ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
& ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΚΑΘΟΡΙΖΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

SOFTWARE DEFINED NETWORKING

Σταματόπουλος Κωνσταντίνος Α.Μ: 11856

Επιβλέπουσα : Σπυριδούλα Μαργαρίτη

Άρτα 2021

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Σχολή **Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών**

Τμήμα **Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΚΑΘΟΡΙΖΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

SOFTWARE DEFINED NETWORKING

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ

Α.Μ: 11856

Επιβλέπουσα :

ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ ΜΑΡΓΑΡΙΤΗ

Άρτα 2021

SOFTWARE DEFINED NETWORKING

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 09 / 04 / 2021

Επιτροπή αξιολόγησης

1. Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Σπυριδούλα Μαργαρίτη,

ΕΔΙΠ, Α

2. Μέλος επιτροπής

Ελευθέριος Στεργίου,

ΔΕΠ, Αναπληρωτής Καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Δημήτριος Λιαροκάπης,

ΔΕΠ, Λέκτορας

Ο Προϊστάμενος του Τμήματος

Γλαβάς Ευριπίδης,

ΔΕΠ, Καθηγητής

Υπογραφή

Δήλωση πνευματικής ιδιοκτησίας

Η παρούσα εργασία αποτελεί προϊόν αποκλειστικά δικής μου προσπάθειας. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία και γίνεται ρητή αναφορά σε αυτές μέσα στο κείμενο όπου έχουν χρησιμοποιηθεί.

……..

Σταματόπουλος Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

5ο Κεφάλαιο : Υλοποίηση

6ο Κεφάλαιο : Συμπεράσματα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Όντας σε επαφή με τον χώρο των δικτύων και κινούμενοι στον χώρο των υπολογιστών γενικότερα, μπορούμε εύκολα να αντιληφθούμε την τάση που υπάρχει προς την ανάπτυξη των τεχνολογιών των δικτύων, της εικονικοποίησης και τον προγραμματισμό αυτών. Πρόκειται για τεχνολογίες που ήδη μέσα από διάφορα εργαλεία και υπηρεσίες βρίσκονται στην καθημερινότητα των περισσότερων χρηστών Η/Υ. Καθώς όμως οι έννοιες αυτές γνωρίζουν όλο και μεγαλύτερη διεύρυνση, τίθεται επιτακτικά το θέμα της παραμετροποίησης των δικτύων ώστε να ανταποκριθούν στην αύξηση της κίνησης των σημερινών και μελλοντικών χρηστών. Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό να κάνουμε μια γενικευμένη παρουσίαση των δικτύων, της τεχνολογίας της εικονικοποίησης, της εικονικοποίησης δικτύων και της καθοριζόμενης από το λογισμικό δικτύωσης. Έπειτα θα προσπαθήσουμε να δείξουμε ποια είναι η χρήση και οι σκοποί τους, σε τι βαθμό έχουν εξελιχθεί αυτά από το παρελθόν και την πρώτη εμφάνιση τους μέχρι και σήμερα και κάποιες ήδη εφαρμοσμένες υλοποιήσεις. Τέλος και κατόπιν συλλογής των αποτελεσμάτων τις υλοποίησης μας για τα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό, θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε αν βρίσκουν εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο και που και αν είναι όντως κάτι που χρειάζεται και θα βοηθήσει στον τομέα των δικτύων ή είναι μια παροδική τεχνολογία;

Λέξεις κλειδιά : Δίκτυα, Εικονικοποίηση, Πρωτόκολλα Δικτύων, Λογισμικό, Υλοποιήσεις

ABSTRACT

By being in touch with the area of the networks and moving in the field of computers in general, we can easily understand the trend towards the development of network technologies, their virtualization and their programming. These are technologies that already exist through various tools and services found in the daily routine of most computer users. However, as these concepts are becoming increasingly widespread, the issue of network parameterization is urgently needed to respond to the growth of current and future users. This thesis aims to make a generalized presentation of networks, virtualization technology, network virtualization and software-defined networks. Then we will try to show what their use and purposes are, how far they have evolved from the past and their first appearance until today and some already implemented implementations. Finally, and after collecting the results of our implementation for software-defined networks, we will try to analyze whether they are applicable in the real world and where and if it is really something that needs and will help in the field of networks or is it a transitory technology?

Keywords: Networks, Virtualization, Network Protocols, Software, Implementations

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

H/Y	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
ADS	Active Directory Services
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
API	Application Program Interface
ARP	Address Resolution Protocol
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AVG	Average
BGP	Border Gateway Protocol
CAN	Controller Area Network
CDMA	Code Division Multiple Access
CPU	Central Processing Unit
DaaS	Data as a Service
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DPI	Deep Packet Inspection
EDGE	Enhanced Data GSM Environment
FAWG	Forwarding Abstractions Working Group
ForCES	Forwarding and Control Element Separation Working Group
Gbit/s	One Trillion Bits per Second
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
HVDs	High Voltage Distribution System
IaaS	Infrastructure as a Service
ICMP	Internet Control Message Protocol
iDEN	Integrated Digital Enhanced Network
IDS	Intrusion Detection System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
IPS	Intrusion Prevention System
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
IrDA	Infrared Data Association
ISP	Internet Service Provider
kWh	Kilowatt per Hour
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control Address
MAN	Metropolitan Area Network
MAX	Maximum
Mbit/s	One Million Bits per Second
MIN	Minimum

MMF	Multi Mode Fiber Optic Cable
MS	Millisecond
NaaS	Network as a Service
NDMs	Negotiable Datapath Models
NFV	Network Functions Virtualization
NIC	Network interface controller
NOS	Network Operating System
NPL	Network Protocol Library
OF	OpenFlow Protocol
ONF	Open Network Foundation
OSGi	Open Service Gateway Initiative
OSI	Open Systems Interconnection
OTWG	Operations and Technology Working Group
PaaS	Platform as a Service
PAN	Personal Area Network
PCE	Path Computation Element
PCM	Pulse-Code Modulation
PCS	Personal Communications Service
POF	Point Of Failure
PTR	Packet Transmission Rate
QoS	Quality of Service
RAM	Random-Access Memory
REST	Representational State Transfer
RTT	Round-Trip Time
SaaS	Software as a Service
SAGE	Semi-Automatic Ground Environment
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDON	Software-Defined Optical Network
SDN	Software-Defined Network
SMF	Single Mode Fiber Optic Cable
SONET	Synchronous Optical Network Technologies
SSH	Secure Shell
STP	Shielded Twisted Pair
TCP / IP	Transmission Control Protocol (with Internet Protocol)
TDMA	Time Division Multiple Access
TLS	Transport Layer Security
UCaaS	Unified Communications as a Service
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTP	Unshielded Twisted Pair
VE	Virtual Environments
VLAN	Virtual Local Area Networks
VM	Virtual Machine
WAN	Wide Area Network
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWW	World Wide Web

1ο Κεφάλαιο : Εισαγωγή

1.1 Κατηγορίες δικτύων

Ένα δίκτυο υπολογιστών ή δίκτυο δεδομένων είναι ένα δίκτυο ψηφιακών τηλεπικοινωνιών που επιτρέπει στους κόμβους να μοιράζονται πόρους. Στα δίκτυα υπολογιστών, οι υπολογιστικές συσκευές ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους χρησιμοποιώντας συνδέσεις (συνδέσεις δεδομένων) μεταξύ κόμβων. Αυτές οι συνδέσεις δεδομένων δημιουργούνται μέσω καλωδιακών μέσων όπως καλώδια ή οπτικά καλώδια ή ασύρματα μέσα όπως WiFi.

Οι συσκευές υπολογιστών δικτύου που δημιουργούν, δρομολογούν και τερματίζουν τα δεδομένα ονομάζονται κόμβοι δικτύου. Οι κόμβοι αναγνωρίζονται από διευθύνσεις δικτύου και μπορούν να περιλαμβάνουν κεντρικούς υπολογιστές, όπως προσωπικούς υπολογιστές, τηλέφωνα και διακομιστές, καθώς και υλικό δικτύωσης, όπως δρομολογητές και μεταγωγείς. Δύο τέτοιες συσκευές μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι συνδεδεμένες σε δίκτυο όταν μια συσκευή είναι σε θέση να ανταλλάσσει πληροφορίες με την άλλη συσκευή, ανεξάρτητα από το αν έχουν άμεση σύνδεση μεταξύ τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για συγκεκριμένες εφαρμογές είναι στρωματοποιημένα (δηλαδή μεταφέρονται ως ωφέλιμο φορτίο) σε σχέση με άλλα γενικότερα πρωτόκολλα επικοινωνιών. Αυτή η εκπληκτική συλλογή της τεχνολογίας πληροφοριών απαιτεί εξειδικευμένη διαχείριση δικτύου για να διατηρηθεί η λειτουργία όλων αξιόπιστα.

Τα δίκτυα υπολογιστών υποστηρίζουν έναν τεράστιο αριθμό εφαρμογών και υπηρεσιών, όπως πρόσβαση στο World Wide Web, ψηφιακό βίντεο, ψηφιακό ήχο, κοινή χρήση διακομιστών εφαρμογών και αποθήκευσης, εκτυπωτές και συσκευές φαξ και χρήση εφαρμογών ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και άμεσων μηνυμάτων καθώς και πολλοί άλλοι. Τα δίκτυα υπολογιστών διαφέρουν στο μέσο μετάδοσης που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των σημάτων τους, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για την οργάνωση της κυκλοφορίας δικτύου, το μέγεθος του δικτύου, την τοπολογία, τον μηχανισμό ελέγχου της κυκλοφορίας και την οργανωτική πρόθεση. Το πιο γνωστό δίκτυο υπολογιστών είναι το διαδίκτυο [1].

Η δικτύωση υπολογιστών μπορεί να θεωρηθεί κλάδος της ηλεκτρολογίας, της ηλεκτρονικής, των τηλεπικοινωνιών, της επιστήμης των Η/Υ, της πληροφορικής ή της μηχανικής πληροφορικής, δεδομένου ότι βασίζεται στη θεωρητική και πρακτική εφαρμογή των σχετικών επιστημονικών κλάδων.

Ένα δίκτυο υπολογιστών διευκολύνει τις διαπροσωπικές επικοινωνίες που επιτρέπουν στους χρήστες να επικοινωνούν αποτελεσματικά και εύκολα μέσω διαφόρων μέσων: ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων, online συνομιλία, τηλέφωνο, τηλεφωνικές κλήσεις βίντεο και τηλεδιάσκεψη. Ένα δίκτυο επιτρέπει την κοινή χρήση πόρων δικτύου και υπολογιστών. Οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση και να χρησιμοποιούν πόρους που παρέχονται από συσκευές στο δίκτυο, όπως εκτύπωση εγγράφου σε κοινόχρηστο εκτυπωτή δικτύου ή χρήση συσκευής κοινής αποθήκευσης. Ένα δίκτυο επιτρέπει την κοινή χρήση αρχείων, δεδομένων και άλλων τύπων πληροφοριών που παρέχουν στους εξουσιοδοτημένους χρήστες τη δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε άλλους υπολογιστές του δικτύου. Ο κατανεμημένος υπολογιστής χρησιμοποιεί υπολογιστικούς πόρους σε ένα δίκτυο για την εκτέλεση εργασιών.

Ένα δίκτυο υπολογιστών μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χάκερ ασφαλείας για την ανάπτυξη ιών υπολογιστών ή κακόβουλου λογισμικού σε συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο ή για να αποτρέψει την πρόσβαση αυτών των συσκευών στο δίκτυο μέσω επίθεσης άρνησης εξυπηρέτησης [2].

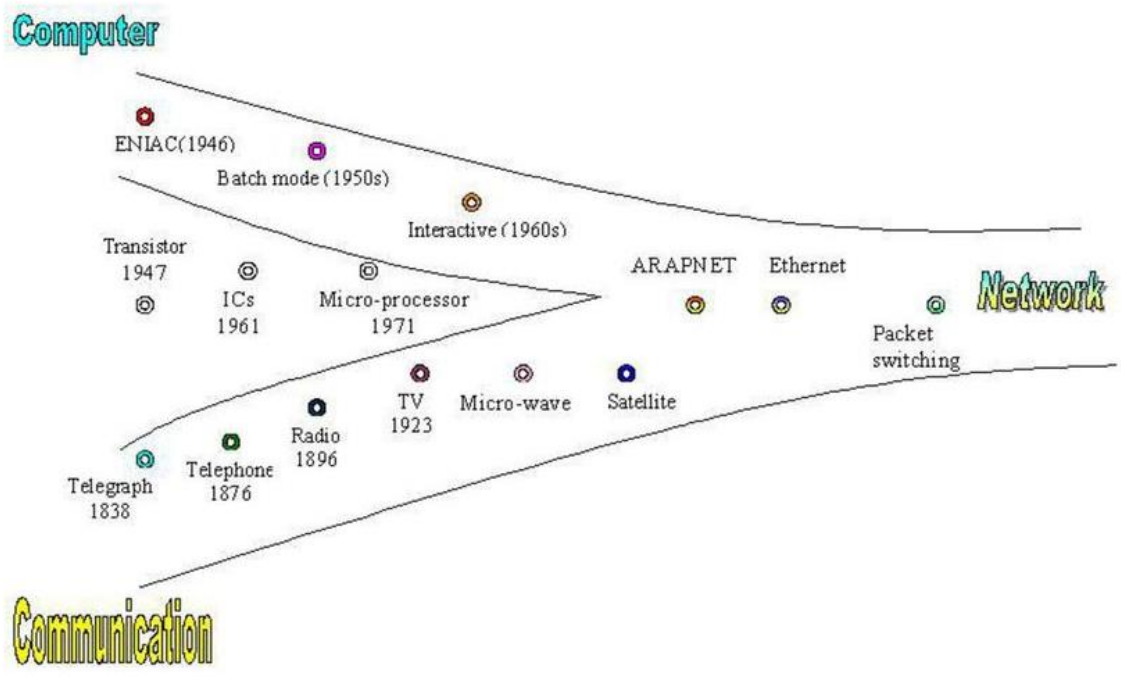
Εικόνα 1 : Τοπολογία Δικτύου

1.2 Η ιστορική εξέλιξη των δικτύων μέχρι σήμερα

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, τα πρώιμα δίκτυα υπολογιστών περιλάμβαναν το στρατιωτικό σύστημα ραντάρ των Η.Π.Α. Semi-Automatic Ground Environment (SAGE). Το 1959, ο Anatolii Ivanovich Kitov πρότεινε στην Κεντρική Επιτροπή του Κομμουνιστικού Κόμματος της Σοβιετικής Ένωσης, ένα λεπτομερές σχέδιο για την αναδιοργάνωση του ελέγχου των σοβιετικών ενόπλων δυνάμεων και της σοβιετικής οικονομίας με βάση ένα δίκτυο υπολογιστικών κέντρων, το OGAS. Το 1963, ο J. C. R. Licklider απέστειλε ένα υπόμνημα στους συναδέλφους του γραφείου, το οποίο συζήτησε την έννοια του "Δια γαλαξιακού Δικτύου Υπολογιστών", ενός δικτύου υπολογιστών που προορίζεται να επιτρέψει γενικές επικοινωνίες μεταξύ χρηστών ηλεκτρονικών υπολογιστών. Το 1964 στο τεχνολογικό ινστιτούτο της Μασαχουσέτης, μια ερευνητική ομάδα υποστηριζόμενη από τη General Electric και την Bell Labs χρησιμοποίησε έναν υπολογιστή για τη δρομολόγηση και τη διαχείριση τηλεφωνικών συνδέσεων. Σε όλη τη δεκαετία του 1960, ο Paul Baran και ο Donald Davies ανέπτυξαν την έννοια της μεταγωγής πακέτων για να μεταφέρουν πληροφορίες μεταξύ υπολογιστών μέσω ενός δικτύου. Ο Davies πρωτοστάτησε στην εφαρμογή της έννοιας με το δίκτυο NPL, ένα τοπικό δίκτυο στο Εθνικό Εργαστήριο Φυσικής (Ηνωμένο Βασίλειο) με ταχύτητα γραμμής 768 kbit/s [3][4].

Το 1966, ο Thomas Marill και ο Lawrence G. Roberts δημοσίευσαν μία έρευνα για ένα πειραματικό δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN) για την κοινή χρήση του υπολογιστή [5]. Το 1969, οι πρώτοι τέσσερις κόμβοι του ARPANET συνδέθηκαν χρησιμοποιώντας κυκλώματα 50 kbit/s μεταξύ του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια στο Λος Άντζελες, του Ινστιτούτου Ερευνών Stanford, του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια στη Σάντα Μπάρμπαρα και του Πανεπιστημίου της Γιούτα. Ο Leonard Kleinrock πραγματοποίησε θεωρητικές εργασίες για να μοντελοποιήσει την απόδοση των δικτύων μεταγωγής πακέτων, τα οποία στήριξαν την ανάπτυξη του ARPANET. Το θεωρητικό του έργο σχετικά με την ιεραρχική δρομολόγηση στα τέλη της δεκαετίας του 1970 με τον σπουδαστή Farouk Kamoun παραμένει σημαντικό για τη λειτουργία του Διαδικτύου σήμερα [6]. Το 1972, αναπτύχθηκαν εμπορικές υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το X.25 και αργότερα χρησιμοποιήθηκαν ως υποκείμενη υποδομή για την επέκταση των δικτύων TCP / IP. Το 1973, το γαλλικό δίκτυο CYCLADES ήταν το πρώτο που έκανε τους πομπούς υπεύθυνους για την αξιόπιστη παράδοση δεδομένων, αντί να είναι μια κεντρική υπηρεσία του ίδιου του δικτύου.

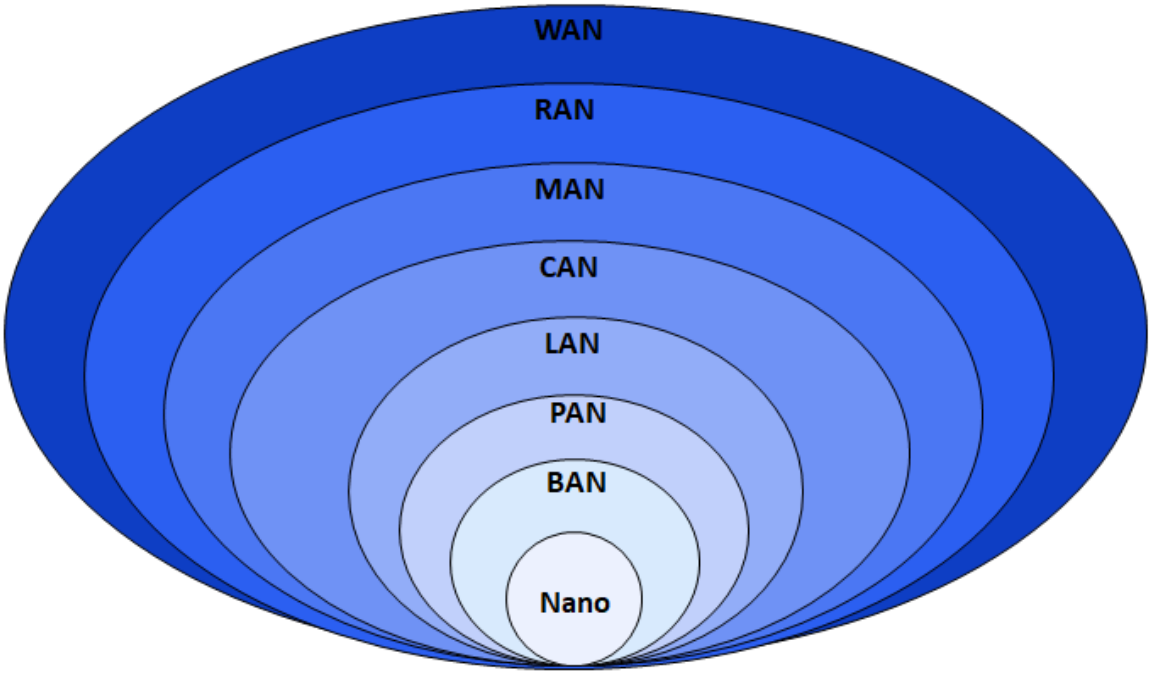
Το 1973, ο Robert Metcalfe έγραψε ένα επίσημο σημείωμα στο Xerox PARC που περιγράφει το Ethernet, ένα σύστημα δικτύου που βασίστηκε στο δίκτυο Aloha, που αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1960 από τον Norman Abramson και τους συναδέλφους του στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης. Τον Ιούλιο του 1976, ο Robert Metcalfe και ο David Boggs δημοσίευσαν την έρευνα τους "Ethernet: Distributed Packet Switching για τοπικά δίκτυα υπολογιστών" και συνεργάστηκαν σε διάφορα διπλώματα ευρεσιτεχνίας που ελήφθησαν το 1977 και το 1978. Το 1979 ο Robert Metcalfe συνέχισε να καθιστά το Ethernet σταθερό πρότυπο. Το 1995, η χωρητικότητα ταχύτητας μετάδοσης για Ethernet αυξήθηκε από 10 Mbit/s σε 100 Mbit/s. Το 1998, το Ethernet υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ενός Gigabit. Στη συνέχεια, προστέθηκαν υψηλότερες ταχύτητες μέχρι 400 Gbit/s (από το 2018). Η ικανότητα του Ethernet να κλιμακώνεται εύκολα (όπως η γρήγορη προσαρμογή για να υποστηρίζει νέες ταχύτητες καλωδίων οπτικών ινών) συντελεί στη συνέχιση της χρήσης του [7].



