peng, Vittorio Orsini, Luis Velasco, René Serral-Graciá, Donal Morris, Silvia De Fina, Filippo Cugini, Piero Castoldi, Arturo Mayoral, Ramon Casellas, Ricardo Martínez, Christos Verikoukis, and Raul Muñoz, "TelcoFog: A Unified Flexible Fog and Cloud Computing Architecture for 5G Networks", IEEE Communications Magazine, Aug. 2017
[127] J. Halpern and C. Pignataro, “Service Function Chaining (SFC) Architecture,” IETF RFC 7665, Oct 2015.
[128] Cloud Security Alliance, “Top Threat to Cloud Computing V1.0,” March 2010, https://cloudsecurityalliance.org/topthreats/csathreats.v1.0.pdf
[129] Muqtyar Ahmed, P. Namratha, C. Nagesh, “Prevention Of Malicious Insider In The Cloud Using Decoy Documents”, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 4, April - 2013
[130] K. Zunnurhain and S. Vrbsky, “Security Attacks and Solutions in Clouds,” 2nd IEEE InternationalConference on Cloud Computing Technology and Science, Indianapolis, December 2010.
[131] Gehana Booth, Andrew Soknacki, and Anil Somayaji “Cloud Security: Attacks and Current Defenses”, 8 th ANNUAL SYMPOSIUM ON INFORMATION ASSURANCE (ASIA’13), JUNE 4-5, 2013, ALBANY, NY
[132] W. John et al, “Research Directions in Network Service Chaining,” 2013 IEEE SDN for Future Networks and Services, Nov. 2013, pp. 1–7.
[133] G. S. Aujla et al, “Data Offloading in 5G-Enabled Software-Defined Vehicular Networks: A Stackelberg Game-Based Approach,” IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 7, July 2017.
[134] Rajat Chaudhary, Neeraj Kumar, and Sherali Zeadally, "Network Service Chaining in Fog and Cloud Computing for the 5G Environment: Data Management and Security Challenges", IEEE Communications Magazine, Nov. 2017
[135] S. Sarkar, S. Chatterjee, and S. Misra, “Assessment of the Suitability of Fog Computing in the Context of Internet of Things,” IEEE Trans. Cloud Computing, vol. PP, no. 99, 201, pp. 1–15.
[136] M. Peng et al, “Fog-Computing Based Radio Access Networks: Issues and Challenges,” IEEE Network, vol. 30, no. 4, July 2016, pp. 46–53.
[137] M. Satyanarayanan, P. Bahl, R. Caceres, and N. Davies, “The case for VM-based cloudlets in mobile computing,” IEEE Pervasive Comput., vol. 8, no. 4, pp. 14–23, Oct./Dec. 2009.
[138] GSMA Intelligence, “Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile,”, London, U.K., Dec. 2014, https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download
[139] A. Somov and R. Giaffreda, “Powering IoT devices: Technologies and opportunities,” IEEE IoT Newslett., Nov. 2015, http://iot.ieee.org/newsletter/november-2015/poweringiot-devices-technologies-and-opportunities.html
[140] R. Kemp et al., “eyeDentify: Multimedia cyber foraging from a smartphone,” in Proc. IEEE Int. Symp. Multimedia, San Diego, CA, USA, Dec. 2009, pp. 392–399.
[141] B. Shi, J. Yang, Z. Huang, and P. Hui, “Offloading guidelines for augmented reality applications on wearable devices,” in Proc. ACM Int. Symp. Multimedia, Brisbane, QLD, Australia, Oct. 2015, pp. 1271–1274.
[142] W. N. Schilit, “A system architecture for context-aware mobile computing,” Ph.D. dissertation, Graduate School Arts Sci., Columbia Univ., New York, NY, USA, 1995
[143] S. Nunna et al., “Enabling real-time context-aware collaboration through 5G and mobile edge computing,” in Proc. IEEE Int. Conf. Inf. Technol. New Gener. (ITNG), Las Vegas, NV, USA, Apr. 2015, pp. 601–605.
[144] X. Luo, “From augmented reality to augmented computing: A look at cloud-mobile convergence,” in Proc. IEEE Int. Symp. Ubiquitous Virtual Reality, Gwangju, South Korea, Jul. 2009, pp. 29–32.

[145] A. Thiagarajan, L. Ravindranath, H. Balakrishnan, S. Madden, and L. Girod, “Accurate, low-energy trajectory mapping for mobile devices,” in Proc. USENIX Symp. Netw. Syst. Design Implement. (NSDI), Boston, MA, USA, Mar./Apr. 2011, pp. 267–280.
[146] H. Suo, Z. Liu, J. Wan, and K. Zhou, “Security and privacy in mobile cloud computing,” in Proc. IEEE Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf. (IWCMC), Cagliari, Italy, Jul. 2013, pp. 655–659.
[147] ETSI. “Mobile-edge computing (MEC); Service scenarios,”, Sophia Antipolis, France, Nov. 2015, http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC-IEG/001_099/004/01.01.01_60/gs_MEC-IEG004v010101p.pdf
[148] K.P.Saharan A.Kumar “Fog in Comparison to Cloud: A Survey”, Int’l. Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 122 – No.3, July 2015
[149] Suzanne Rankine, “The Differences Between Mobile Edge Computing and Fog Computing”, https://blog.meccongress.com/mobile-edge-computing/the-differences-between-mobile-edge-computing-and-fog-computing/, Aug 2016
[150] Wikipedia, “Internet Of Things”, https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
[151] Cisco, "How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything", White Paper, The Internet of Things April 2011, https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
[152] Swadesh Chaulya G. M. Prasad , “Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas”. Elsevier, 2016
[153] H. Tschofenig, et. all, “Architectural Considerations in Smart Object Networking”, Tech. no. RFC 7452., https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7452.txt, Mar 2015
[154] Duffy Marsan, Carolyn. “IAB Releases Guidelines for Internet-of-Things Developers.” IETF Journal 11.1 (2015): 6-8. Internet Engineering Task Force, July 2015. Web. https://www.internetsociety.org/sites/default/files/Journal_11.1.pdf
[155] Samsung Corp Web, “Samsung Privacy Policy--SmartTV Supplement”, Sept. 2015 http://www.samsung.com/sg/info/privacy/smarttv/
[156] Christos Stergiou, Kostas E. Psannis , Byung-Gyu Kim, Brij Gupta, “Secure integration of IoT and Cloud Computing”, December 2016, https://www.researchgate.net/profile/Christos_Stergiou/publication/311338093_Secure_integration_of_IoT_and_Cloud_Computing/links/59d633a9aca27213df9e7281/Secure-integration-of-IoT-and-Cloud-Computing.pdf
[157] SmartTHings, “Getting started”, https://www.smartthings.com/getting-started
[158] Prof. Ravindra P. Shelkikar, Prof. Nitin S.Wagh “REVIEW PAPER BASED ON WOMEN TRACKING DEVICE USING CONCEPT OF “INTERNET OF THINGS”, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), Volume 5, Issue 2, February 2016, http://www.ijaiem.org/Volume5Issue2/IJAIEM-2016-02-20-18.pdf
[159] Ovidiu Vermesan and Peter Friess, “Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment”, River Publishers 2014, http://internet-of-things-research.eu/pdf/IoT-From%20Research%20and%20Innovation%20to%20Market%20Deployment_IERC_Cluster_eBook_978-87-93102-95-8_P.pdf