Εικόνα 2 : Η εξέλιξη των δικτύων

2ο Κεφάλαιο : Δίκτυα

2.1 Κατηγορίες δικτύων



Εικόνα 3 : Δίκτυα δεδομένων ανά χωρικό πεδίο

Ένα νανοδίκτυο (Nanonetwork) ή δίκτυο νανοκλίμακας είναι ένα σύνολο διασυνδεδεμένων νανομηχανών (συσκευές που έχουν μερικές εκατοντάδες νανόμετρα ή μερικά μικρόμετρα το πολύ σε μέγεθος), οι οποίες είναι σε θέση να εκτελούν μόνο πολύ απλές εργασίες, όπως υπολογισμούς, αποθήκευση δεδομένων, ανίχνευση και ενεργοποίηση. Τα νανοδίκτυα αναμένεται να επεκτείνουν τις δυνατότητες των απλών νανομηχανών τόσο από την άποψη της πολυπλοκότητας όσο και της εμβέλειας λειτουργίας, επιτρέποντάς τους να συντονίζουν, να μοιράζονται και να συγχωνεύουν πληροφορίες. Τα νανοδίκτυα εφαρμόζουν νέες εφαρμογές νανοτεχνολογίας στον τομέα της βιοϊατρικής, της έρευνας του περιβάλλοντος, στην στρατιωτική τεχνολογία και στις εφαρμογές βιομηχανικών και καταναλωτικών αγαθών. Η επικοινωνία νανοκλίμακας ορίζεται στο IEEE P1906.1 [8].

Ένα προσωπικό δίκτυο περιοχής (PAN) είναι ένα δίκτυο υπολογιστών για τη διασύνδεση συσκευών με κέντρο το χώρο εργασίας ενός ατόμου. Ένα PAN παρέχει τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών όπως υπολογιστές, smartphones, tablet και προσωπικοί ψηφιακοί βοηθοί. Τα PAN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία μεταξύ των ίδιων των προσωπικών συσκευών ή για τη σύνδεση σε δίκτυο ανώτερου επιπέδου και στο Internet (uplink) όπου μια κύρια συσκευή αναλαμβάνει το ρόλο της πύλης. Ένα PAN μπορεί να μεταφερθεί μέσω ενσύρματων διασυνδέσεων όπως USB. Ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικών χώρων (WPAN) είναι ένα PAN που μεταφέρεται μέσω μιας τεχνολογίας ασύρματου δικτύου χαμηλής κατανάλωσης, όπως IrDA, Wireless USB, Bluetooth ή ZigBee. Η εμβέλεια ενός WPAN κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα [9].

Ένα τοπικό δίκτυο (LAN) είναι ένα δίκτυο που συνδέει υπολογιστές και συσκευές σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή, όπως ένα σπίτι, ένα σχολείο, ένα κτίριο γραφείων ή μία στενά τοποθετημένη ομάδα κτιρίων. Κάθε υπολογιστής ή συσκευή στο δίκτυο είναι ένας κόμβος. Τα ενσύρματα LAN είναι πιθανότατα βασισμένα στην τεχνολογία Ethernet. Τα νεότερα πρότυπα όπως το ITU-T G.hn παρέχουν επίσης έναν τρόπο να δημιουργηθεί ένα ενσύρματο LAN χρησιμοποιώντας υπάρχουσες καλωδιώσεις, όπως ομοαξονικά καλώδια, τηλεφωνικές γραμμές και γραμμές μεταφοράς ενέργειας. Τα καθοριστικά χαρακτηριστικά ενός LAN δικτύου περιλαμβάνουν υψηλότερα ποσοστά μεταφοράς δεδομένων, περιορισμένο γεωγραφικό εύρος και έλλειψη εξάρτησης από μισθωμένες γραμμές για την παροχή συνδεσιμότητας. Οι τρέχουσες τεχνολογίες Ethernet ή άλλες τεχνολογίες IEEE 802.3 LAN λειτουργούν με ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων μέχρι 100 Gbit/s, τυποποιημένες από το IEEE το 2010. Επί του παρόντος, αναπτύσσεται 400 Gbit/s Ethernet. Οι ιστορικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν το ARCNET, το Token ring και το AppleTalk.

Ένα δίκτυο μεγέθους πανεπιστημιούπολης (CAN) αποτελείται από μια διασύνδεση των τοπικών δικτύων εντός μιας περιορισμένης γεωγραφικής περιοχής. Ο εξοπλισμός του δικτύου (μεταγωγείς, δρομολογητές) και τα μέσα μετάδοσης (οπτικές ίνες, εγκαταστάσεις χαλκού, καλώδια Cat5 κλπ.) ανήκουν σχεδόν εξ' ολοκλήρου στον ιδιοκτήτη / διαχειριστή της περιοχής (επιχείρηση, πανεπιστήμιο, κυβέρνηση κ.λπ.). Για παράδειγμα, ένα πανεπιστημιακό δίκτυο CAN είναι πιθανό να συνδέσει διάφορα κτίρια πανεπιστημιουπόλεων για να συνδέσει ακαδημαϊκά κολέγια ή τμήματα, τη βιβλιοθήκη και τις αίθουσες φοιτητών [10].

Το δίκτυο μητροπολιτικών περιοχών (MAN) είναι ένα δίκτυο υπολογιστών που διασυνδέει τους χρήστες με πόρους υπολογιστών σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή ή περιοχή μεγαλύτερη από αυτή που καλύπτεται από ένα μεγάλο τοπικό δίκτυο (LAN) αλλά μικρότερη από την περιοχή που καλύπτεται από ένα δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN). Ο όρος MAN εφαρμόζεται στην διασύνδεση δικτύων σε μια πόλη ή σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο το οποίο μπορεί να προσφέρει επίσης αποτελεσματική σύνδεση με ένα ευρύ δίκτυο. Ο όρος χρησιμοποιείται επίσης για να περιγράψει τη διασύνδεση πολλών τοπικών δικτύων σε μια μητροπολιτική περιοχή μέσω της χρήσης συνδέσεων από σημείο σε σημείο μεταξύ τους. Έχει μια έκταση από 5 έως 50 χιλιόμετρα.

Ένα ευρύ δίκτυο (WAN) είναι ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που εκτείνεται σε μεγάλη γεωγραφική απόσταση. Τα δίκτυα ευρείας περιοχής συχνά δημιουργούνται με κυκλώματα τηλεπικοινωνιών που εκμισθώνονται. Οι επιχειρηματικές, εκπαιδευτικές και κυβερνητικές οντότητες χρησιμοποιούν δίκτυα ευρείας περιοχής για να μεταδίδουν δεδομένα σε προσωπικό, σπουδαστές, πελάτες, αγοραστές και προμηθευτές από διάφορες τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο. Στην ουσία, αυτός ο τρόπος τηλεπικοινωνιών επιτρέπει σε μια επιχείρηση να πραγματοποιεί αποτελεσματικά την καθημερινή της λειτουργία ανεξάρτητα από την τοποθεσία. Το Διαδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί WAN [11].

Το Διαδίκτυο (Internet) είναι το παγκόσμιο σύστημα διασυνδεδεμένων δικτύων υπολογιστών που χρησιμοποιούν τη σουίτα πρωτοκόλλου Internet (TCP / IP) για τη σύνδεση συσκευών σε όλο τον κόσμο. Πρόκειται για ένα δίκτυο δικτύων που αποτελείται από ιδιωτικά, δημόσια, ακαδημαϊκά, επιχειρηματικά και κυβερνητικά δίκτυα τοπικού και παγκόσμιου πεδίου, που συνδέονται με ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών, ασύρματων και οπτικών τεχνολογιών δικτύωσης. Το Διαδίκτυο μεταφέρει ένα ευρύ φάσμα πληροφοριακών πόρων και υπηρεσιών, όπως τα αλληλένδετα έγγραφα υπερκειμένου και εφαρμογές του Παγκόσμιου Ιστού (WWW), ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τηλεφωνία και κοινή χρήση αρχείων.

Εικόνα 4 : Το Ίντερνετ

2.2 Μέσα μετάδοσης δικτύων

Τα μέσα μετάδοσης που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση συσκευών για τη δημιουργία ενός δικτύου υπολογιστών περιλαμβάνουν ηλεκτρικό καλώδιο, οπτικές ίνες και ραδιοκύματα. Η επικοινωνία γραμμής ισχύος χρησιμοποιεί την καλωδίωση ισχύος του κτιρίου για τη μετάδοση δεδομένων. Στο μοντέλο OSI, αυτά ορίζονται στα στρώματα 1 και 2, το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων.

2.2.1 Ενσύρματα μέσα μετάδοσης δικτύων

Ένα ευρέως δεδομένο μέσον μετάδοσης που χρησιμοποιούν στην τεχνολογία τοπικού δικτύου (LAN) είναι το γνωστό και ως Ethernet. Τα πρότυπα μέσων και πρωτοκόλλου που επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ δικτυωμένων συσκευών μέσω Ethernet καθορίζονται από το IEEE 802.3. Το Ethernet μεταδίδει δεδομένα μέσω καλωδίων χαλκού και ινών.

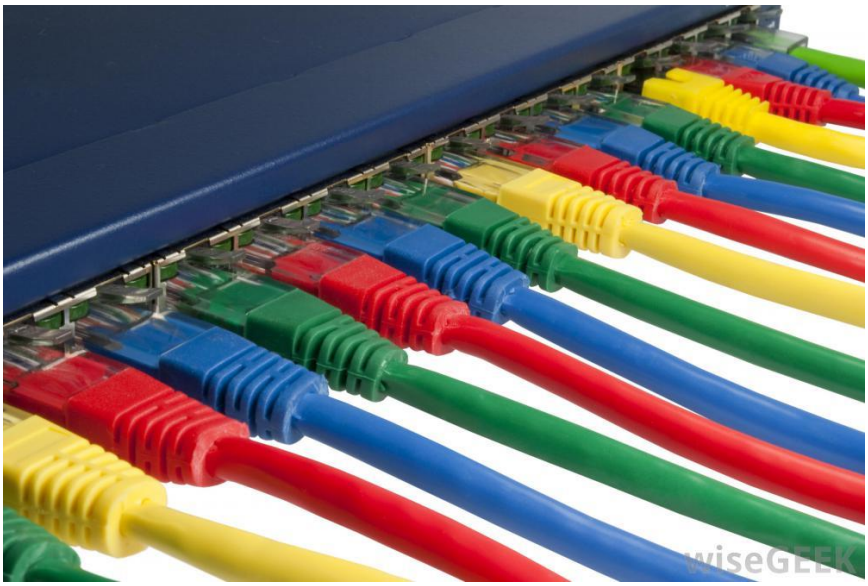
Το ομοαξονικό καλώδιο χρησιμοποιείται ευρέως για συστήματα καλωδιακής τηλεόρασης, κτίρια γραφείων και άλλα εργοτάξια για τοπικά δίκτυα. Η ταχύτητα μετάδοσης κυμαίνεται από 200 εκατομμύρια bits ανά δευτερόλεπτο έως περισσότερα από 500 εκατομμύρια bits ανά δευτερόλεπτο.

Η τεχνολογία ITU-T G.hn χρησιμοποιεί υπάρχουσες οικιακές καλωδιώσεις (ομοαξονικό καλώδιο, τηλεφωνικές γραμμές και γραμμές μεταφοράς ενέργειας) για τη δημιουργία ενός τοπικού δικτύου υψηλής ταχύτητας.

Η συνεστραμμένη ζεύξη καλωδίων χρησιμοποιείται για ενσύρματα Ethernet και άλλα πρότυπα. Συνήθως αποτελείται από 4 ζεύγη χάλκινων καλωδίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τη φωνή όσο και για τη μετάδοση δεδομένων. Η χρήση δύο καλωδίων που συσπειρώνονται μαζί συμβάλλει στη μείωση της διαβητικότητας και της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η ταχύτητα μετάδοσης κυμαίνεται από 2 Mbit/s έως 10 Gbit/s. Η συνεστραμμένη ζεύξη καλωδίων έρχεται σε δύο μορφές: μη θωρακισμένο συνεστραμμένο ζεύγος (UTP) και θωρακισμένο στριμμένο ζεύγος (STP). Κάθε μορφή διατίθεται σε διάφορες κατηγορίες, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε διάφορα σενάρια.

Μια οπτική ίνα είναι μια γυάλινη ίνα. Φέρνει παλμούς φωτός που αντιπροσωπεύουν δεδομένα. Μερικά πλεονεκτήματα των οπτικών ινών έναντι των μεταλλικών συρμάτων είναι πολύ χαμηλή απώλεια μετάδοσης και ανοσία στις ηλεκτρικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες μπορούν ταυτόχρονα να μεταφέρουν πολλαπλές ροές δεδομένων σε διαφορετικά μήκη κύματος φωτός, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το ρυθμό με τον οποίο μπορούν να αποστέλλονται δεδομένα έως τρισεκατομμύρια δυαδικών ψηφίων ανά δευτερόλεπτο. Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλες διαδρομές καλωδίων που μεταφέρουν πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και χρησιμοποιούνται για υποθαλάσσια καλώδια για τη διασύνδεση ηπείρων. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι οπτικών ινών, μιας οπτικής ίνας (SMF) μονής κατεύθυνσης και οπτικών ινών πολλαπλών λειτουργιών (MMF). Οι ίνες μονής κατεύθυνσης έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι σε θέση να διατηρούν ένα συνεκτικό σήμα για δεκάδες ή και εκατό χιλιόμετρα. Οι ίνες πολλαπλών λειτουργιών είναι φθηνότερο στην λειτουργία τους, αλλά περιορίζονται σε μερικές εκατοντάδες ή και μόνο μερικές δεκάδες μέτρα, ανάλογα με το ρυθμό δεδομένων και το βαθμού του καλωδίου.

Η τιμή αποτελεί βασικό παράγοντα που διακρίνει τις επιλογές ασύρματης και ασύρματης τεχνολογίας σε μια επιχείρηση. Οι επιλογές ασύρματης επικοινωνίας συμπεριλαμβάνουν ένα υψηλό κόστος που μπορεί να κάνει την αγορά ενσύρματων υπολογιστών, εκτυπωτών και άλλων συσκευών μια πιο προσιτή λύση. Οι ανάγκες των επιχειρήσεων και των εργαζομένων μπορεί να υπερισχύσουν τυχόν εκτιμήσεων κόστους.



Εικόνα 5 : Το καλώδιο Ethernet

2.2.2 Ασύρματα μέσα μετάδοσης δικτύων

Δορυφόροι επικοινωνιών - Οι δορυφόροι επικοινωνούν μέσω ραδιοκυμάτων, τα οποία δεν εκτρέπονται από την ατμόσφαιρα της Γης. Οι δορυφόροι σταθμεύουν στο διάστημα, συνήθως σε γεωσύγχρονη τροχιά 35.400 χλμ. (22.000 μίλια) πάνω από τον ισημερινό. Αυτά τα συστήματα Γης-τροχιάς είναι ικανά να λαμβάνουν και να αναμεταδίδουν φωνητικά, δεδομένα και τηλεοπτικά σήματα.

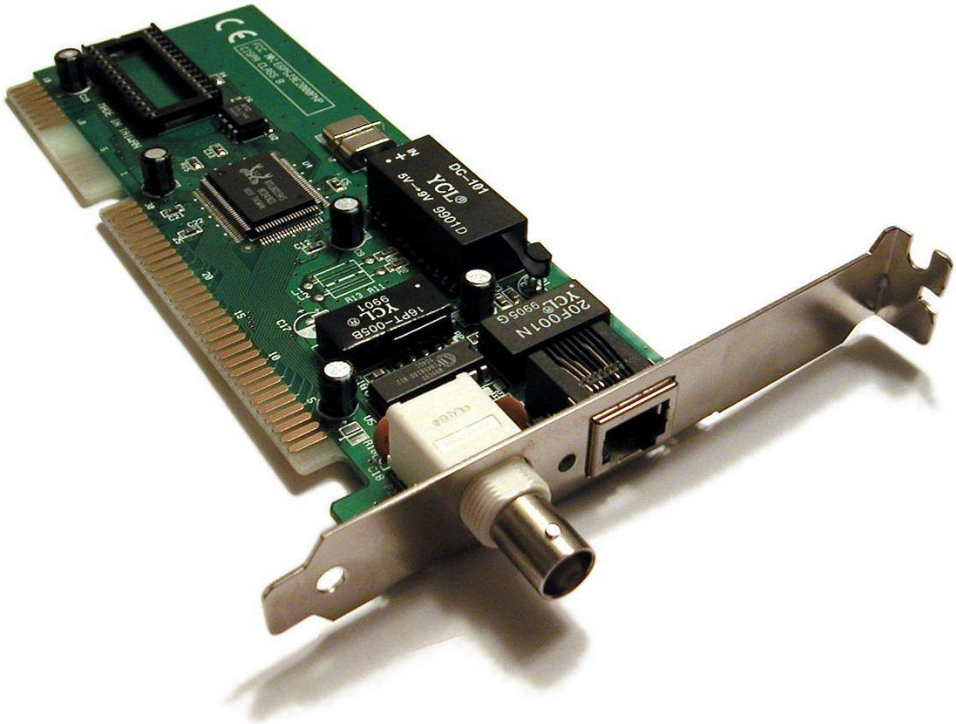
Τα κυψελοειδή και PCS συστήματα χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών. Τα συστήματα διαιρούν την περιοχή που καλύπτεται σε πολλαπλές γεωγραφικές περιοχές. Κάθε περιοχή διαθέτει έναν πομπό χαμηλής ισχύος ή μια κεραία ραδιοφωνικής αναμετάδοσης για την αναμετάδοση κλήσεων από μια περιοχή στην επόμενη περιοχή.

Τεχνολογίες ραδιοφώνου και ευρέος φάσματος - Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα χρησιμοποιούν ραδιοφωνική τεχνολογία υψηλής συχνότητας παρόμοια με την ψηφιακή κυψελοειδή και μια ραδιοφωνική τεχνολογία χαμηλής συχνότητας. Τα ασύρματα δίκτυα LAN χρησιμοποιούν τεχνολογία εξαπλωμένου φάσματος για να επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ πολλών συσκευών σε περιορισμένη περιοχή ή ραδιοκύματα ενώ άλλα χρησιμοποιούν υπέρυθρα σήματα ως μέσο μετάδοσης. Το IEEE 802.11 ορίζει μια κοινή συνιστώσα της ασύρματης τεχνολογίας ραδιοκυμάτων ανοιχτού κώδικα, γνωστή ως Wi-Fi.

Εικόνα 6 : Το πρότυπο ασύρματης μετάδοσης Wi-Fi

2.3 Συσκευές μετάδοσης δικτύων

Ένας ελεγκτής διεπαφής δικτύου (NIC) είναι ένα υλικό υπολογιστή που παρέχει στον υπολογιστή τη δυνατότητα πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης και έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας πληροφοριών δικτύου χαμηλού επιπέδου. Για παράδειγμα, η κάρτα δικτύου μπορεί να διαθέτει υποδοχή για την αποδοχή καλωδίου ή κεραία για ασύρματη μετάδοση και λήψη και τα σχετικά κυκλώματα. Η κάρτα δικτύου ανταποκρίνεται στην κίνηση που απευθύνεται σε μια διεύθυνση δικτύου είτε για την κάρτα δικτύου είτε για τον υπολογιστή ως σύνολο. Σε δίκτυα Ethernet, κάθε ελεγκτής διεπαφής δικτύου έχει μια μοναδική διεύθυνση ελέγχου πρόσβασης πολυμέσων (MAC), συνήθως αποθηκευμένη στη μόνιμη μνήμη του ελεγκτή. Για να αποφευχθούν οι διενέξεις διευθύνσεων μεταξύ συσκευών δικτύου, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) διατηρεί και διαχειρίζεται τη μοναδικότητα διευθύνσεων MAC. Το μέγεθος μιας διεύθυνσης Ethernet MAC είναι έξι οκτάδες. Οι τρεις πιο σημαντικές οκτάδες προορίζονται για τον εντοπισμό κατασκευαστών καρτών δικτύων. Αυτοί οι κατασκευαστές χρησιμοποιώντας μόνο τα προκαθορισμένα προθέματα τους, εκχωρούν μοναδικά τις τρεις ελάχιστα σημαντικές οκτάδες κάθε διεπαφής Ethernet που παράγουν [12].



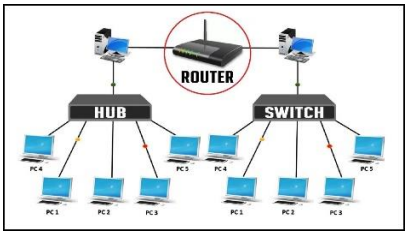
Εικόνα 7 : Ελεγκτής διεπαφής δικτύου (NIC)

Ένας αναμεταδότης είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που λαμβάνει σήμα δικτύου, καθαρίζει τον περιττό θόρυβο και αναμεταδίδει το σήμα. Το σήμα αναμεταδίδεται σε υψηλότερη στάθμη ισχύος ή στην άλλη πλευρά ενός εμποδίου, έτσι ώστε το σήμα να μπορεί να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς υποβάθμιση. Στις περισσότερες διαμορφώσεις Ethernet συνεστραμμένου ζεύγους, απαιτούνται αναμεταδότες για καλώδια που φτάνουν περισσότερα από 100 μέτρα. Με τις οπτικές ίνες, οι αναμεταδότες μπορούν να είναι δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες χιλιόμετρα [13].

Ένας αναμεταδότης με πολλαπλές θύρες είναι γνωστός ως διανομέας Ethernet. Οι αναμεταδότες λειτουργούν στο φυσικό επίπεδο του μοντέλου OSI. Οι αναμεταδότες απαιτούν μικρό χρονικό διάστημα για την αναμετάδοση του σήματος. Αυτό μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση διάδοσης που επηρεάζει την απόδοση του δικτύου και μπορεί να επηρεάσει τη σωστή λειτουργία. Ως αποτέλεσμα, πολλές αρχιτεκτονικές δικτύου περιορίζουν τον αριθμό αναμεταδοτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια σειρά, π.χ. τον κανόνα Ethernet 5-4-3 [14].

Οι διανομείς και οι αναμεταδότες σε τοπικά δίκτυα (LAN) έχουν ως επί το πλείστων ξεπερασθεί από τους σύγχρονους μεταγωγείς.

Μια γέφυρα δικτύου συνδέει και φιλτράρει την κυκλοφορία μεταξύ δύο τμημάτων δικτύου στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων (επίπεδο 2) του μοντέλου OSI για να σχηματίσει ένα ενιαίο δίκτυο. Αυτό διακόπτει τον τομέα σύγκρουσης του δικτύου αλλά διατηρεί έναν ενοποιημένο τομέα μετάδοσης. Ο κατακερματισμός του δικτύου καταστρέφει ένα μεγάλο, συνωστισμένο δίκτυο σε μια συνάθροιση μικρότερων και αποδοτικότερων δικτύων. Οι γέφυρες έρχονται σε τρεις βασικούς τύπους: Τις τοπικές γέφυρες για άμεση σύνδεση LAN και τις απομακρυσμένες γέφυρες όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία σύνδεσης δικτύου WAN μεταξύ LANs. Οι απομακρυσμένες γέφυρες, όπου η σύνδεση είναι πιο αργή από τα τελικά δίκτυα, έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από δρομολογητές. Οι ασύρματες γέφυρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδεθούν σε δίκτυο LAN ή να συνδέσουν απομακρυσμένες συσκευές σε δίκτυα LAN [14].



Εικόνα 8 : Δρομολογητής, γέφυρα και μεταγωγέας δικτύου

Ένας μεταγωγέας δικτύου είναι μια συσκευή που προωθεί και φιλτράρει πακέτα δεδομένων (πλαίσια) από το δεύτερο επίπεδο OSI μεταξύ θυρών με βάση τη διεύθυνση MAC του προορισμού σε κάθε πλαίσιο. Ένας μεταγωγέας είναι διαφορετικός από έναν διανομέα, επειδή προωθεί μόνο τα πλαίσια στις φυσικές θύρες που εμπλέκονται στην επικοινωνία και όχι σε όλες τις συνδεδεμένες θύρες. Μπορεί να θεωρηθεί ως γέφυρα πολλαπλών θυρών. Μαθαίνει να συσχετίζει τις φυσικές θύρες με τις διευθύνσεις MAC εξετάζοντας τις διευθύνσεις πηγής των ληφθέντων πλαισίων. Εάν ο προορισμός είναι άγνωστος, ο μεταγωγέας μεταδίδει σε όλες τις θύρες εκτός από την πηγή. Οι μεταγωγείς κανονικά έχουν πολλές θύρες, διευκολύνοντας μια τοπολογία αστέρα για συσκευές και επιταχυνόμενους πρόσθετους μεταγωγείς [15].

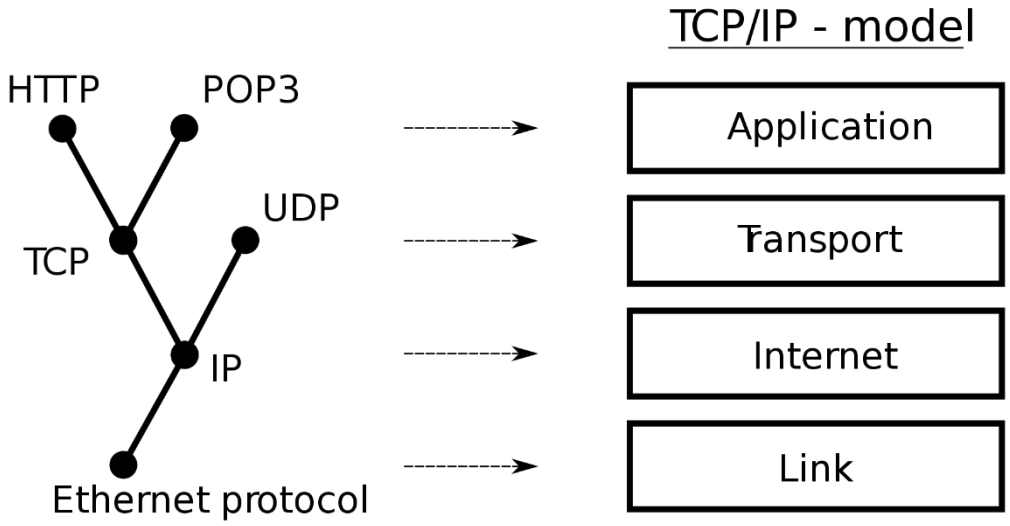
Ένας δρομολογητής είναι μια διαδικτυακή συσκευή που προωθεί τα πακέτα μεταξύ δικτύων επεξεργάζοντας τις πληροφορίες δρομολόγησης που περιλαμβάνονται στο πακέτο ή το διάγραμμα δικτύου (πληροφορίες πρωτοκόλλου Internet από το επίπεδο 3). Οι πληροφορίες δρομολόγησης συχνά επεξεργάζονται σε συνδυασμό με τον πίνακα δρομολόγησης (ή τον πίνακα προώθησης). Ένας δρομολογητής χρησιμοποιεί τον πίνακα δρομολόγησης του για να καθορίσει πού να προωθήσει τα πακέτα. Ένας προορισμός σε έναν πίνακα δρομολόγησης μπορεί να περιλαμβάνει μια κενή διεπαφή, επίσης γνωστή ως διασύνδεση "μαύρης τρύπας", επειδή τα δεδομένα μπορούν να εισέλθουν σε αυτήν, ωστόσο, δεν γίνεται περαιτέρω επεξεργασία για τα εν λόγω δεδομένα, δηλαδή τα πακέτα χάνονται [16].

Τα μόντεμ (MOdulator-DEModulator) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση κόμβων δικτύου μέσω καλωδίου που δεν σχεδιάστηκε αρχικά για κυκλοφορία ψηφιακού δικτύου ή για ασύρματα δίκτυα. Για να γίνει αυτό, ένα ή περισσότερα σήματα φορέα διαμορφώνονται από το ψηφιακό σήμα για να παράγουν ένα αναλογικό σήμα το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να δώσει τις απαιτούμενες ιδιότητες για μετάδοση. Τα μόντεμ χρησιμοποιούνται συνήθως για τηλεφωνικές γραμμές, χρησιμοποιώντας μια τεχνολογία ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής [17].

Ένα τείχος προστασίας είναι μια συσκευή δικτύου για τον έλεγχο των κανόνων ασφάλειας και πρόσβασης στο δίκτυο. Τα τείχη προστασίας συνήθως διαμορφώνονται για να απορρίπτουν αιτήματα πρόσβασης από μη αναγνωρισμένες πηγές ενώ επιτρέπουν ενέργειες από αναγνωρισμένες. Ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζουν τα τείχη προστασίας στην ασφάλεια δικτύων αναπτύσσεται παράλληλα με τη συνεχή αύξηση των επιθέσεων στον κυβερνοχώρο [18].

2.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας δικτύων

Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι ένα σύνολο κανόνων για την ανταλλαγή πληροφοριών μέσω δικτύου. Σε μια στοίβα πρωτοκόλλου (βλ. μοντέλο OSI), κάθε πρωτόκολλο αξιοποιεί τις υπηρεσίες του επιπέδου πρωτοκόλλου κάτω από αυτό, μέχρι το χαμηλότερο επίπεδο να ελέγχει το υλικό που στέλνει πληροφορίες σε όλα τα μέσα. Η χρήση των επιπέδων πρωτοκόλλων είναι σήμερα ευρέως διαδεδομένη σε όλο το πεδίο της δικτύωσης υπολογιστών. Ένα σημαντικό παράδειγμα μιας στοίβας πρωτοκόλλων είναι το πρωτόκολλο HTTP (το πρωτόκολλο του World Wide Web) το οποίο εκτελείται μέσω TCP over IP (πρωτόκολλα Internet) μέσω IEEE 802.11 (πρωτόκολλο Wi-Fi). Αυτή η στοίβα χρησιμοποιείται μεταξύ του ασύρματου δρομολογητή και του προσωπικού υπολογιστή του οικιακού χρήστη όταν ο χρήστης περιηγείται στον ιστό. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας έχουν διάφορα χαρακτηριστικά. Μπορούν να είναι προσανατολισμένα στις συνδέσεις ή χωρίς σύνδεση, μπορούν να χρησιμοποιούν λειτουργία κυκλώματος ή μεταγωγή πακέτων και μπορούν να χρησιμοποιούν ιεραρχική διεύθυνση ή επίπεδη διεύθυνση.



Εικόνα 9 : Διαμόρφωση στρώματος Ίντερνετ

Υπάρχουν πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας, μερικά από τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

Το IEEE 802 είναι μια οικογένεια προτύπων IEEE που ασχολείται με τοπικά δίκτυα και δίκτυα μητροπολιτικών περιοχών. Η πλήρης σουίτα πρωτοκόλλων IEEE 802 παρέχει ένα ποικίλο σύνολο δυνατοτήτων δικτύωσης. Τα πρωτόκολλα έχουν ένα επίπεδο σχήμα διευθυνσιοδότησης. Λειτουργούν κυρίως στα επίπεδα 1 και 2 του μοντέλου OSI. Για παράδειγμα, η γεφύρωση MAC (IEEE 802.1D) ασχολείται με τη δρομολόγηση πακέτων Ethernet χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο Spanning Tree. Το IEEE 802.1Q περιγράφει VLAN και το IEEE 802.1X ορίζει ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης δικτύου που βασίζεται στη θύρα, το οποίο αποτελεί τη βάση για τους μηχανισμούς επαλήθευσης ταυτότητας που χρησιμοποιούνται σε VLAN (αλλά βρίσκεται επίσης σε WLAN). ο χρήστης πρέπει να εισάγει ένα "κλειδί ασύρματης πρόσβασης".

Το Ethernet, μερικές φορές απλά ονομάζεται LAN. Είναι μια οικογένεια πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται σε ενσύρματα δίκτυα LAN, τα οποία περιγράφονται από ένα σύνολο προτύπων που ονομάζονται IEEE 802.3, το οποίο δημοσιεύεται από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών.

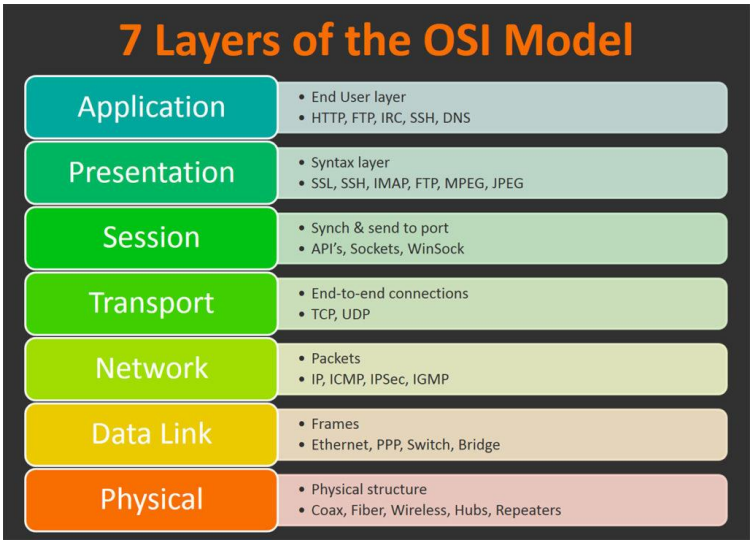
Το ασύρματο LAN, επίσης ευρέως γνωστό ως WLAN ή WiFi, είναι ίσως το πιο γνωστό μέλος της οικογένειας πρωτοκόλλων IEEE 802 για οικιακούς χρήστες σήμερα. Είναι τυποποιημένο από το IEEE 802.11 και μοιράζεται πολλές ιδιότητες με ενσύρματο Ethernet.

Η σουίτα πρωτοκόλλου Internet, που ονομάζεται επίσης TCP/IP, είναι η βάση όλων των σύγχρονων δικτύων. Προσφέρει υπηρεσίες χωρίς σύνδεση και προσανατολισμένες στις συνδέσεις μέσω ενός εγγενώς αναξιόπιστου δικτύου που μεταδίδεται με μετάδοση γραμμικών δεδομένων στο επίπεδο πρωτοκόλλου Internet (IP). Στον πυρήνα της, η σουίτα πρωτοκόλλων καθορίζει τις προδιαγραφές διευθύνσεων, ταυτοποίησης και δρομολόγησης για το πρωτόκολλο IPv4 (Internet Protocol Version 4) και για το IPv6 (Internet Protocol Version 6), την επόμενη γενιά του πρωτοκόλλου με πολύ διευρυμένη δυνατότητα διευθυνσιοδότησης.

Υπάρχουν επίσης πολλά διαφορετικά ψηφιακά κυψελοειδή πρότυπα, όπως: Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες (GSM), Γενική Υπηρεσία Πακέτων Ραδιοφώνου (GPRS), cdmaOne, CDMA2000, Evolution-Optimized Data (EV-DO) EDGE), το παγκόσμιο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών (UMTS), οι ψηφιακές ενισχυμένες ασύρματες τηλεπικοινωνίες (DECT), το ψηφιακό AMPS (IS-136 / TDMA) και το ενσωματωμένο ψηφιακό ενισχυμένο δίκτυο (iDEN).

Η σύγχρονη οπτική δικτύωση (SONET) και η σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία (SDH) είναι τυποποιημένα πρωτόκολλα πολυπλεξίας που μεταφέρουν πολλαπλές ψηφιακές ροές bit πάνω σε οπτικές ίνες χρησιμοποιώντας λέιζερ. Αυτά σχεδιάστηκαν αρχικά για να μεταφέρουν επικοινωνίες κυκλωμάτων από μια ποικιλία διαφορετικών πηγών, κυρίως για να υποστηρίξουν φωνή μεταγωγής κυκλωμάτων σε πραγματικό χρόνο, ασυμπίεστη, με κωδικοποίηση σε μορφή PCM (Pulse-Code Modulation). Ωστόσο, εξαιτίας της ουδετερότητας του πρωτοκόλλου και των χαρακτηριστικών προσανατολισμένων στις μεταφορές, η SONET/SDH ήταν επίσης η προφανής επιλογή μεταφοράς πλαισίων ασύγχρονης μεταφοράς (ATM).

Η λειτουργία ασύγχρονης μεταφοράς (ATM) είναι μια τεχνική εναλλαγής για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Χρησιμοποιεί ασύγχρονη πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου και κωδικοποιεί δεδομένα σε μικρά κύτταρα σταθερού μεγέθους. Αυτό διαφέρει από άλλα πρωτόκολλα όπως το Internet Protocol Suite ή το Ethernet που χρησιμοποιούν πακέτα ή πλαίσια με μεταβλητό μέγεθος. Το ATM έχει ομοιότητα τόσο με το κύκλωμα όσο και με το δίκτυο μεταγωγής πακέτων. Αυτό το καθιστά μια καλή επιλογή για ένα δίκτυο που πρέπει να χειρίζεται τόσο την παραδοσιακή κυκλοφορία δεδομένων υψηλής ταχύτητας όσο και το περιεχόμενο σε πραγματικό χρόνο και χαμηλής καθυστέρησης, όπως η φωνή και το βίντεο. Το ATM χρησιμοποιεί ένα μοντέλο με προσανατολισμό της σύνδεσης στο οποίο πρέπει να δημιουργηθεί ένα εικονικό κύκλωμα μεταξύ δύο τελικών σημείων πριν αρχίσει η πραγματική ανταλλαγή δεδομένων. Ενώ ο ρόλος της ATM μειώνεται υπέρ των δικτύων επόμενης γενιάς, εξακολουθεί να παίζει ρόλο στο τελευταίο μίλι, που είναι η σύνδεση μεταξύ ενός παρόχου υπηρεσιών Διαδικτύου και του οικιακού χρήστη.



Εικόνα 10 : Το μοντέλο OSI

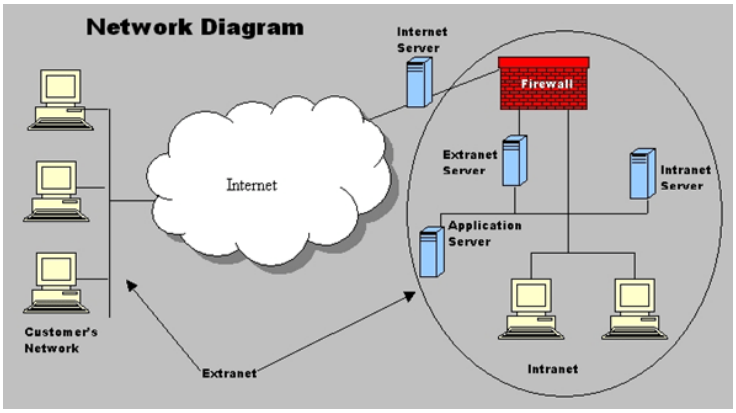
2.5 Χρήση και σκοποί δικτύων

Τα δίκτυα διαχειρίζονται συνήθως οι οργανισμοί που τους ανήκουν. Τα δίκτυα ιδιωτικών επιχειρήσεων μπορούν να χρησιμοποιούν συνδυασμό intranet και extranets. Μπορούν επίσης να παρέχουν πρόσβαση στο δίκτυο στο Διαδίκτυο, η οποία δεν έχει κάτοχο και επιτρέπει απεριόριστη παγκόσμια συνδεσιμότητα.

Ένα intranet είναι ένα σύνολο δικτύων που βρίσκονται υπό τον έλεγχο μιας ενιαίας διοικητικής οντότητας. Το εσωτερικό δίκτυο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IP και εργαλεία που βασίζονται στην IP, όπως προγράμματα περιήγησης ιστού και εφαρμογές μεταφοράς αρχείων. Η διοικητική οντότητα περιορίζει τη χρήση του ενδοδικτύου στους εξουσιοδοτημένους χρήστες του. Συνήθως, ένα intranet είναι το εσωτερικό LAN ενός οργανισμού. Ένα μεγάλο intranet διαθέτει συνήθως τουλάχιστον ένα διακομιστή ιστού για να παρέχει στους χρήστες πληροφορίες σχετικά με την οργάνωση. Ένα intranet είναι επίσης οτιδήποτε πίσω από το δρομολογητή ενός τοπικού δικτύου.

Ένα extranet είναι ένα δίκτυο που επίσης βρίσκεται υπό τον διοικητικό έλεγχο ενός μόνο οργανισμού, αλλά υποστηρίζει μια περιορισμένη σύνδεση με ένα συγκεκριμένο εξωτερικό δίκτυο. Για παράδειγμα, ένας οργανισμός μπορεί να παρέχει πρόσβαση σε ορισμένες πτυχές του ενδοδικτύου του για να μοιράζεται δεδομένα με τους επιχειρηματικούς του συνεργάτες ή πελάτες. Αυτές οι άλλες οντότητες δεν είναι αναγκαστικά εμπιστευμένες από την άποψη της ασφάλειας. Η σύνδεση δικτύου με ένα extranet συχνά, αλλά όχι πάντα, υλοποιείται μέσω της τεχνολογίας WAN.

Ένα διαδικτυακό δίκτυο είναι η σύνδεση πολλών δικτύων υπολογιστών μέσω μιας κοινής τεχνολογίας δρομολόγησης που χρησιμοποιεί δρομολογητές.



Εικόνα 11 : Διάγραμμα intranet και extranet

Το Διαδίκτυο είναι το μεγαλύτερο παράδειγμα ενός διαδικτύου. Πρόκειται για ένα παγκόσμιο σύστημα διασυνδεδεμένων κυβερνητικών, ακαδημαϊκών, εταιρικών, δημόσιων και ιδιωτικών δικτύων υπολογιστών. Βασίζεται στις τεχνολογίες δικτύωσης της σουίτας πρωτοκόλλου Internet. Είναι ο διάδοχος του Δικτύου Υπηρεσιών Προηγμένων Ερευνητικών Προγραμμάτων (ARPANET) που ανέπτυξε η DARPA του Υπουργείου Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών. Το Διαδίκτυο είναι επίσης η ραχοκοκαλιά των επικοινωνιών που βασίζεται στο World Wide Web (WWW). Οι συμμετέχοντες στο διαδίκτυο χρησιμοποιούν μια ποικιλία μεθόδων πολλών εκατοντάδων τεκμηριωμένων και συχνά τυποποιημένων πρωτοκόλλων που είναι συμβατά με το πρωτόκολλο Internet Protocol Suite και ένα σύστημα διευθύνσεων (διευθύνσεις IP) που διαχειρίζεται η Αρχή Εκχωρημένων Αριθμών Διαδικτύου και τα μητρώα διευθύνσεων. Οι πάροχοι υπηρεσιών και οι μεγάλες επιχειρήσεις ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με την προσβασιμότητα των χώρων διευθύνσεών τους μέσω του πρωτοκόλλου Border Gateway Protocol (BGP), σχηματίζοντας ένα περιττό παγκόσμιο πλέγμα διαδρομών μετάδοσης.

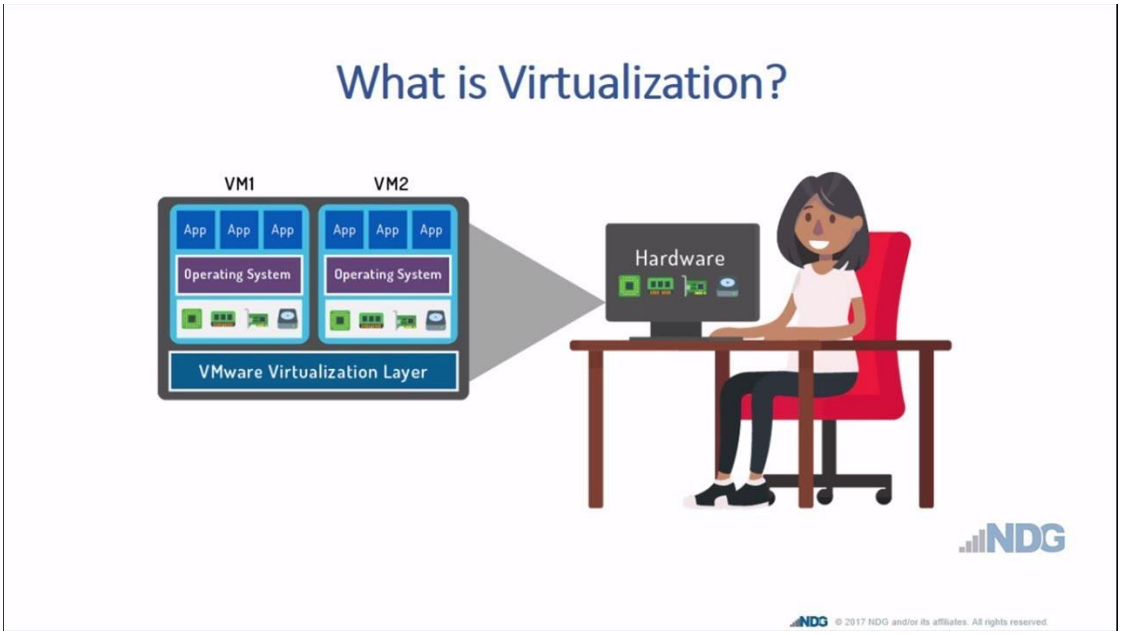
Ένα σκοτεινό δίκτυο είναι ένα δίκτυο επικάλυψης, το οποίο συνήθως εκτελείται στο Internet, το οποίο είναι προσβάσιμο μόνο μέσω εξειδικευμένου λογισμικού. Ένα σκούρο δίκτυο είναι ένα δίκτυο ανωνυμοποίησης όπου οι συνδέσεις γίνονται μόνο μεταξύ αξιόπιστων συνομηλίκων - μερικές φορές αποκαλούνται "φίλοι" (F2F) - χρησιμοποιώντας μη τυποποιημένα πρωτόκολλα και θύρες. Τα δίκτυα Darknets διακρίνονται από άλλα κατανεμημένα δίκτυα ομότιμων δικτύων, καθώς η κοινή χρήση είναι ανώνυμη (δηλαδή οι διευθύνσεις IP δεν μοιράζονται δημόσια) και επομένως οι χρήστες μπορούν να επικοινωνούν με ελάχιστο φόβο για κυβερνητικές ή εταιρικές παρεμβολές.

Εικόνα 12 : Internet, Deep web, Dark web

3ο Κεφάλαιο : Εικονικοποίηση

3.1 Ορισμός εικονικοποίησης

Στην επιστήμη της πληροφορικής, η εικονικοποίηση (virtualization) είναι ένας ευρύς όρος των υπολογιστικών συστημάτων που αναφέρεται σε έναν μηχανισμό αφαίρεσης, στοχευμένο στην απόκρυψη λεπτομερειών της υλοποίησης και της κατάστασης ορισμένων υπολογιστικών πόρων από πελάτες των πόρων αυτών (π.χ. εφαρμογές, άλλα συστήματα, χρήστες κλπ.). Η εν λόγω αφαίρεση μπορεί είτε να αναγκάζει έναν πόρο να συμπεριφέρεται ως πλειάδα πόρων (π.χ. μία συσκευή αποθήκευσης σε διακομιστή τοπικού δικτύου), είτε πολλαπλούς πόρους να συμπεριφέρονται ως ένας (π.χ. συσκευές αποθήκευσης σε κατανεμημένα συστήματα). Η εικονικοποίηση δημιουργεί μία εξωτερική διασύνδεση η οποία αποκρύπτει την υποκείμενη υλοποίηση (π.χ. πολυπλέκοντας την πρόσβαση από διαφορετικούς χρήστες). Αυτή η προσέγγιση στην εικονικοποίηση αναφέρεται ως εικονικοποίηση πόρων. Μία άλλη προσέγγιση, ίδιας όμως νοοτροπίας, είναι η εικονικοποίηση πλατφόρμας, όπου η αφαίρεση που επιτελείται προσομοιώνει ολόκληρους υπολογιστές. Το αντίθετο της εικονικοποίησης είναι η διαφάνεια: ένας εικονικός πόρος είναι ορατός, αντιληπτός, αλλά στην πραγματικότητα ανύπαρκτος, ενώ ένας διαφανής πόρος είναι υπαρκτός αλλά αόρατος [19].



Εικόνα 13 : Η εικονικοποίηση

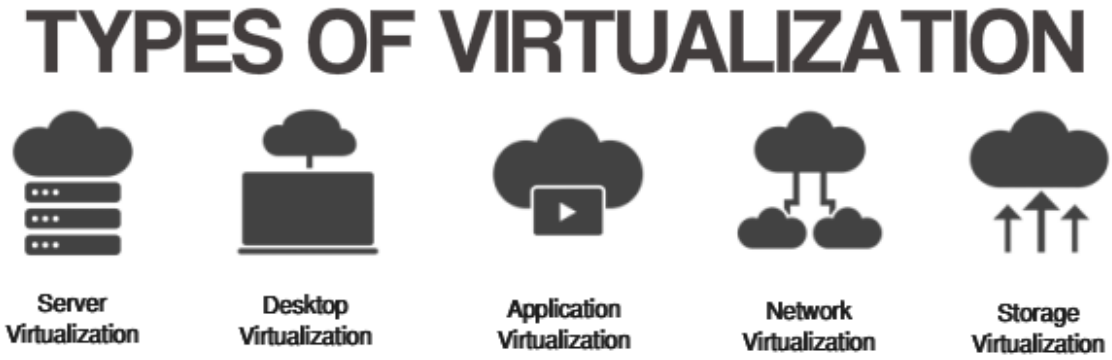
3.2 Κατηγορίες εικονικοποίησης

Η εικονικοποίηση υλικού ή η εικονικοποίηση πλατφόρμας αναφέρεται στη δημιουργία μιας εικονικής μηχανής που λειτουργεί σαν ένας πραγματικός υπολογιστής με λειτουργικό σύστημα. Το λογισμικό που εκτελείται σε αυτές τις εικονικές μηχανές χωρίζεται από τους υποκείμενους πόρους υλικού. Για παράδειγμα, ένας υπολογιστής που χρησιμοποιεί Microsoft Windows ενδέχεται να φιλοξενήσει μια εικονική μηχανή που μοιάζει με έναν υπολογιστή με το λειτουργικό σύστημα Ubuntu Linux. Το λογισμικό που βασίζεται στο Ubuntu μπορεί να εκτελεστεί στην εικονική μηχανή. Στην εικονικοποίηση υλικού, το κεντρικό μηχάνημα είναι το μηχάνημα που χρησιμοποιείται από τον εικονικοποιητή και το μηχάνημα φιλοξενίας είναι το εικονικό μηχάνημα. Οι λέξεις host και guest χρησιμοποιούνται για να διακρίνουν το λογισμικό που τρέχει στο φυσικό μηχάνημα από το λογισμικό που τρέχει στο εικονικό μηχάνημα. Το λογισμικό ή το υλικολογισμικό που δημιουργεί μια εικονική μηχανή στο υλικό του κεντρικού υπολογιστή ονομάζεται οθόνη hypervisor ή εικονική μηχανή. Η εικονικοποίηση του υλικού μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μέρος μιας γενικής τάσης στον τομέα των επιχειρησιακών τεχνολογιών πληροφορικής που περιλαμβάνει αυτόνομη υπολογιστική, ένα σενάριο στο οποίο το περιβάλλον πληροφορικής θα είναι σε θέση να διαχειριστεί τον εαυτό του με βάση την αντιληπτή δραστηριότητα και την υπολογιστική χρησιμότητα, χρησιμότητα που οι πελάτες μπορούν να πληρώσουν μόνο για όσο χρειάζεται. Ο συνηθισμένος στόχος της εικονοποίησης είναι να συγκεντρωθούν τα διοικητικά καθήκοντα ενώ παράλληλα να βελτιωθεί η δυνατότητα κλιμάκωσης και η συνολική χρησιμοποίηση των πόρων υλικού. Με την εικονικοποίηση, διάφορα λειτουργικά συστήματα μπορούν να λειτουργούν παράλληλα σε μία κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU). Αυτός ο παραλληλισμός τείνει να μειώσει τα γενικά έξοδα και διαφέρει από το multitasking, το οποίο περιλαμβάνει την εκτέλεση πολλών προγραμμάτων στο ίδιο λειτουργικό σύστημα. Χρησιμοποιώντας την εικονικοποίηση, μια επιχείρηση μπορεί καλύτερα να διαχειρίζεται τις ενημερώσεις και τις γρήγορες αλλαγές στο λειτουργικό σύστημα και τις εφαρμογές χωρίς να διακόπτει τον χρήστη. Η εικονικοποίηση υλικού δεν είναι η ίδια με την εξομοίωση υλικού. Στην εξομοίωση υλικού, ένα κομμάτι υλικού μιμείται άλλο, ενώ στον τομέα της εικονικοποίησης υλικού, ένας hypervisor (ένα κομμάτι του λογισμικού) μιμείται ένα συγκεκριμένο κομμάτι υλικού υπολογιστή ή ολόκληρο τον υπολογιστή. Επιπλέον, ένας hypervisor δεν είναι ο ίδιος με έναν εξομοιωτή. και τα δύο είναι προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών που μιμούνται υλικό, αλλά ο τομέας χρήσης τους στη γλώσσα διαφέρει.

Η εικονικοποίηση επιφάνειας εργασίας είναι η έννοια του διαχωρισμού της λογικής επιφάνειας εργασίας από το φυσικό μηχάνημα. Μια μορφή εικονικοποίησης επιφάνειας εργασίας, μπορεί να θεωρηθεί ως μια πιο προηγμένη μορφή εικονικοποίησης υλικού. Αντί να αλληλοεπιδρά με έναν κεντρικό υπολογιστή απευθείας μέσω πληκτρολογίου, ποντικιού και οθόνης, ο χρήστης αλληλοεπιδρά με τον κεντρικό υπολογιστή χρησιμοποιώντας έναν άλλο επιτραπέζιο υπολογιστή ή μια κινητή συσκευή μέσω μιας σύνδεσης δικτύου, όπως LAN, ασύρματο LAN ή ακόμα και το Internet. Επιπλέον, ο κεντρικός υπολογιστής σε αυτό το σενάριο γίνεται ένας υπολογιστής διακομιστή ικανός να φιλοξενεί πολλαπλές εικονικές μηχανές ταυτόχρονα για πολλούς χρήστες. Για τους χρήστες, αυτό σημαίνει ότι μπορούν να έχουν πρόσβαση στην επιφάνεια εργασίας τους από οποιαδήποτε τοποθεσία, χωρίς να συνδέονται με μια μόνο συσκευή πελάτη. Δεδομένου ότι οι πόροι είναι συγκεντρωμένοι, οι χρήστες που μετακινούνται μεταξύ των τοποθεσιών εργασίας μπορούν ακόμα να έχουν πρόσβαση στο ίδιο περιβάλλον πελάτη με τις εφαρμογές και τα δεδομένα τους. Για τους διαχειριστές πληροφορικής, αυτό σημαίνει ένα πιο συγκεντρωτικό, αποτελεσματικό περιβάλλον πελάτη που είναι ευκολότερο να διατηρηθεί και ικανό να ανταποκριθεί πιο γρήγορα στις μεταβαλλόμενες ανάγκες του χρήστη και των επιχειρήσεων. Μια άλλη μορφή, εικονικοποίησης επιφάνειας εργασίας, επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να συνδεθούν σε έναν κοινό αλλά ισχυρό υπολογιστή μέσω του δικτύου και να το χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα. Κάθε ένα έχει μια επιφάνεια εργασίας και έναν προσωπικό φάκελο στον οποίο αποθηκεύει τα αρχεία του. Με διαμόρφωση πολλαπλών καναλιών, η εικονικοποίηση των συνεδριών μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή με πολλαπλές οθόνες, πληκτρολόγια και ποντίκια συνδεδεμένα. Οι λεπτότεροι πελάτες, οι οποίοι εμφανίζονται στον εικονικολογισμό των επιτραπέζιων υπολογιστών, είναι απλοί και/ή φτηνοί υπολογιστές που σχεδιάζονται κατά κύριο λόγο για να συνδεθούν στο δίκτυο. Μπορεί να μην διαθέτουν σημαντικούς χώρους αποθήκευσης στο σκληρό δίσκο, μνήμη RAM ή ακόμα και επεξεργαστική ισχύ, αλλά πολλές οργανώσεις αρχίζουν να εξετάζουν τα οφέλη από την εξάλειψη των υπολογιστών γραφείου που είναι εξοπλισμένα με πακέτα λογισμικού, άρα και που χρειάζονται άδειες λειτουργίας.

Η εικονικοποίηση επιφάνειας εργασίας απλοποιεί τη διαχείριση της έκδοσης λογισμικού και της ενημέρωσης των ενημερώσεων κώδικα, όπου η νέα εικόνα ενημερώνεται απλώς στον διακομιστή και η επιφάνεια εργασίας λαμβάνει την ενημερωμένη έκδοση κατά την επανεκκίνηση. Επιτρέπει επίσης τον κεντρικό έλεγχο σε ποιες εφαρμογές επιτρέπεται στον χρήστη να έχει πρόσβαση στον σταθμό εργασίας. Η μεταφορά εικονικών επιτραπέζιων υπολογιστών στο νέφος δημιουργεί φιλοξενούμενους εικονικούς υπολογιστές (HVDs), στους οποίους οι εικόνες επιφάνειας εργασίας διαχειρίζονται και συντηρούνται κεντρικά από μια εξειδικευμένη εταιρεία φιλοξενίας. Τα οφέλη περιλαμβάνουν την επεκτασιμότητα και τη μείωση των κεφαλαιουχικών δαπανών, η οποία αντικαθίσταται από ένα μηνιαίο λειτουργικό κόστος.

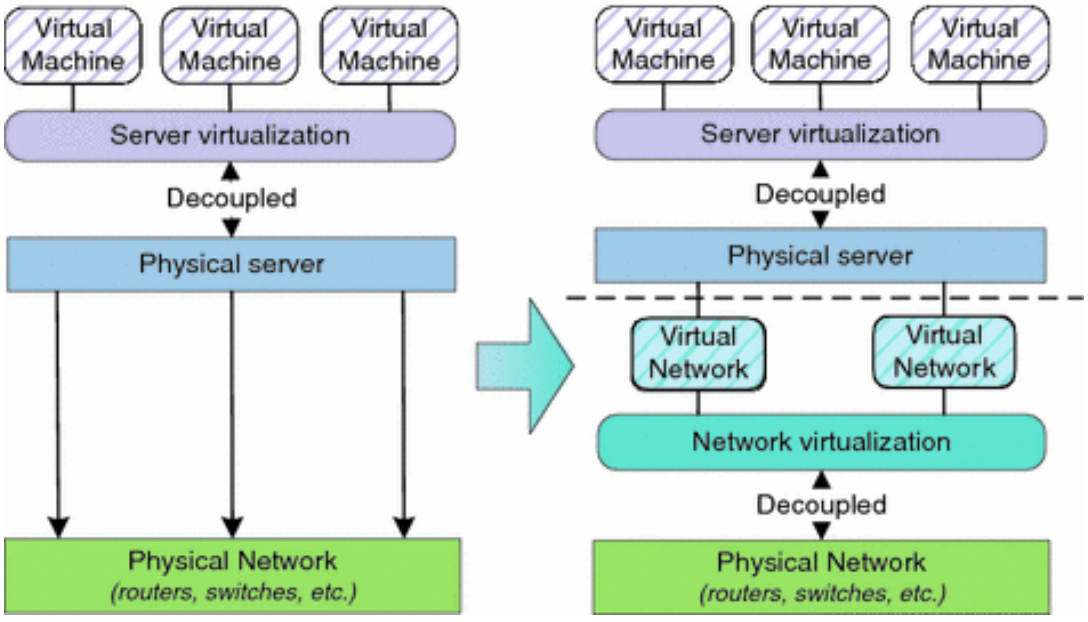
Η εικονικοποίηση σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος, γνωστή και ως "εμπορευματοποίηση", αναφέρεται σε μια λειτουργία λειτουργικού συστήματος στην οποία ο πυρήνας επιτρέπει την ύπαρξη πολλαπλών απομονωμένων παρουσιών χώρου χρήστη. Τέτοιες περιπτώσεις, που ονομάζονται δοχεία, χωρίσματα, εικονικά περιβάλλοντα (VE) ή φυλακές (φυλακή FreeBSD ή φυλακή chroot), μπορεί να μοιάζουν με πραγματικούς υπολογιστές από την άποψη προγραμμάτων που εκτελούνται σε αυτά. Ένα πρόγραμμα υπολογιστή που εκτελείται σε ένα συνηθισμένο λειτουργικό σύστημα μπορεί να δει όλους τους πόρους (συνδεδεμένες συσκευές, αρχεία και φακέλους, κοινόχρηστα δίκτυα, ισχύ CPU, μετρήσιμες δυνατότητες υλικού) αυτού του υπολογιστή. Ωστόσο, τα προγράμματα που εκτελούνται μέσα σε ένα κοντέινερ μπορούν να δουν μόνο τα περιεχόμενα και τις συσκευές του δοχείου που έχουν αντιστοιχιστεί στο κοντέινερ.



Εικόνα 14 : Κατηγορίες εικονικοποίησης

3.3 Χρήση και σκοποί εικονικοποίησης δικτύων

Στην πληροφορική, η εικονικοποίηση δικτύων ή η εικονικοποίηση δικτύου (Network Virtualization) είναι η διαδικασία συνδυασμού πόρων δικτύου, υλικού, λογισμικού και λειτουργικότητας δικτύου σε μια ενιαία διοικητική οντότητα που βασίζεται σε λογισμικό, ένα εικονικό δίκτυο. Η εικονικοποίηση δικτύων περιλαμβάνει την πλατφόρμα εικονικοποίησης, συχνά σε συνδυασμό με την εικονικοποίηση πόρων. Η εικονικοποίηση δικτύων κατηγοριοποιείται ως εξωτερική εικονικοποίηση, συνδυάζοντας πολλά δίκτυα ή τμήματα δικτύων σε μια εικονική μονάδα ή εσωτερική εικονικοποίηση, παρέχοντας λειτουργίες παρόμοιες με το δίκτυο σε δοχεία λογισμικού σε ένα μόνο διακομιστή δικτύου. Στη δοκιμή του λογισμικού, οι προγραμματιστές λογισμικού χρησιμοποιούν την εικονικοποίηση δικτύου για να δοκιμάσουν το λογισμικό που βρίσκεται σε εξέλιξη σε μια προσομοίωση των περιβαλλόντων δικτύου στα οποία το λογισμικό προορίζεται να λειτουργήσει. Ως μέρος της μηχανικής απόδοσης εφαρμογών, η εικονικοποίηση δικτύων δίνει τη δυνατότητα στους προγραμματιστές να μιμούνται συνδέσεις μεταξύ εφαρμογών, υπηρεσιών, εξαρτήσεων και τελικών χρηστών σε ένα περιβάλλον δοκιμών χωρίς να χρειάζεται να ελέγχουν φυσικά το λογισμικό σε όλο το πιθανό λειτουργικό σύστημα ή το υλικό. Η εγκυρότητα της δοκιμής εξαρτάται από την ακρίβεια της εικονικοποίησης δικτύου για την εξομοίωση πραγματικού υλικού και λειτουργικών συστημάτων.



Εικόνα 15 : Εικονικοποίηση δικτύου

Η εικονικοποίηση δικτύου ορίζεται από τη δυνατότητα δημιουργίας λογικών εικονικών δικτύων που αποσυνδέονται από το υποκείμενο υλικό δικτύου, ώστε να εξασφαλίζεται ότι το δίκτυο μπορεί να ενσωματωθεί καλύτερα και να υποστηρίξει όλο και περισσότερο εικονικά περιβάλλοντα. Κατά την τελευταία δεκαετία, οι οργανισμοί υιοθέτησαν τεχνολογίες εικονικοποίησης με επιτάχυνση. Η εικονικοποίηση δικτύου περιγράφει τη συνδεσιμότητα δικτύωσης και τις υπηρεσίες που έχουν παραδοθεί παραδοσιακά μέσω υλικού σε ένα λογικό εικονικό δίκτυο που αποσυνδέεται και λειτουργεί ανεξάρτητα πάνω από ένα φυσικό δίκτυο σε ένα hypervisor. Πέρα από τις υπηρεσίες επιπέδου 2-3 (βλ. επίπεδα OSI), όπως η εναλλαγή και η δρομολόγηση, η εικονικοποίηση δικτύου συνήθως ενσωματώνει υπηρεσίες εικονικοποίησης στα επίπεδα 4-7 (βλ. επίπεδα OSI), συμπεριλαμβανομένης της αντιστάθμισης τροφοδοσίας firewall και διακομιστή. Η εικονικοποίηση δικτύου επιλύει πολλές από τις προκλήσεις δικτύωσης στα σημερινά κέντρα δεδομένων, βοηθώντας τους οργανισμούς να προγραμματίζουν και να προμηθεύουν κεντρικά το δίκτυο, κατ' απαίτηση, χωρίς να χρειάζεται να αγγίξουν φυσικά την υποκείμενη υποδομή. Με την εικονικοποίηση δικτύου, οι οργανισμοί μπορούν να απλοποιήσουν τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται, κλιμακώνουν και προσαρμόζουν το φόρτο εργασίας και τους πόρους για να ανταποκρίνονται στις εξελισσόμενες ανάγκες υπολογιστών. Με την εικονικοποίηση, οι εταιρείες μπορούν να επωφεληθούν από την αποδοτικότητα και την ευελιξία των υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων που βασίζονται σε λογισμικό. Ενώ τα δίκτυα κινούνται προς την κατεύθυνση των μεγαλύτερων εικονικοποίησεων, με πιο πρόσφατη την πραγματική αποσύνδεση των επιπέδων ελέγχου και προώθησης, όπως υποστηρίζεται από τα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό (SDN) και τις δίκτυο λειτουργικής εικονικοποίησης (NFV) όπου εστιάζουν περισσότερο στην εικονικοποίηση δικτύων.

Όταν εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο, η εικονικοποίηση δημιουργεί μια λογική προβολή των πόρων δικτύωσης υλικού και λογισμικού (μεταγωγείς, δρομολογητές κλπ.). Οι φυσικές συσκευές δικτύωσης είναι απλά υπεύθυνες για τη διαβίβαση πακέτων, ενώ το εικονικό δίκτυο (λογισμικό) παρέχει μια έξυπνη αφαίρεση που διευκολύνει την ανάπτυξη και διαχείριση των υπηρεσιών δικτύου και των υποκείμενων πόρων δικτύου. Ως αποτέλεσμα, η εικονικοποίηση δικτύου μπορεί να ευθυγραμμίσει το δίκτυο για να υποστηρίξει καλύτερα εικονικά περιβάλλοντα.

Η εικονικοποίηση δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία εικονικών δικτύων μέσα σε μια εικονικοποιημένη υποδομή. Αυτό επιτρέπει στην εικονικοποίηση δικτύου να υποστηρίζει τις σύνθετες απαιτήσεις σε περιβάλλοντα πολλαπλών μισθώσεων. Η εικονικοποίηση δικτύου μπορεί να παραδώσει ένα εικονικό δίκτυο μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον που είναι πραγματικά ξεχωριστό από άλλους πόρους δικτύου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η εικονικοποίηση δικτύου μπορεί να διαχωρίσει την κυκλοφορία σε μια ζώνη ή ένα κοντέινερ για να εξασφαλίσει ότι η κυκλοφορία δεν θα αναμειχθεί με άλλους πόρους ή τη μεταφορά άλλων δεδομένων.

Ακόμα, η τάση όλο και πηγαίνει προς τη χρήση της εικονικοποίησης δικτύου για τη δημιουργία δικτύων επικάλυψης πάνω από το φυσικό υλικό. Ταυτοχρόνως, η χρήση της εικονικοποίηση δικτύου μειώνει το κόστος στο φυσικό δίκτυο (υπόστρωμα) χρησιμοποιώντας τους μεταγωγείς “λευκού πλαισίου”. Αναφερόμενοι στη χρήση τους γενικά, οι απομακρυσμένοι μεταγωγείς και οι δρομολογητές, η δικτύωση των οποίων επιτυγχάνεται με την χρήση “λευκών πλαισίων” περιορίζει τις δαπάνες χρησιμοποιώντας μη δαπανηρούς ιδιόκτητους μεταγωγείς. Η εικονικοποίηση δικτύου συμβάλλει επίσης στη μείωση των εξόδων βασιζόμενη στη νοημοσύνη της επικάλυψης για την παροχή της απαραίτητης προηγμένης λειτουργικότητας και των δυνατοτήτων του δικτύου.

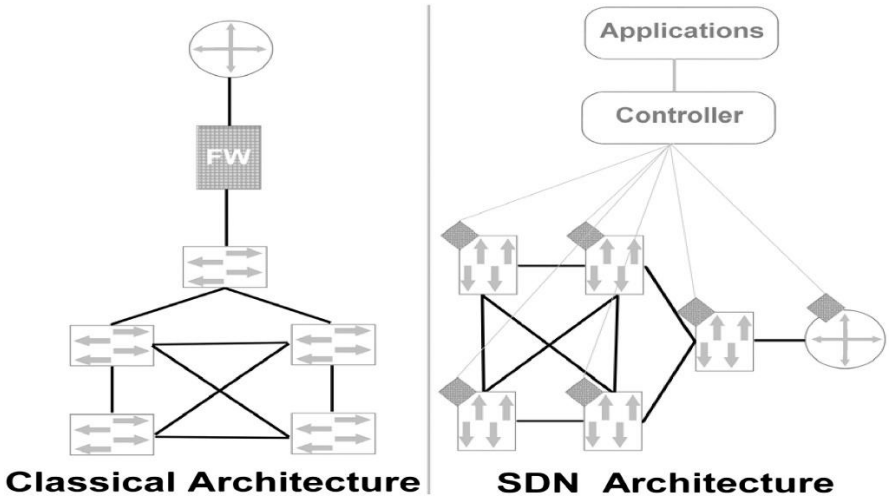
Διάφοροι προμηθευτές εξοπλισμού και λογισμικού προσφέρουν εικονικοποίηση δικτύου συνδυάζοντας οποιοδήποτε από τα παρακάτω:

- Το υλικό δικτύου, όπως οι μεταγωγείς και οι προσαρμογείς δικτύου, επίσης γνωστά ως κάρτες διασύνδεσης δικτύου (NICs).
- Στοιχεία δικτύου, όπως τείχη προστασίας και ισορροπιστές φορτίου.
- Τα δίκτυα, όπως τα εικονικά δίκτυα LAN (VLAN) και τα δοχεία όπως οι εικονικές μηχανές (VM).
- Συσκευές αποθήκευσης δικτύου.
- Στοιχεία δικτύου από μηχανή σε μηχανή, όπως συσκευές τηλεπικοινωνίας.
- Στοιχεία κινητής τηλεφωνίας δικτύου, όπως φορητοί υπολογιστές, υπολογιστές tablet και έξυπνα τηλέφωνα.
- Μέσα δικτύου, όπως Ethernet και οπτικό κανάλι.

4ο Κεφάλαιο : Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό

4.1 Ορισμός δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

Ο στόχος των δικτύων οριζόμενα από λογισμικό (SDN) είναι να επιτρέψει σε υπολογιστές cloud και μηχανικούς υπολογιστών και δικτύων, να ανταποκριθούν γρήγορα στις μεταβαλλόμενες επιχειρηματικές απαιτήσεις μέσω μιας κεντρικής κονσόλας ελέγχου. Τα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό περιλαμβάνουν πολλαπλά είδη τεχνολογιών δικτύου που έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν το δίκτυο πιο ευέλικτο και ευκίνητο, για να υποστηρίξει την εικονική υποδομή διακομιστή και αποθήκευσης του σύγχρονου κέντρου δεδομένων. Τα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό (SDN) είναι μια προσέγγιση στη διαχείριση δικτύων που επιτρέπει δυναμική, αποδοτική προγραμματική ρύθμιση παραμέτρων δικτύου, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση και η παρακολούθηση του δικτύου, καθιστώντας το περισσότερο σαν cloud διαχείριση από την παραδοσιακή διαχείριση δικτύου. Το SDN προορίζεται να αντιμετωπίσει το γεγονός ότι η στατική αρχιτεκτονική των παραδοσιακών δικτύων είναι αποκεντρωμένη και πολύπλοκη, ενώ τα τρέχοντα δίκτυα απαιτούν μεγαλύτερη ευελιξία και εύκολη αντιμετώπιση προβλημάτων. Τα δίκτυα ορισμένα από λογισμικό επιχειρούν να συγκεντρώσουν τη νοημοσύνη δικτύου σε ένα στοιχείο δικτύου αποσυνδέοντας τη διαδικασία προώθησης πακέτων δικτύου (επίπεδο δεδομένων) από τη διαδικασία δρομολόγησης (επίπεδο ελέγχου). Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από έναν ή περισσότερους ελεγκτές, οι οποίοι θεωρούνται ο εγκέφαλος του δικτύου SDN όπου ενσωματώνεται ολόκληρη η νοημοσύνη. Ωστόσο, η έξυπνη συγκέντρωση έχει τα δικά της μειονεκτήματα όσον αφορά την ασφάλεια, την επεκτασιμότητα και την ελαστικότητα και αυτό είναι το κύριο ζήτημα των δικτύων ορισμένα από λογισμικό [20].



Εικόνα 16 : Τυπική αρχιτεκτονική δικτύου - Αρχιτεκτονική δικτύου SDN

4.2 Η ιστορική εξέλιξη των δικτύων οριζόμενα από λογισμικό μέχρι σήμερα

Η ιστορία των αρχών SDN μπορεί να εντοπιστεί στον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου και δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο με εναλλαγή, ως ένας τρόπος απλοποίησης της παροχής και της διαχείρισης πολύ πριν αρχίσει να χρησιμοποιείται αυτή η αρχιτεκτονική σε δίκτυα δεδομένων.

Η Ομάδα Μηχανικής Διαδικτύου (IETF) άρχισε να εξετάζει διάφορους τρόπους αποσύνδεσης των λειτουργιών ελέγχου και προώθησης σε ένα προτεινόμενο πρότυπο διεπαφής που δημοσιεύθηκε το 2004 με την ονομασία "Προώθηση και διαχωρισμός στοιχείων ελέγχου" (ForCES). Η ομάδα εργασίας του ForCES πρότεινε επίσης μια συνοδευτική αρχιτεκτονική SoftRouter. Πρόσθετα πρώιμα πρότυπα από το IETF που επιδίωξαν το διαχωρισμό του ελέγχου από τα δεδομένα περιλαμβάνουν το Linux Netlink ως IP Services Protocol και A Path Computation Element (PCE) – βασιζόμενη αρχιτεκτονική.

Αυτές οι πρώτες προσπάθειες απέτυχαν να κερδίσουν εκτίμηση για δύο λόγους. Το ένα είναι ότι πολλοί στην κοινότητα του Διαδικτύου θεώρησαν ότι ο διαχωρισμός του ελέγχου από τα δεδομένα είναι επικίνδυνος, ειδικά λόγω της πιθανότητας αποτυχίας στο επίπεδο ελέγχου. Το δεύτερο είναι ότι οι προμηθευτές ανησυχούσαν ότι η δημιουργία τυπικών διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (API) μεταξύ των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων θα είχε ως αποτέλεσμα αυξημένο ανταγωνισμό.

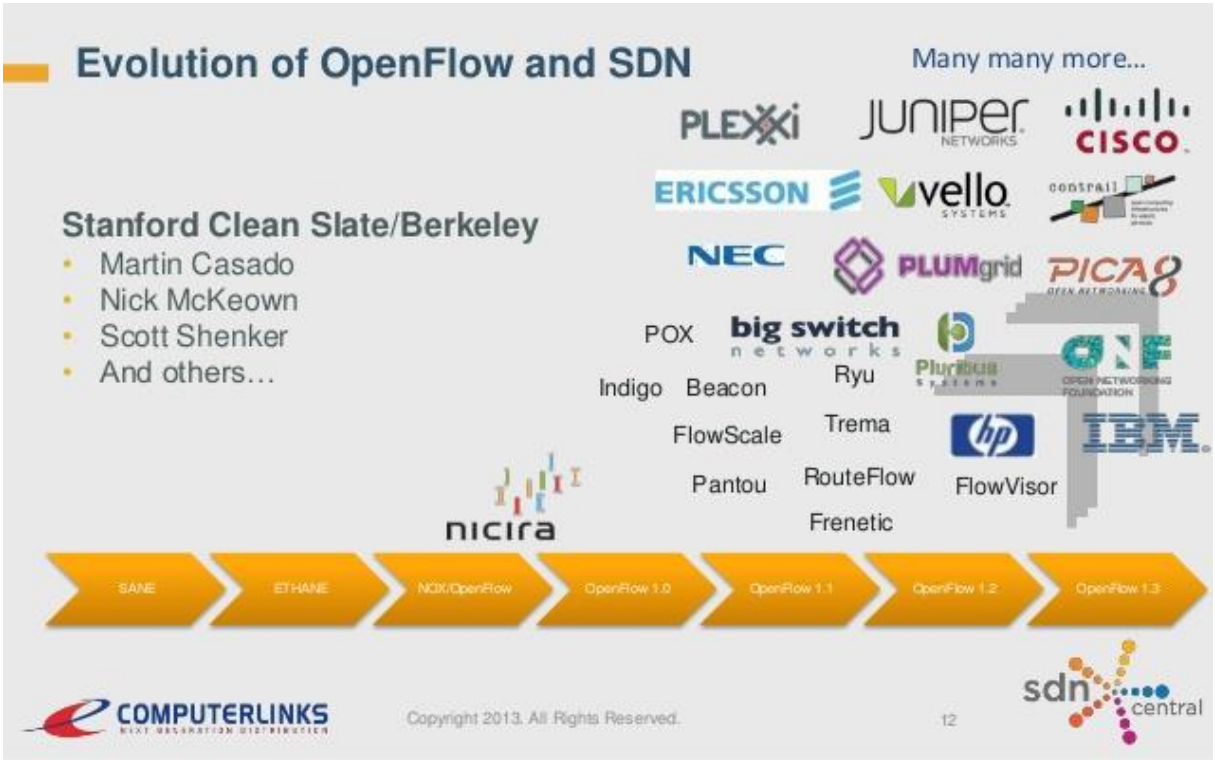
Η χρήση λογισμικού ανοιχτού κώδικα σε αρχιτεκτονικές διαχωριζόμενης διαχείρισης / με τα πλάνα δεδομένων να εντοπίζουν τις ρίζες τους στο έργο Ethane στο τμήμα επιστημών υπολογιστών του Στάνφορντ. Ο απλός σχεδιασμός μεταγωγέα της Ethane οδήγησε στη δημιουργία του OpenFlow. Ένα API για OpenFlow δημιουργήθηκε για πρώτη φορά το 2008. Την ίδια χρονιά δημιουργήθηκε το NOX - ένα λειτουργικό σύστημα για δίκτυα.

Οι εργασίες στο OpenFlow συνεχίστηκαν στο Στάνφορντ, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας testbeds για την αξιολόγηση της χρήσης του πρωτοκόλλου σε ένα ενιαίο δίκτυο πανεπιστημίων, καθώς και σε ολόκληρο το WAN ως ραχοκοκαλιά για τη σύνδεση πολλών πανεπιστημίων. Σε ακαδημαϊκά περιβάλλοντα υπήρχαν μερικά δίκτυα έρευνας και παραγωγής που βασίζονται σε μεταγωγείς OpenFlow από NEC και Hewlett-Packard, καθώς επίσης βασίζεται σε λευκά κουτιά υπολογιστών Quanta , ξεκινώντας από περίπου το 2009.

Πέρα από τον ακαδημαϊκό χώρο, οι πρώτες αναπτύξεις έγιναν από τη Nicira το 2010 για τον έλεγχο του OVS από το Onix, που αναπτύχθηκε από κοινού με την NTT και την Google. Μια αξιοσημείωτη ανάπτυξη ήταν η ανάπτυξη B4 της Google το 2012. Αργότερα η Google αναγνώρισε το πρώτο OpenFlow τους με Onix αναπτύξεις στα Datacenters τους ταυτόχρονα. Μια άλλη γνωστή μεγάλη ανάπτυξη είναι η China Mobile.

Το Open Networking Foundation ιδρύθηκε το 2011 για την προώθηση του SDN και του OpenFlow.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας Interop και Tech Field 2014, η Avaya παρουσίασε δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό χρησιμοποιώντας τη βραχύτερη διαδρομή γεφύρωσης (IEEE 802.1aq) και το OpenStack ως αυτοματοποιημένη πανεπιστημιούπολη, επεκτείνοντας την αυτοματοποίηση από το κέντρο δεδομένων έως την τελική συσκευή, αφαιρώντας τη μη αυτόματη παροχή από την παροχή υπηρεσιών [21].



Εικόνα 17 : Ιστορική εξέλιξη των δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

4.3 Κατηγορίες δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

Τα δίκτυα ορισμένα από λογισμικό έχουν εφαρμογές σε μεγάλη ποικιλία δικτυωμένων περιβαλλόντων. Αποσυνδέοντας τον έλεγχο και τα επίπεδα δεδομένων, τα προγραμματιζόμενα δίκτυα επιτρέπουν την προσαρμογή ελέγχου. Μια ευκαιρία για την εξάλειψη των διαμεσολαβητών, μέρος μιας απλοποιημένης ανάπτυξης και ανάπτυξης νέου δικτύου υπηρεσιών και πρωτοκόλλων. Παρακάτω, θα εξετάσουμε διαφορετικά περιβάλλοντα για τα οποία έχουν προταθεί ή εφαρμοστεί λύσεις προγραμματιζόμενων δικτύων.

Α. Επιχειρησιακά δίκτυα

Οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν συχνά μεγάλα δίκτυα, ενώ έχουν επίσης αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας και απόδοσης. Επιπλέον, διάφορα επιχειρηματικά περιβάλλοντα μπορούν να έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις, χαρακτηριστικά και πληθυσμό χρηστών, για παράδειγμα, τα πανεπιστημιακά δίκτυα μπορούν να θεωρηθούν μια ειδική περίπτωση επιχειρηματικών δικτύων: σε ένα τέτοιο περιβάλλον, πολλές από τις συνδέσεις και τις συσκευές είναι προσωρινές και δεν ελέγχονται από το Πανεπιστήμιο, μια περαιτέρω πρόκληση ασφάλειας και κατανομής πόρων. Επιπροσθέτως, τα πανεπιστήμια πρέπει συχνά να παρέχουν υποστήριξη για ερευνητικά κέντρα και πειραματικά πρωτόκολλα. Η επαρκής διαχείριση είναι εξαιρετικά σημαντική για τα επιχειρηματικά περιβάλλοντα και τα προγραμματιζόμενα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προγραμματιστική επιβολή και προσαρμογή πολιτικών δικτύου καθώς και βοηθητική παρακολούθηση στην δραστηριότητα του δικτύου και συντονισμός της απόδοσης του δικτύου. Επιπλέον, τα προγραμματιζόμενα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απλοποίηση του δικτύου, μέσω απαλλάσσοντας από τους διαμεσολαβητές και ενσωματώνοντας τη λειτουργικότητά τους εντός του ελεγκτή δικτύου. Μερικά αξιοσημείωτα παραδείγματα λειτουργικότητας διαμεσολαβητών που έχουν εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας τα προγραμματιζόμενα δίκτυα περιλαμβάνει NAT, firewalls, διαχειριστές συμφόρησης και έλεγχος πρόσβασης δικτύου. Στην περίπτωση πιο περίπλοκων διαμεσολαβητών με λειτουργίες που δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα χωρίς υποβάθμιση απόδοσης (π.χ. deep packet inspection), τα προγραμματιζόμενα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ενοποιημένου ελέγχου και διαχείρισης. Σε αυτό το έργο που παρουσιάστηκαν σχετικά ζητήματα σε συνεπείς ενημερώσεις δικτύου.

Οι αλλαγές διαμόρφωσης είναι μια κοινή πηγή αστάθειας στα δίκτυα και μπορεί να οδηγήσει σε διακοπές λειτουργίας, ατέλειες ασφαλείας και διακοπές στην απόδοση. Προτείνεται ένα σύνολο αφαιρέσεων υψηλού επιπέδου που επιτρέπουν σε διαχειριστές δικτύου να ενημερώσουν ολόκληρο το δίκτυο, εγγυόνται ότι κάθε πακέτο που διέρχεται από το δίκτυο υποβάλλεται σε επεξεργασία, από μια σταθερή ενιαία διαμόρφωση δικτύου. Για να υποστηριχθούν αυτές τις αφαιρέσεις, αναπτύχθηκαν αρκετοί μηχανισμοί ενημερώσεων που βασίζονται στο OpenFlow. Όπως συζητήθηκε σε προηγούμενες ενότητες, το OpenFlow εξελίχθηκε από το Ethane, μια αρχιτεκτονική δικτύου σχεδιασμένη ειδικά για αντιμετώπιση των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα επιχειρήσεων.[22]

Β. Κέντρα δεδομένων

Τα κέντρα δεδομένων εξελίχθηκαν με εκπληκτικό ρυθμό τα τελευταία χρόνια, προσπαθώντας συνεχώς να συμπίπτουν με την όλο και πιο υψηλή και ταχέως μεταβαλλόμενη ζήτηση. Η προσεκτική διαχείριση της κυκλοφορίας και η επιβολή της πολιτικής είναι απαιτούμενη όταν λειτουργούν σε τόσο μεγάλη κλίμακα, ειδικά όταν υπάρχει οποιαδήποτε διακοπή της υπηρεσίας ή επιπλέον η καθυστέρηση μπορεί να οδηγήσει σε μαζική παραγωγικότητα ή / και απώλεια κέρδους. Λόγω των προκλήσεων των μηχανικών δικτύων αυτής της κλίμακας και την πολυπλοκότητα για δυναμική προσαρμογή στις απαιτήσεις των εφαρμογών, συχνά τα κέντρα δεδομένων παρέχονται για μέγιστες απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, λειτουργούν πολύ κάτω από τη χωρητικότητα τους τον περισσότερο χρόνο, αλλά είναι έτοιμα να εξυπηρετήσουν γρήγορα υψηλότερους φόρτους εργασίας. Ένα όλο και πιο σημαντικό ζήτημα είναι η κατανάλωση ενέργειας, το οποίο έχει σημαντικό κόστος σε κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Η Heller αναφέρει ότι έχει επικεντρωθεί σε μια μεγάλη έρευνα σε βελτιωμένους διακομιστές και ψύξη (70% της συνολικής ενέργειας) μέσω καλύτερης διαχείρισης υλικού ή λογισμικού, αλλά η υποδομή δικτύου ενός κέντρου δεδομένων (που αντιπροσωπεύει το 10-20% του συνόλου του ενεργειακό κόστους) κατανάλωσε ακόμη και 3 δισεκατομμύρια kWh το 2006. Αυτή πρότεινε το ElasticTree, έναν διαχειριστή ισχύος σε όλο το δίκτυο που χρησιμοποιεί προγραμματιζόμενα δίκτυα για να βρει το υποσύνολο του δικτύου ελάχιστης ισχύος που ικανοποιεί τις τρέχουσες συνθήκες κυκλοφορίας και απενεργοποιεί τους μεταγωγείς που δεν χρειάζονται. Ως αποτέλεσμα, υπήρξε εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 25-62% υπό διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας. Μπορεί κανείς να φανταστεί πως αυτές οι εξοικονομήσεις μπορούν να αυξηθούν περαιτέρω εάν χρησιμοποιηθούν παράλληλα με διαχείριση διακομιστή και εικονικοποίηση, μια πιθανότητα είναι το Honeyguide.

Μια προσέγγιση για βελτιστοποίηση ενέργειας που χρησιμοποιεί μετεγκατάσταση εικονικής μηχανής για αύξηση του αριθμού των μηχανών και μεταγωγείς που μπορούν να τερματιστούν. Ωστόσο, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες όλες οι λύσεις επιδόσεων προγραμματιζόμενων δικτύων. Ενώ απλοποιήθηκε η διαχείριση της κυκλοφορίας και η ορατότητα αποδείχθηκε χρήσιμη, πρέπει να είναι και ισορροπημένη λογικά η επεκτασιμότητα και γενικά η απόδοση. Η Curtis πιστεύει πως το OpenFlow συνδυάζει υπερβολικά τον κεντρικό έλεγχο και ολοκληρώνει την ορατότητα, όταν στην πραγματικότητα χρειάζονται μόνο «σημαντικές» ροές για διαχείριση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημεία συμφόρησης, το αντίθετο δηλαδή, ότι η επικοινωνία προσθέτει καθυστέρηση στη ρύθμιση της ροής ενώ αλλάζει και υπερφορτώνει με χιλιάδες καταχωρήσεις τον πίνακα ροής. Αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επιθετική χρήση προληπτικών πολιτικών και κανόνων μπαλαντέρ, αυτό αντί να επιλύσει αυτό το ζήτημα, ενδέχεται να υπονομεύσει την ικανότητα του ελεγκτή να έχει τη σωστή λεπτομέρεια, για αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας και συλλογή στατιστικών. Το πλαίσιο DevoFlow, προτείνει μερικές μικρές αλλαγές στο σχεδιασμό για να διατηρήσουν τις ροές στο επίπεδο δεδομένων όσο το δυνατόν περισσότερες, διατηρώντας παράλληλα αρκετή ορατότητα για αποτελεσματική διαχείριση ροής. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ευθύνη για τις περισσότερες ροές, πίσω στους μεταγωγείς και προσθέτοντας πιο αποτελεσματικούς μηχανισμούς συλλογής στατιστικών, μέσω των πιο «σημαντικών» ροών (π.χ. μακράς διάρκειας, υψηλή απόδοση) όπου αναγνωρίζεται και διαχειρίζεται από τον ελεγκτή. Σε μία προσομοίωση εξισορρόπησης φορτίου, η λύση τους είχε 10-53 φορές μικρότερο πίνακα ροής καταχωρήσεων και 10-42 φορές λιγότερα μηνύματα ελέγχου κατά μέσο όρο πάνω από το OpenFlow. Ένα πρακτικό παράδειγμα μιας πραγματικής εφαρμογής των προγραμματιζόμενων δικτύων σε έννοια και αρχιτεκτονική στο πλαίσιο των κέντρων δεδομένων παρουσιάστηκε από την Google στις αρχές του 2012. Η εταιρεία παρουσίασε το Open Network Summit, μια εφαρμογή μεγάλης κλίμακας ενός δικτύου που βασίζεται σε SDN που συνδέει τα κέντρα δεδομένων του. Η εργασία παρουσιάζει με περισσότερες λεπτομέρειες το σχεδιασμό, την υλοποίηση, και αξιολόγηση του B4, ενός WAN που συνδέει τα κέντρα δεδομένων της Google παγκοσμίως. Αυτή η εργασία περιγράφει ένα από τα πρώτα και μεγαλύτερα σε ανάπτυξη SDN. Το κίνητρο ήταν η ανάγκη για εξατομικευμένη δρομολόγηση και μηχανική κυκλοφορίας και το γεγονός ότι το επίπεδο επεκτασιμότητας, ανοχής σφαλμάτων, αποδοτικότητας κόστους και ελέγχου που απαιτείται, δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω μιας παραδοσιακής αρχιτεκτονικής WAN.

Προτάθηκε μια προσαρμοσμένη λύση και μια αρχιτεκτονική SDN με βάση το OpenFlow, όπου δημιουργήθηκε για έλεγχο μεμονωμένων μεταγωγέων. Μετά από τρία χρόνια παραγωγής, το B4 αποδεικνύεται αποτελεσματικό υπό την έννοια ότι οδηγεί πολλούς συνδέσμους σε σχεδόν 100% της χρήσης, ενώ διαχωρίζει τις ροές μεταξύ πολλαπλών μονοπατιών. Επιπλέον, η εμπειρία που αναφέρεται στο έργο, δείχνει ότι η συμφόρηση που προκύπτει από το επίπεδο ελέγχου στο επίπεδο δεδομένων επικοινωνία και γενικά στον προγραμματισμό υλικού είναι σημαντικά ζητήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε μελλοντικές εργασίες [23].

Γ. Δίκτυα ασύρματης πρόσβασης βάση υποδομής

Πολλές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα στο πλαίσιο των δικτύων ασύρματης πρόσβασης με βάση την υποδομή, όπως το κινητό και το WiFi. Για παράδειγμα, το έργο OpenRoads οραματίζεται ένα κόσμο στον οποίο οι χρήστες θα μπορούσαν ελεύθερα να περάσουν διαφορετικές ασύρματες υποδομές τις οποίες μπορούν να διαχειριστούν διάφοροι πάροχοι. Πρότειναν την ανάπτυξη μιας ασύρματης αρχιτεκτονικής βασιζόμενη σε SDN που να είναι αμφίδρομα συμβατή, αλλά ελεύθερο και κοινόχρηστο μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών. Αυτοί χρησιμοποιήσαν μια δοκιμαστική πλατφόρμα χρησιμοποιώντας ασύρματες συσκευές με δυνατότητες OpenFlow όπως WiFi APs και WiMAX σταθμούς βάσης που ελέγχονται από ελεγκτές NOX- και Flowvisor και δείχνουν βελτιωμένη απόδοση σε μετάδοση. Το όραμά τους παρείχε έμπνευση για επακόλουθη εργασία που επιχειρεί να αντιμετωπίσει συγκεκριμένες απαιτήσεις και προκλήσεις κατά την ανάπτυξη ενός λογισμικού που καθορίζεται από κυψελοειδές δίκτυο. Ο Odin εισάγει προγραμματισμό στο εταιρικό ασύρματο περιβάλλον LAN. Συγκεκριμένα, δημιουργεί ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης στον ελεγκτή που διαχωρίζει την κατάσταση συσχέτισης από το φυσικό σημείο πρόσβασης, επιτρέποντας την ενεργητική κινητικότητα διαχείρισης και εξισορρόπησης φορτίου χωρίς αλλαγές στον πελάτη. Στο άλλο άκρο του φάσματος, το OpenRadio εστιάζει στην ανάπτυξη ενός προγραμματιζόμενου ασύρματου επιπέδου δεδομένων που παρέχει ευελιξία στα επίπεδα PHY και MAC (σε αντίθεση με το επίπεδο-3 SDN) ενώ τηρεί αυστηρές επιδόσεις και χρονικά πλαίσια. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια αρθρωτή διεπαφή που είναι σε θέση να επεξεργάζεται υποσύνολα κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας διαφορετικά πρωτόκολλα όπως ως το WiFi, το WiMAX, το 3GPP LTE-Advanced, κ.λπ.

Με βάση το ιδέα του διαχωρισμού των αποφάσεων και των πλάνων προώθησης, ο διαχειριστής μπορεί να εκφράσει τους κανόνες πλάνου αποφάσεων και αντίστοιχων δράσεων, οι οποίες συναρμολογούνται από την επεξεργασία μονάδων επιπέδου (π.χ. FFT, αποκωδικοποίηση Viterbi, κ.λπ.) το τελικό αποτέλεσμα είναι μια στατική μηχανή που εκφράζει ένα πλήρως λειτουργικό πρωτόκολλο [24].

Δ. Οπτικά δίκτυα

Ο χειρισμός της κίνησης δεδομένων ως ροές, επιτρέπει στα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό, και στα OpenFlow δίκτυα ειδικότερα, την υποστήριξη και την ενοποίηση πολλαπλών τεχνολογιών δικτύου. Ως αποτέλεσμα, είναι δυνατόν να παρέχει επίσης τεχνολογία ενοποιημένου ελέγχου για δίκτυα οπτικών μεταφορών και διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης μεταξύ αμφότερων των δικτύων πακέτων και μεταγωγής κυκλώματος. Σύμφωνα με την Ομάδα εργασίας οπτικών μεταφορών (OTWG) που δημιουργήθηκε το 2013 από το Open Network Foundation (ONF), τα οφέλη από την εφαρμογή των προγραμματιζόμενων δικτύων και του πρότυπου OpenFlow ειδικότερα στα δίκτυα οπτικών μεταφορών περιλαμβάνουν: βελτίωση οπτικών μεταφορών, ευελιξία ελέγχου και διαχείρισης δικτύου, που επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου τρίτων, ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, αξιοποιώντας την εικονικοποίηση και το SDN. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες και προτάσεις για έλεγχο στα δίκτυα που έχουν αλλάξει κύκλωμα και στα πακέτα που χρησιμοποιούν το Πρωτόκολλο OpenFlow. Χρησιμοποιείται μια πλατφόρμα NetFPGA στην πρόταση αλλαγής πακέτου και εναλλαγής κυκλώματος αρχιτεκτονικών δικτύων με βάση την επιλεκτική εναλλαγή μήκους κύματος (WSS), χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο OpenFlow. Ένας άλλος έλεγχος αρχιτεκτονικής πλάνων με βάση το OpenFlow για την ενεργοποίηση του SDN λειτουργεί προτεινόμενα σε οπτικό δίκτυο στο οποίο συζητά συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιγράφει την εφαρμογή των επεκτάσεων πρωτοκόλλου OpenFlow για την υποστήριξη δικτύων οπτικών μεταφορών. Μια επίδειξη της απόδειξης της έννοιας ενός OpenFlow, παρουσιάζει ο έλεγχος διαδρομής μήκους κύματος σε διαφανή οπτικά δίκτυα. Σε αυτήν την εργασία, εικονικές διεπαφές Ethernet (veths) εισάγονται. Αυτοί οι veths, χαρτογραφούνται σε φυσικές διεπαφές ενός οπτικού κόμβου (π.χ. φωτονική διασύνδεση - PXC) και ενεργοποιείται ένας ελεγκτής SDN (π.χ. τον ελεγκτή NOX σε αυτήν την περίπτωση) για τη λειτουργία των οπτικών lightpaths (π.χ. μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow).

Στην πειραματική τους εγκατάσταση, αξιολογούν ποσοτικά μετρήσεις απόδοσης δικτύου, όπως ο λανθάνων χρόνος του lightpath, την εγκατάσταση και την απελευθέρωση, και επαληθεύει τη δυνατότητα δρομολόγησης και εκχώρησης μήκους κύματος και δυναμικού ελέγχου οπτικών κόμβων σε ένα δίκτυο που βασίζεται σε OpenFlow και αποτελείται από τέσσερεις PXC κόμβους σε τοπολογία πλέγματος. Η Αρχιτεκτονική οπτικού δικτύου (SDON) εισάγεται στο ενοποιημένο πρωτόκολλο ελέγχου QoS για οπτική εναλλαγή ριπής σε SDON με βάση το OpenFlow. Έτσι αξιολογήθηκε η απόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου με το συμβατικό κατανεμημένο πρωτόκολλο GMPLS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η SDON προσφέρει μια υποδομή, για υποστήριξη ενοποιημένων πρωτοκόλλων ελέγχου για καλύτερη βελτιστοποίηση του δικτύου σε απόδοση και βελτίωση της ικανότητας [25].

Ε. Οικιακά και δίκτυα μικρών επιχειρήσεων

Αρκετά έργα εξέτασαν πώς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το SDN σε μικρότερα δίκτυα, όπως αυτά που βρίσκονται στο σπίτι ή σε μικρές επιχειρήσεις. Καθώς αυτά τα περιβάλλοντα έχουν γίνει όλο και περισσότερο πολύπλοκα και διαδεδομένα με την ευρεία διαθεσιμότητα χαμηλού κόστους συσκευών δικτύου, η ανάγκη για πιο προσεκτική διαχείριση δικτύου και η αυστηρότερη ασφάλεια έχει αυξηθεί αντίστοιχα. Τα μη ασφαλή δίκτυα μπορεί να γίνουν ανεπιθύμητοι στόχοι ή να φιλοξενούν κακόβουλο λογισμικό, ενώ οι διακοπές λειτουργίας λόγω ζητημάτων διαμόρφωσης δικτύου μπορεί να προκαλέσουν απογοήτευση ή απώλειες στην επιχείρηση. Δυστυχώς αυτό δεν είναι πρακτικό, να υπάρχει ένας αποκλειστικός διαχειριστής δικτύου σε κάθε σπίτι και γραφείο. Οι Calvert ισχυρίζονται ότι το πρώτο βήμα στη διαχείριση του οικιακών δικτύων είναι να γνωρίζουν τι πραγματικά συμβαίνει σε αυτά. Αυτοί πρότειναν να λειτουργήσει η πύλη / ελεγκτής δικτύου για να ενεργήσει ως "Home Network Data Recorder" και να δημιουργηθούν αρχεία καταγραφής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση προβλημάτων ή για άλλους σκοπούς. Ο Feamster προτείνει να λειτουργούν τέτοια δίκτυα με τρόπο «plug in and forget», δηλαδή με εξωτερική ανάθεση διαχείρισης σε τρίτους εμπειρογνώμονες, και αυτό θα μπορούσε να επιτυγχάνεται μέσω του τηλεχειριζόμενου προγραμματιζόμενου μεταγωγέα και την εφαρμογή αλγόριθμων παρακολούθησης κατανεμημένου δικτύου και συμπερασμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση πιθανών προβλημάτων ασφαλείας.

Αντιθέτως, οι Mortier πιστεύουν ότι οι χρήστες επιθυμούν μεγαλύτερη κατανόηση και έλεγχο της συμπεριφοράς των δικτύων τους. Αντί να ακολουθούνται οι παραδοσιακές πολιτικές, ένα οικιακό δίκτυο μπορεί να διαχειρίζεται καλύτερα τους χρήστες του, που κατανοούν καλύτερα τη δυναμική και τις ανάγκες του περιβάλλοντός τους. Προς αυτό το στόχο, δημιούργησαν ένα πρωτότυπο δίκτυο στο οποίο χρησιμοποιείται το SDN για να παρέχουν στους χρήστες μια άποψη για το πώς χρησιμοποιείται το δίκτυό τους προσφέροντας τους ένα μόνο σημείο ελέγχου. Ο Mehdi υποστηρίζει ότι ένα σύστημα ανίχνευσης ανωμαλιών (ADS) που υλοποιείται εντός ενός προγραμματιζόμενου οικιακού δικτύου παρέχει μια πιο ακριβή αναγνώριση κακόβουλης δραστηριότητας σε σύγκριση με αυτό που αναπτύχθηκε στον ISP. Επιπλέον, η εφαρμογή θα είναι σε θέση να λειτουργεί με ρυθμό γραμμής χωρίς ποινή απόδοσης, ενώ ταυτόχρονα με αποσυγχρονίζοντας τον ISP, πρέπει να παρακολουθεί αυτόν τον μεγάλο αριθμό δικτύων. Ο αλγόριθμος ADS θα μπορούσε να λειτουργεί παράλληλα με άλλους ελεγκτές υπηρεσίες, όπως ένα HomeOS που ενδέχεται να αντιδρά σε ύποπτη δραστηριότητα και να αναφέρει ανωμαλίες στον ISP ή στον τοπικό διαχειριστή [26].

4.3.1 Χαρακτηριστικά δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

Καθώς το SDN διαχωρίζει τις αποφάσεις δρομολόγησης και προώθησης στοιχείων δικτύωσης (π.χ. δρομολογητές, μεταγωγείς και σημεία πρόσβασης) από το επίπεδο δεδομένων, η διαχείριση του δικτύου καθίστανται απλή επειδή το επίπεδο ελέγχου ασχολείται μόνο με τις πληροφορίες που σχετίζονται με τη λογική τοπολογία δικτύου, τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας και ούτω καθεξής. Αντίθετα, το επίπεδο δεδομένων ενορχηστρώνει την κίνηση του δικτύου σύμφωνα με την καθορισμένη διαμόρφωση στο επίπεδο ελέγχου. Στο SDN, οι λειτουργίες ελέγχου συγκεντρώνονται σε έναν ελεγκτή που υπαγορεύει τις πολιτικές δικτύου. Πολλές πλατφόρμες ελεγκτών είναι ανοιχτού κώδικα όπως το Floodlight , το OpenDayLight και το Beacon. Η διαχείριση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί σε διαφορετικά επίπεδα (π.χ. εφαρμογή, έλεγχος και επίπεδο δεδομένων). Για παράδειγμα, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να εκχωρήσουν πόρους σε πελάτες μέσω επιπέδου εφαρμογής, να διαμορφώσουν και να τροποποιήσουν πολιτικές δικτύου και λογικές οντότητες στο επίπεδο ελέγχου και να ρυθμίσουν φυσικά στοιχεία δικτύου στο επίπεδο δεδομένων. Επιπλέον, η ζήτηση για υπηρεσίες cloud με τις διάφορες μορφές της (π.χ. SaaS, PaaS, IaaS, Network - as - a - Service [NaaS], DaaS, UCaaS κ.λπ.) αυξάνεται δραστικά. Αν και αυτές οι υπηρεσίες συγκεντρώνονται σε κέντρα δεδομένων, θέτουν σημαντικές προκλήσεις για τους παρόχους υπηρεσιών. Με την ταχεία ανάπτυξη των απαιτήσεων των πελατών, ο χειριστής υποχρεούται να ανταποκριθεί ανάλογα, λαμβάνοντας υπόψη πρόσθετους διακομιστές, στοιχεία δικτύου, υψηλή ποιότητα υπηρεσιών και ασφαλή αρχιτεκτονική τηρώντας ωστόσο τα πρότυπα. Αυτό γενικά έρχεται πρώτο με κόστος μη αμελητέας προσπάθειας για την αντιμετώπιση νέων προκλήσεων που εμφανίζονται στο κεντρικό δίκτυο όπου το SDN οδηγεί και κυβερνά. Συγκεκριμένα, οι προκλήσεις και τα ζητήματα που εμφανίζονται υψίστης σημασίας στο περιβάλλον SDN είναι τα ακόλουθα:

Επεκτασιμότητα : Αυτό καθορίζει την ικανότητα του SDN, πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο ελέγχου, να χειρίζεται και να επεξεργάζεται έναν αυξανόμενο φόρτο εργασίας. Η δυνατότητα κλιμάκωσης στοχεύει στη διεύρυνση της χωρητικότητας του SDN με την εφαρμογή μηχανισμών όπως το devolving, το clustering και το high processing για την αντιμετώπιση του αυξανόμενου φορτίου.

Αξιοπιστία : Το SDN θεωρείται αξιόπιστο όταν ειδοποιεί για αποτυχίες παράδοσης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, θα πρέπει να υπάρχει καθορισμένη ελάχιστη αξιοπιστία για την παράδοση κρίσιμων δεδομένων. Στις σημερινές υλοποιήσεις, οι ελεγκτές SDN πρέπει να είναι ικανοί να πληρούν τις απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο για αξιόπιστη παράδοση και επικαιρότητα.

Υψηλή διαθεσιμότητα : Είναι μια σημαντική πτυχή των σημερινών υπηρεσιών που πρέπει να είναι διαθέσιμες κάθε φορά που ένας πελάτης ζητά μια δεδομένη υπηρεσία ή πόρο. Η διαθεσιμότητα εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό του χρόνου λειτουργίας σε ένα δεδομένο έτος. Η μη διαθεσιμότητα υπηρεσιών μπορεί γενικά να συμβεί λόγω διακοπής λειτουργίας δικτύου ή διακοπής λειτουργίας συστήματος. Οι πάροχοι δικτύου αναπτύσσουν γενικά εφεδρικές υπηρεσίες για να προσφέρουν υψηλή διαθεσιμότητα εφαρμόζοντας περιττό υλικό διακομιστή, λειτουργικό σύστημα διακομιστή και στοιχεία δικτύου και ούτω καθεξής.

Ελαστικότητα : Η ελαστικότητα είναι η ικανότητα του SDN να προσαρμόζει δυναμικά την χωρητικότητά του κλιμακώνοντας προς τα πάνω ή προς τα κάτω τους διαθέσιμους πόρους, προκειμένου να ανταποκριθεί στη διακύμανση του φόρτου εργασίας. Γενικά, η ελαστικότητα συχνά εστιάζεται στο επίπεδο ελέγχου και μπορεί να αναφέρεται ως επεκτασιμότητα.

Ασφάλεια : Η ασφάλεια των SDN συνίσταται στην προστασία των πληροφοριών από κλοπή ή ζημιά στο υλικό και το λογισμικό καθώς και από τη διακοπή των υπηρεσιών. Η εξασφάλιση του SDN περιλαμβάνει τη φυσική ασφάλεια του υλικού, καθώς και την αποτροπή λογικών απειλών που ενδέχεται να προέρχονται από το δίκτυο ή τα δεδομένα. Τα τρωτά σημεία του SDN είναι η πόρτα εισόδου σε επιθέσεις ασφαλείας που είναι σκόπιμες ή τυχαίες.

Απόδοση : Η απόδοση αναφέρεται στον αριθμό των εργασιών που επιτυγχάνονται από στοιχεία SDN σε σύγκριση με το χρόνο / τους πόρους (π.χ. CPU και RAM) που χρησιμοποιούνται. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για τη μέτρηση της απόδοσης ενός δικτύου, καθώς κάθε δίκτυο έχει διαφορετικό χαρακτήρα και σχεδιασμό. Όσον αφορά το SDN, τα σημαντικά μέτρα είναι το εύρος ζώνης, η απόδοση, ο λανθάνων χρόνος και το jitter.

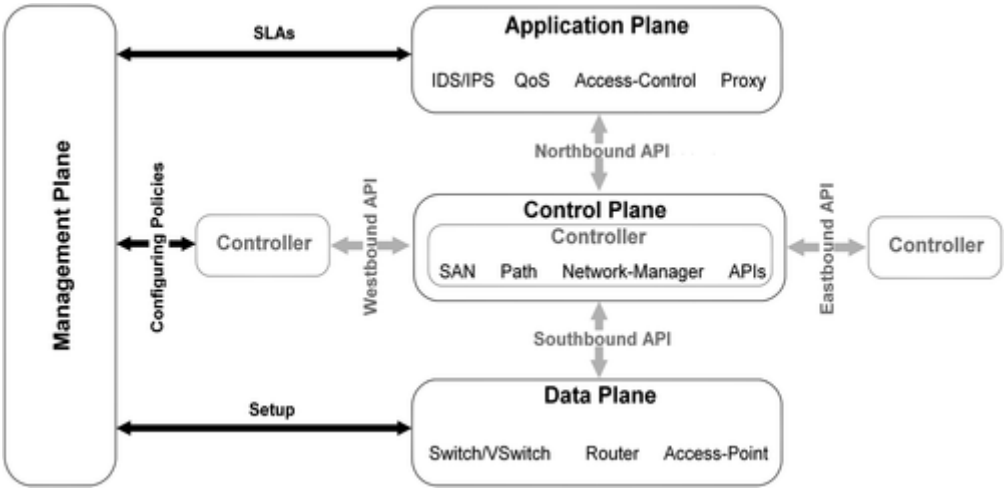
Ανθεκτικότητα : Η ανθεκτικότητα στο SDN είναι η δυνατότητα διασφάλισης και διατήρησης ενός αποδεκτού επιπέδου υπηρεσίας ακόμη και σε περίπτωση αποτυχίας υπηρεσίας, δικτύου ή κόμβου. Όταν ένα στοιχείο SDN είναι ελαττωματικό, το δίκτυο πρέπει να παρέχει μια συνεχή λειτουργική υπηρεσία με την ίδια απόδοση. Προκειμένου να αυξηθεί η ανθεκτικότητα του SDN, πρέπει να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν πιθανές προκλήσεις / κίνδυνοι για την προστασία των υπηρεσιών.

Αξιοπιστία : Η αξιοπιστία του SDN συνδέεται στενά με τους όρους διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας. Η αξιοπιστία SDN στοχεύει κυρίως στην πρόληψη σφαλμάτων και στην εφαρμογή μηχανισμών ανοχής σφαλμάτων για την εγγύηση της παροχής υπηρεσιών ακόμη και σε υποβαθμισμένο επίπεδο. Εκτός από την υψηλή διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία, η ακεραιότητα και η συντηρησιμότητα είναι επίσης δύο σημαντικά χαρακτηριστικά αξιοπιστίας.

Χαρακτηριστικά	Αρχιτεκτονική SDN	Τυπική Αρχιτεκτονική
Προγραμματισμός	✓	
Κεντρικός έλεγχος	✓	
Διαμόρφωση επιρρεπή σε σφάλμα		✓
Πολύπλοκος έλεγχος δικτύου		✓
Ευελιξία δικτύου	✓	
Βελτιωμένη απόδοση	✓	
Εύκολη εφαρμογή	✓	
Αποτελεσματική διαμόρφωση	✓	
Βελτιωμένη διαχείριση	✓	

4.3.2 Επίπεδα δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

Σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα IP των οποίων οι λειτουργίες είναι αποκεντρωμένες, το SDN συγκεντρώνεται για να προσφέρει τομείς δικτύου σύνδεσης μεταξύ του πεδίου ελέγχου και δεδομένων στην ίδια υποδομή. Επιπλέον, το SDN επιτρέπει αμφίδρομη συμβατότητα με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα και πρότυπα (π.χ. IP, ARP, VLAN, Ethernet κ.λπ.)



Εικόνα 18 : Επίπεδα δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

Στην Εικόνα 18, η βασική αρχιτεκτονική του SDN χωρίζεται σε τρία επίπεδα. Το ανώτερο επίπεδο αρχιτεκτονικής SDN είναι ένα επίπεδο εφαρμογής που καθορίζει κανόνες και προσφέρει διαφορετικές υπηρεσίες, όπως τείχος προστασίας, έλεγχο πρόσβασης, IDS / IPS, ποιότητα υπηρεσίας, δρομολόγηση, υπηρεσία διακομιστή μεσολάβησης και εξισορρόπησης παρακολούθησης. Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για την αφαίρεση της διαχείρισης ελέγχου δικτύου SDN μέσω του βόρειου API (π.χ. OpenDaylight). Το δεύτερο στρώμα είναι γνωστό ως επίπεδο ελέγχου, το οποίο αποτελεί αφαίρεση της τοπολογίας του δικτύου. Ο ελεγκτής είναι το κύριο συστατικό που είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό πινάκων ροής και πολιτικών χειρισμού δεδομένων, καθώς και για την αφαίρεση της πολυπλοκότητας του δικτύου και τη συλλογή πληροφοριών δικτύου μέσω του νότιου API και τη διατήρηση μιας ενημερωμένης ολιστικής προβολής δικτύου.

Οι επικοινωνίες API προς το νότο μπορούν να αναπτυχθούν σε δύο διαφορετικά σενάρια:

- **Επικοινωνία σε ζώνη:** Σε αυτό το σενάριο, η κίνηση μεταξύ του ελεγκτή και οποιασδήποτε συσκευής δικτύου πρέπει να συμμορφώνεται με τους υπαγορευόμενους κανόνες ροής.
- **Επικοινωνία εκτός ζώνης:** Εδώ, η κίνηση δεν ακολουθεί τους κανόνες ροής. Αυτός ο τύπος ανάπτυξης απαιτεί εφαρμογή VLAN για την απομόνωση της ροής κίνησης από τις επικοινωνίες, η οποία εξαρτάται από τους κανόνες του OpenFlow.

Υπάρχουν επίσης API ανατολικά / δυτικά (π.χ. HyperFlow) που επιτρέπουν σε πολλούς ελεγκτές να ανταλλάσσουν πληροφορίες ελέγχου σχετικά με τη ροή στο επίπεδο δεδομένων. Μπορούμε να βρούμε αρκετούς υπάρχοντες ελεγκτές με βάση διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού (Python, C / C ++, Java, Ruby κ.λπ.) και πλατφόρμες όπως τα NOX, το Floodlight, το Beacon, το Maestro και το Trema. Το χαμηλότερο επίπεδο, το οποίο είναι γνωστό ως επίπεδο δεδομένων, παρέχει συσκευές δικτύωσης όπως φυσικούς ή εικονικούς μεταγωγείς, δρομολογητές και σημεία πρόσβασης και είναι υπεύθυνη για όλες τις δραστηριότητες δεδομένων, όπως προώθηση, κατακερματισμός και επανασυναρμολόγηση [27].

4.3.2.1 Επίπεδο Υλικού

Η υποδομή του SDN είναι σχεδόν ίδια με αυτή των παραδοσιακών δικτύων, δηλαδή αποτελείται από δικτυακό εξοπλισμό (δρομολογητές, μεταγωγείς, κλπ). Η κυριότερη διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι οι φυσικές συσκευές είναι απλά στοιχεία προώθησης της κίνησης χωρίς να έχουν κάποιο ενσωματωμένο λογισμικό για τον έλεγχο, ούτε λαμβάνουν αποφάσεις προώθησης των πακέτων. Η «εξυπνάδα» του δικτύου βρίσκεται σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου το οποίο ονομάζεται Network Operating System (NOS). Αυτά τα δίκτυα βρίσκονται πάνω από κάποιες διεπαφές (Openflow), οι οποίες επιτρέπουν τον δυναμικό προγραμματισμό ετερογενών στοιχείων προώθησης κάτι που ήταν δύσκολο μέχρι τώρα.

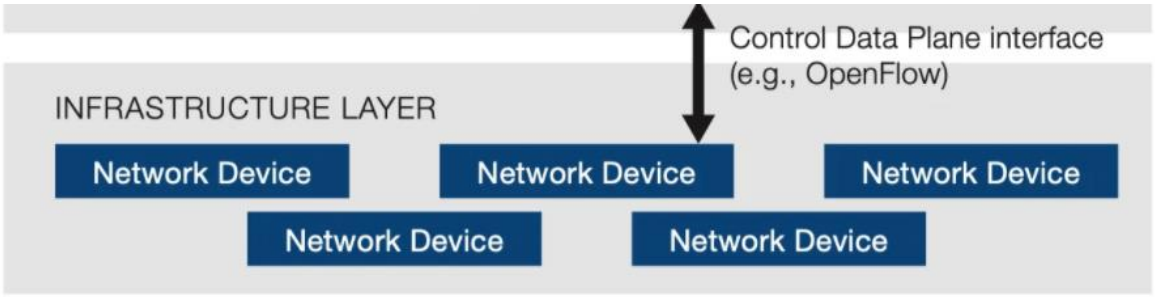
Σε μια αρχιτεκτονική SDN / OpenFlow υπάρχουν δύο κύρια στοιχεία, οι ελεγκτές (SDN Controller) και οι συσκευές προώθησης (SDN device). Μια συσκευή του επιπέδου δεδομένων είναι ένα υλικό ή στοιχείο λογισμικού που ειδικεύεται στην προώθηση των πακέτων, ενώ ελεγκτής είναι μια στοίβα λογισμικού (ο «εγκέφαλος του δικτύου») που τρέχει σε ένα μηχάνημα. Μια OpenFlow enabled συσκευή προώθησης βασίζεται σε έναν αγωγό που έχει πίνακες- ροής, όπου κάθε εγγραφή ενός πίνακα-ροής εξυπηρετεί τρεις λειτουργίες:

1. Να αντιστοιχηθούν οι ροές με τους κανόνες
2. Ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν όταν έχουμε αντιστοιχία των πακέτων
3. Μετρητές που κρατούν στατιστικά στοιχεία των πακέτα.

Αυτό το υψηλού επιπέδου και απλοποιημένο μοντέλο που προέρχεται από το OpenFlow είναι σήμερα ο πιο διαδεδομένος σχεδιασμός του SDN για τις συσκευές στο επίπεδο δεδομένων. Παρ 'όλα αυτά, υπάρχουν και άλλες προδιαγραφές για τις συσκευές προώθησης που υποστηρίζουν SDN, όπως οι POF και negotiable datapath models (NDMs) από τις ONF Forwarding Abstractions Working Group (FAWG). Μέσα σε μια συσκευή OpenFlow ένα μονοπάτι καθορίζεται μέσα από μια αλληλουχία πινάκων-ροής για το πώς πρέπει να αντιμετωπιστούν τα πακέτα. Όταν φθάνει ένα νέο πακέτο, η διαδικασία αναζήτησης ξεκινάει από τον πρώτο πίνακα και τελειώνει είτε με μία αντιστοίχιση σε έναν από τους πίνακες της αλληλουχίας ή με μια αστοχία (όταν δεν υπάρχει κανόνας για το πακέτο). Ένας κανόνας-ροής μπορεί να καθορίζεται από το συνδυασμό διαφορετικών πεδίων που ταιριάζουν. Εάν δεν υπάρχει κανένας κανόνας, το πακέτο θα απορριφθεί.

Ωστόσο, η κοινή πρακτική είναι να εγκαταστήσουμε έναν προεπιλεγμένο κανόνα που λέει στον μεταγωγέα να στείλει το πακέτο στον ελεγκτή OpenFlow ή ακόμα και σε μεταγωγείς που δεν υποστηρίζουν OpenFlow. Οι προτεραιότητες των κανόνων ακολουθούν τη φυσική αλληλουχία του αριθμού των πινάκων και της τάξης των σειρών σε έναν πίνακα-ροής. Οι δυνατές ενέργειες που μπορεί να δεχτεί ένα πακέτο είναι:

1. Να προωθηθεί το πακέτο στην εξερχόμενη πόρτα (πόρτες)
2. Να ενθυλακωθεί το πακέτο και να προωθηθεί στον ελεγκτή
3. Να απορριφθεί το πακέτο
4. Να σταλεί με την κανονική αλληλουχία της επεξεργασίας



Εικόνα 19 : Επίπεδο Υλικού προγραμματιζόμενων δικτύων

4.3.2.2 Επίπεδο Ελέγχου

Το επίπεδο ελέγχου είναι το πιο σημαντικό μέρος μιας υλοποίησης SDN. Ένας ελεγκτής συνδέεται με όλες τις συσκευές δικτύου στο επίπεδο υλικού και παρακολουθεί την τοπολογία. Ενώ ανταλλάσσουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου με εφαρμογές ανώτερου επιπέδου μέσω API από βορρά, ο ελεγκτής μετατρέπει τις εντολές του σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου σε συσκευές δικτύου προκειμένου να εκτελέσει τις επιθυμητές ενέργειες δικτύου. Η βασική εργασία για τον ελεγκτή είναι η προσθήκη και αφαίρεση καταχωρήσεων από τους πίνακες ροής που βρίσκονται στο επίπεδο δεδομένων μεταγωγέα. Ο ελεγκτής επικοινωνεί με μεταγωγείς μέσω πρωτοκόλλου OF χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη διεπαφή νότου. Για λόγους ασφαλείας, το OF διαθέτει ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό ασφαλείας που παραχωρεί τη χρήση του TLS σε ένα κανάλι ελέγχου OF. Αυτή η μέθοδος παρέχει έλεγχο ταυτότητας για το μεταγωγέα και τον ελεγκτή (εάν τα πιστοποιητικά ελέγχονται κατάλληλα και στις δύο πλευρές) για να σταματήσουν οι εισβολείς να πλαστοπροσωπήσουν έναν μεταγωγέα ή έναν ελεγκτή. Επιπλέον, παρέχεται μια κρυπτογράφηση του καναλιού ελέγχου για την παρεμπόδιση της υποκλοπής. Αυτό διαφέρει με κάθε εφαρμογή επειδή δεν έχει οριστεί. Ο ελεγκτής αναλαμβάνει όλες τις βασικές λειτουργίες, όπως διαχείριση και υπηρεσία τοπολογίας και είναι σε θέση να βελτιωθεί με πρόσθετα χαρακτηριστικά. Επιπλέον παρέχει πληροφορίες σε άλλες εξωτερικές εφαρμογές. Προς το παρόν δεν υπάρχει μοναδικό πρότυπο για επικοινωνία από βορρά. Έχουν καταβληθεί ορισμένες προσπάθειες για την ενίσχυση του επιπέδου αφαίρεσης μέσω του σχεδιασμού γλωσσών προγραμματισμού δικτύου σε επίπεδο εφαρμογών του SDN. Παραδείγματα τέτοιων γλωσσών είναι οι Nettle και PonderFlow. Τέλος, μέσω των ανατολικών και δυτικών διεπαφών ο ελεγκτής μπορεί να συνδεθεί με άλλους ελεγκτές. Ορισμένοι από τους τρέχοντες ελεγκτές ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα εφευρέθηκαν όχι μόνο για εμπορικούς στόχους αλλά και για ακαδημαϊκούς και δοκιμαστικούς στόχους και παρουσιάζονται στην εικόνα 20 [28].

Controller Name	Programming language	Developer
NOX	C++ & Python	Nicira
Floodlight	Java	Big Switch Networks
POX	Python	Nicira
Beacon	Java	Stanford University
Ryu	Python	NTT Communications
OpenDaylight	Java	OpenDaylight Project
Onos	Java	Open Networking Lab

Εικόνα 20 : Controllers SDN

4.3.2.3 Επίπεδο Εφαρμογών

Το επίπεδο εφαρμογής είναι το επίπεδο στο οποίο καθορίζονται όλα τα χαρακτηριστικά, οι υπηρεσίες και οι κανόνες. Οι εφαρμογές απαιτούν τις πληροφορίες των συσκευών δικτύου και την τοπολογία προκειμένου να αντιδράσουν σε αυτό. Αυτές οι εφαρμογές είναι σε θέση να δημιουργούν χαρακτηριστικά από άκρο σε άκρο και να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει αλλαγών στο δίκτυο. Όταν τροποποιείται η τοπολογία του δικτύου, οι λειτουργίες ή οι απαιτήσεις πολιτικής, οι εφαρμογές μπορούν να αλλάξουν δυναμικά τη συμπεριφορά του δικτύου. Τα βασικά εργαλεία επικοινωνίας μεταξύ των αναφερόμενων επιπέδων παρέχονται μέσω των εφαρμογών προγραμματισμού διεπαφών (API). Το εύρος εφαρμογών SDN περιλαμβάνει τους ακόλουθους τομείς:

• Επιβολή πολιτικών ασφάλειας και πρόσβασης

• Εξισορρόπηση φορτίου

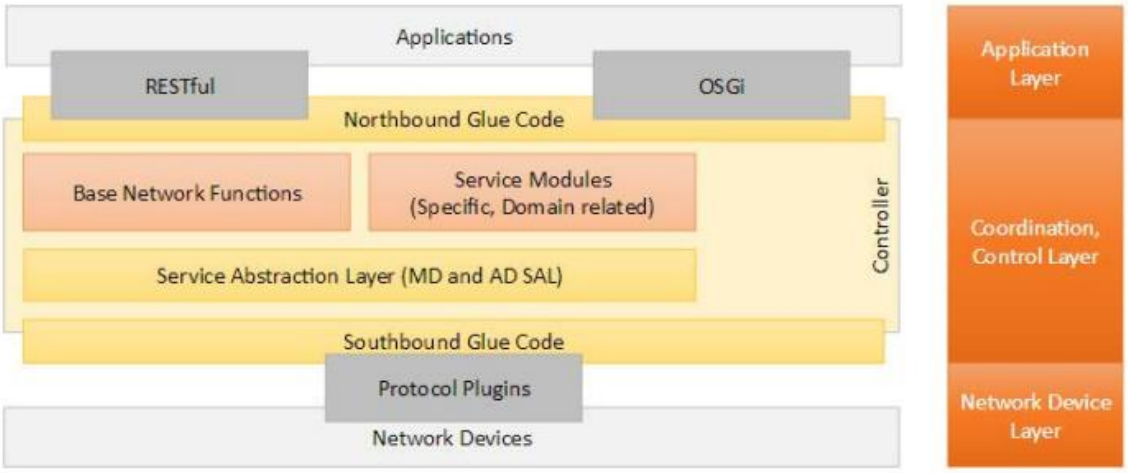
• Μηχανική κυκλοφορίας

• Εφαρμογή της πολιτικής QoS

• Παρακολούθηση και διαχείριση δικτύου

Τα API προς τα βόρεια παρέχονται για να επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή και των εφαρμογών του. Προς το παρόν, δεν υπάρχει πρότυπο για το σχεδιασμό αυτής της διεπαφής, ωστόσο πολλοί ελεγκτές SDN έχουν αναπτυχθεί με το REST API. Το REST ως αρχιτεκτονική προσέγγιση είναι το πιο χρησιμοποιημένο για τις σύγχρονες υπηρεσίες. Άλλα δημοφιλή API είναι η C ++, η JAVA και η Python. Η επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή και των επιπέδων δεδομένων δικτύου γίνεται μέσω του Southbound API. Το πρωταρχικό αρχιτεκτονικό θεμέλιο του ελεγκτή OpenDaylight αποτελείται από τη λειτουργικότητα εφαρμογής και υπηρεσίας, που ελέγχεται από την εφαρμογή ενός στρώματος αφαίρεσης υπηρεσίας (SAL). Ο ελεγκτής εκθέτει ανοιχτά τα Βόρεια API, τα οποία χρησιμοποιούνται από εφαρμογές. Το OpenDaylight, υποστηρίζει τόσο το OSGi framework όσο και τα αμφίδρομα REST APIs στο βορειότερο επίπεδο. Το πλαίσιο OSGi χρησιμοποιείται κυρίως από εφαρμογές που θα εκτελούνται στον ίδιο χώρο διευθύνσεων με τον ελεγκτή, ενώ το REST (βασισμένο στο Web) API χρησιμοποιείται από εφαρμογές που μπορούν να εκτελούνται σε ίδιο μηχάνημα με τον ελεγκτή ή σε διαφορετικό μηχάνημα. Αυτές οι εφαρμογές συνήθως συνειδητοποιούν επιχειρηματική λογική και μπορεί να περιλαμβάνουν όλες τις απαραίτητες μεθόδους.

Σε άλλους ελεγκτές, οι εφαρμογές προς το βορρά χρησιμοποιούν τον ελεγκτή για τη συλλογή πληροφοριών δικτύου, την εκτέλεση αλγορίθμων για την εκτέλεση αναλυτικών στοιχείων και, στη συνέχεια, τη χρήση του ελεγκτή για την ενορχήστρωση των νέων κανόνων, εάν υπάρχουν, σε όλο το δίκτυο [29].



Εικόνα 21 : Επίπεδο Εφαρμογών προγραμματιζόμενων δικτύων

4.4 Υπάρχουσες υλοποιήσεις δικτύων οριζόμενα από λογισμικό

Υλοποιήσεις στον τομέα του Software Defined Networking υπάρχουν ήδη από το 2010 και ως τεχνολογία έχει εφαρμοστεί από κολοσσούς στον χώρο της πληροφορικής και του διαδικτύου για την αποτελεσματικότερη διαχείριση και την επέκταση των δικτύων τους. Επειδή πρόκειται για μία αρχιτεκτονική που απευθύνεται κυρίως σε δίκτυα μεγάλου και μεσαίου μέγεθος προς το παρόν έχει υλοποιηθεί σε μεγάλες εταιρίες, καθώς απαιτείται (όπως κάθε νέα τεχνολογία) ένα μεγάλο οικονομικό κεφάλαιο και άτομα με τεχνογνωσία για να εφαρμοστεί σε πραγματικό περιβάλλον. Ανάμεσα στις εταιρίες που έχουν υλοποιήσει/συμβάλλει στο Software Defined Networking εντοπίζουμε τις Google, Microsoft, NSA, Facebook, Vmware, Deutsche Bank και άλλους.

Google : Προφανώς η Google λειτουργεί ένα τεράστιο δίκτυο. Είναι τόσο μεγάλο που μια μελέτη του 2010 από την Arbor Networks κατέληξε στο συμπέρασμα, "Εάν η Google ήταν ISP, θα ήταν ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος και τρίτος μεγαλύτερος παγκόσμιος πάροχος. Μόνο δύο άλλοι πάροχοι (και οι δύο έχουν σημαντικούς όγκους μεταφοράς Google) συμβάλλουν περισσότερο μεταξύ επισκεψιμότητα τομέα." Στο Open Networking Summit, ο Διακεκριμένος Μηχανικός της Google Amin Vahdat παρουσίασε το "SDN @ Google: Why and How." Στην ομιλία μοιράστηκε μερικές λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο η Google χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό λογισμικού ανοιχτού κώδικα Quagga μαζί με το OpenFlow για τη βελτιστοποίηση των διασυνδέσεων του κέντρου δεδομένων της. Μοιράστηκε επίσης λεπτομέρειες σχετικά με τη χρήση του OpenFlow από την Google στα δικά της κέντρα δεδομένων. Η Google καλεί το δίκτυο SDN της "B4". Ο Vahdat παρουσίασε τη λογική της Google για δικτύωση μέσω προγραμματιζόμενων δικτύων. Πρώτον, διαχωρίζοντας το υλικό από το λογισμικό, η εταιρεία μπορεί να επιλέξει υλικό βάσει των απαιτούμενων δυνατοτήτων, ενώ παράλληλα μπορεί να καινοτομήσει και να αναπτύξει σε χρονοδιαγράμματα λογισμικού. Δεύτερον, παρέχει λογικά συγκεντρωτικό έλεγχο που θα είναι πιο ντετερμινιστικός, πιο αποτελεσματικός και πιο ανεκτικός σε σφάλματα. Τρίτον, η αυτοματοποίηση επιτρέπει στην Google να διαχωρίζει την παρακολούθηση, τη διαχείριση και τη λειτουργία από μεμονωμένα πλαίσια. Όλα αυτά τα στοιχεία παρέχουν ευελιξία και περιβάλλον καινοτομίας. Η Google δημιούργησε τους δικούς της μεταγωγείς χρησιμοποιώντας εμπορικό πυρίτιο, δημιούργησε δηλαδή το δικό της υλικό επειδή δεν υπήρχε κανένα υλικό στην αγορά για να εκπληρώσει τις ανάγκες του τη στιγμή που ξεκίνησε το έργο [30].

Microsoft : Ως εταιρία είναι γνωστό πως ασχολείται περισσότερο με λογισμικό παρά με big data, όμως πίσω από τα προγράμματα και τα λειτουργικά που παρέχει υπάρχει μια μεγάλη cloud υποδομή (Office 365, Bing, Xbox, OneDrive κλπ.) που συνεχώς επεκτείνεται. Για να ανταπεξέλθει στις προκλήσεις των μεγεθών που καλείται να διαχειριστεί η Microsoft ανέπτυξε την Azure, πλατφόρμα cloud που σε επίπεδο δικτύου κάνει χρήση Software Defined αρχιτεκτονικής. Παράλληλα συνεργάζεται με την Cisco για την δημιουργία εξειδικευμένων SDN APIs υλοποιήσεων.

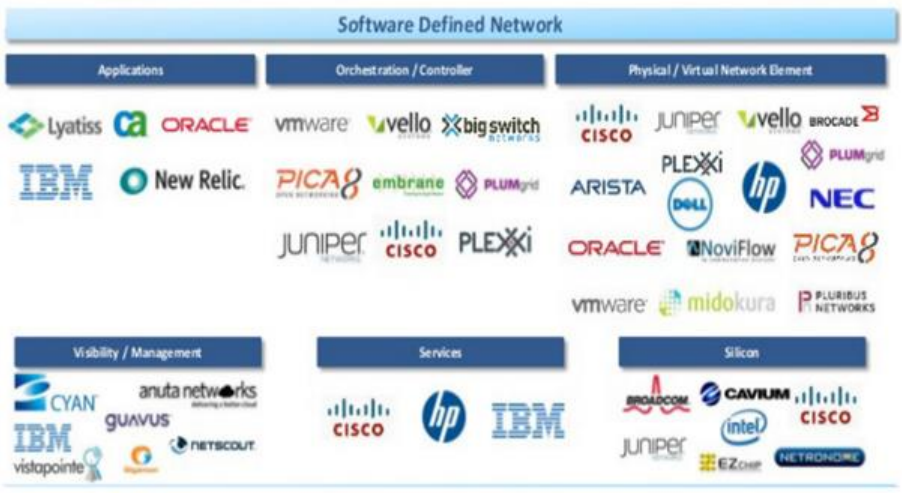
NSA : Η μεγαλύτερη κρατική υπηρεσία ελέγχου του διαδικτύου αξιοποίησε την SDN αρχιτεκτονική για την αποδοτικότερη διαχείριση του δικτύου με βάση τον RYU Controller. Έχοντας να αντιμετωπίσει τις ίδιες προκλήσεις που έχει κάθε μεγάλη εταιρία που διαχειρίζεται και αποθηκεύει μεγάλο όγκο δεδομένων η NSA βρήκε στο OpenFlow SDN την λύση που θα της επέτρεπε να κρατάει πιο εύκολα αρχείο των εκατομμυρίων κλήσεων, email s, μηνυμάτων και λοιπών δεδομένων που υποκλέπτει κάθε μέρα.

Facebook : Όταν μιλάμε για την μεγαλύτερη εταιρία στον χώρο της κοινωνικής δικτύωσης με 1.7 δισεκατομμύρια χρήστες και με τα καθημερινά uploads σε βίντεο να ξεπερνούν ακόμα και αυτά του YouTube είναι πολύ εύκολα αντιληπτό γιατί το FB χρειάζεται μεγάλη ευελιξία στο δίκτυο του. Όμως εκτός της εφαρμογής SDN αρχιτεκτονικής το Facebook πήγε ένα βήμα παρακάτω προχωρώντας σε hardware υλοποιήσεις open hardware, αρχικά το wedge Switch και έπειτα το 6-pack Switch που είχε το προηγούμενο ως βάση. Αυτοί οι μεταγωγείς τρέχουν ένα υβριδικό μοντέλο SDN όπου κάθε μηχάνημά έχει ένα τοπικό επίπεδο ελέγχου σε έναν microserver που βρίσκεται σε επικοινωνία με τον κεντρικό Controller, παρέχοντας ευκολία στην διαχείριση και λειτουργία του δικτύου όπως επίσης ασφάλεια και υψηλές διαθεσιμότητες.

Ως τώρα υπάρχουν επίσης πολλές υλοποιήσεις στο επίπεδο ελέγχου και συγκεκριμένα, των Controller από διάφορους οργανισμούς και εταιρίες, συγκεκριμένα υπάρχουν οι εξής [31]:

- **NOX** ο πρώτος Controller, αναπτύχθηκε από την Nicira Networks, θυγατρική της VMWare και ήταν ανοιχτού κώδικα και βάση για αρκετούς μετέπειτα Controllers

- **ONIX** συνέχεια του NOX με την συνεργασία Nicira, NTT και Google, αρχικά είχε ανακοινωθεί πως ο κώδικα θα άνοιγε, αλλά αποφασίστηκε από τις εταιρίες να μείνει κλειστού κώδικα, φημολογείται πως είναι η βάση του Google WAN Controller
- **Beacon** αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Stanford στις αρχές του 2010 - NSX, ο Controller που αναπτύχθηκε από την Nicira/Vmware και συνέχεια του ONIX 21
- **Google WAN Controller** αν και η Google είχε εξαρχής εμπλοκή με τον SDN δεν έχει αποκαλύψει λεπτομέρειες για τον Controller της, εξάλλου είναι ένα εσωτερικό Project της για να εξυπηρετήσει τις δικές τις ανάγκες
- **OpenDaylight** ο κυρίαρχος αυτήν την στιγμή Open Source Controller και βάση για μια σειρά Controllers ακόμα
- **HP VAN SDN Controller** εμπορικός Controller βασισμένος στον OpenDaylight με πολλές δυνατότητες και το πρώτο λειτουργικό App Store
- **Contrail** Controller-SDN πλατφόρμα της Juniper
- **Cisco Open SDN Controller** επίσης εμπορικός, βασισμένος στον OpenDaylight, προσαρμοσμένος για πιο αποτελεσματική λειτουργία μέσα στο οικοσύστημα συσκευών της Cisco
- **Floodlight** συνέχεια του Beacon
- **POX Controller** Cognos Controller
- **RYI** είναι γνωστός κυρίως λόγω της χρήσης του από την NSA
- **Ericsson SDN Controller**

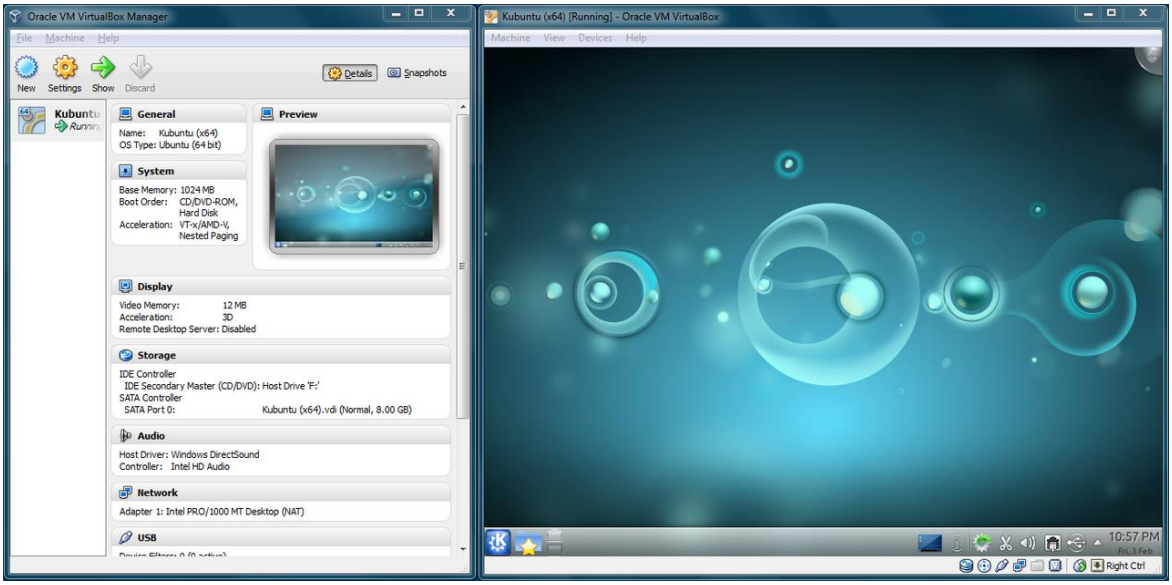


Εικόνα 22 : Υλοποιήσεις προγραμματιζόμενων δικτύων

5ο Κεφάλαιο : Υλοποίηση

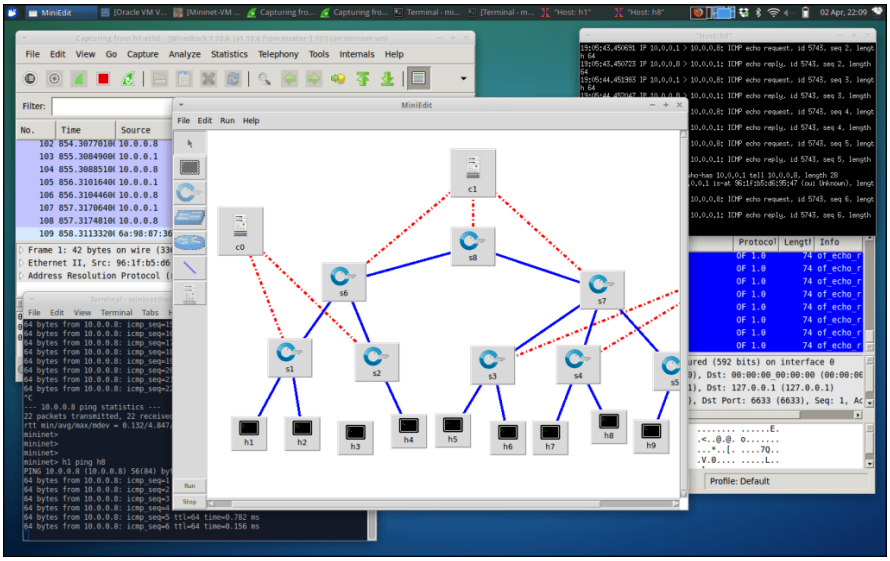
5.1 Παρουσίαση προαπαιτούμενων εφαρμογών υλοποίησης

Το Oracle VM VirtualBox είναι ένα λογισμικό εικονικοποίησης πολλαπλών πλατφόρμων που επιτρέπει στους χρήστες να επεκτείνουν το υπάρχον υπολογιστή να εκτελεί πολλαπλά λειτουργικά συστήματα ταυτόχρονα. Σχεδιασμένο για επαγγελματίες πληροφορικής και προγραμματιστές, το Oracle VM VirtualBox εκτελείται σε Microsoft Windows, Mac OS X, Linux και Oracle Solaris συστημάτων και είναι ιδανικό για δοκιμές, ανάπτυξη, επίδειξη και ανάπτυξη λύσεων σε πολλαπλά πλατφόρμες σε ένα μηχάνημα. Το Oracle VM VirtualBox έχει σχεδιαστεί για να εκμεταλλευτεί τις καινοτομίες που εισήχθησαν στην x86 πλατφόρμα υλικού και είναι ελαφρύ και εύκολο στην εγκατάσταση και χρήση που το κάνουν μια εξαιρετικά γρήγορη και ισχυρή μηχανή εικονικοποίησης. Με καλή φήμη για ταχύτητα και ευελιξία, το Oracle VM VirtualBox περιέχει καινοτόμα χαρακτηριστικά για να προσφέρει απτά επιχειρηματικά οφέλη: εξαιρετική απόδοση ένα ισχυρό σύστημα εικονικοποίησης. και ένα ευρύ φάσμα υποστηριζόμενων επισκεπτών πλατφόρμων λειτουργικού συστήματος. Με χιλιάδες λήψεις κάθε μέρα, το Oracle VM VirtualBox είναι το πιο δημοφιλές δωρεάν στον κόσμο και λογισμικό ανοιχτού κώδικα, πολλαπλής πλατφόρμας, βασισμένο στη ζωντανή συμμετοχή της κοινότητας σε συνδυασμό με την παγκόσμια ανάπτυξη και υποστήριξη που παρέχεται από την Oracle [32].



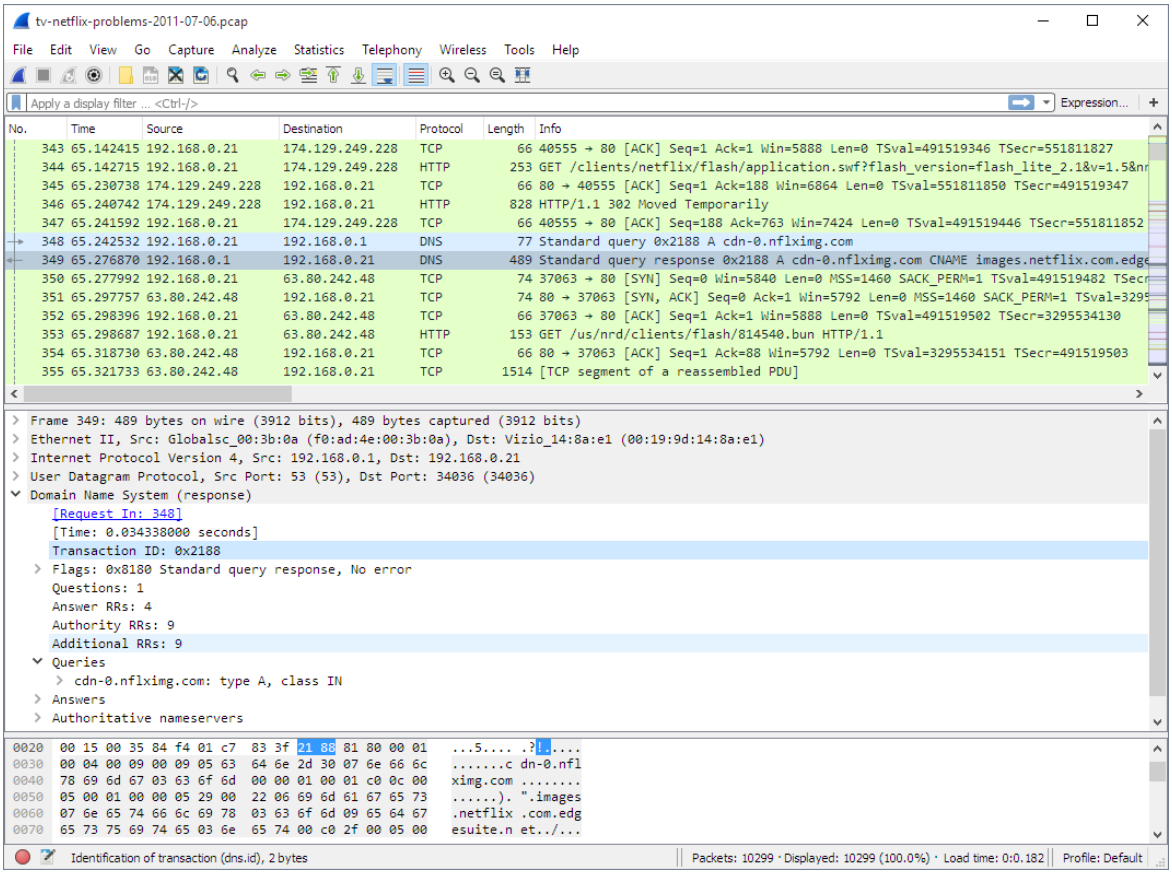
Εικόνα 23 : Περιβάλλον εργασίας VMWare VirtualBox

Το Mininet είναι ένας εξομοιωτής δικτύου που δημιουργεί ένα δίκτυο εικονικών κεντρικών υπολογιστών, διακοπτών, ελεγκτών και συνδέσμων. Οι κεντρικοί υπολογιστές Mininet εκτελούν τυπικό λογισμικό δικτύου Linux και οι μεταγωγείς του υποστηρίζουν το OpenFlow για εξαιρετικά ευέλικτη προσαρμοσμένη δρομολόγηση και δίκτυο καθοριζόμενο από λογισμικό. Το Mininet υποστηρίζει την έρευνα, την ανάπτυξη, τη μάθηση, το πρωτότυπο, τον έλεγχο, τον εντοπισμό σφαλμάτων και οποιεσδήποτε άλλες εργασίες που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από την ύπαρξη πλήρους πειραματικού δικτύου σε φορητό υπολογιστή ή άλλο υπολογιστή. Παρέχει επίσης ένα απλό και επεκτάσιμο API Python για δημιουργία και πειραματισμό δικτύου Το Mininet παρέχει έναν εύκολο τρόπο για τη σωστή συμπεριφορά του συστήματος (και, στο βαθμό που υποστηρίζεται από το υλικό, την απόδοση) και για πειραματισμό με τοπολογίες. Τα δίκτυα Mininet εκτελούν πραγματικό κώδικα, συμπεριλαμβανομένων τυπικών εφαρμογών δικτύου Unix / Linux, καθώς και του πραγματικού πυρήνα Linux και στοίβα δικτύου (συμπεριλαμβανομένων τυχόν επεκτάσεων πυρήνα που μπορεί να έχετε διαθέσιμες, αρκεί να είναι συμβατές με χώρους ονομάτων δικτύου.) Εξαιτίας αυτού, ο κώδικας που αναπτύσσετε και δοκιμάζετε στο Mininet, για έναν ελεγκτή OpenFlow, έναν τροποποιημένο μεταγωγέα ή έναν κεντρικό υπολογιστή, μπορεί να μετακινηθεί σε ένα πραγματικό σύστημα με ελάχιστες αλλαγές, για πραγματικές δοκιμές, αξιολόγηση απόδοσης και ανάπτυξη. Σημαντικό αυτό σημαίνει ότι ένας σχεδιασμός που λειτουργεί στο Mininet μπορεί συνήθως να μετακινηθεί απευθείας σε μεταγωγείς υλικού για προώθηση πακέτου γραμμής [33].



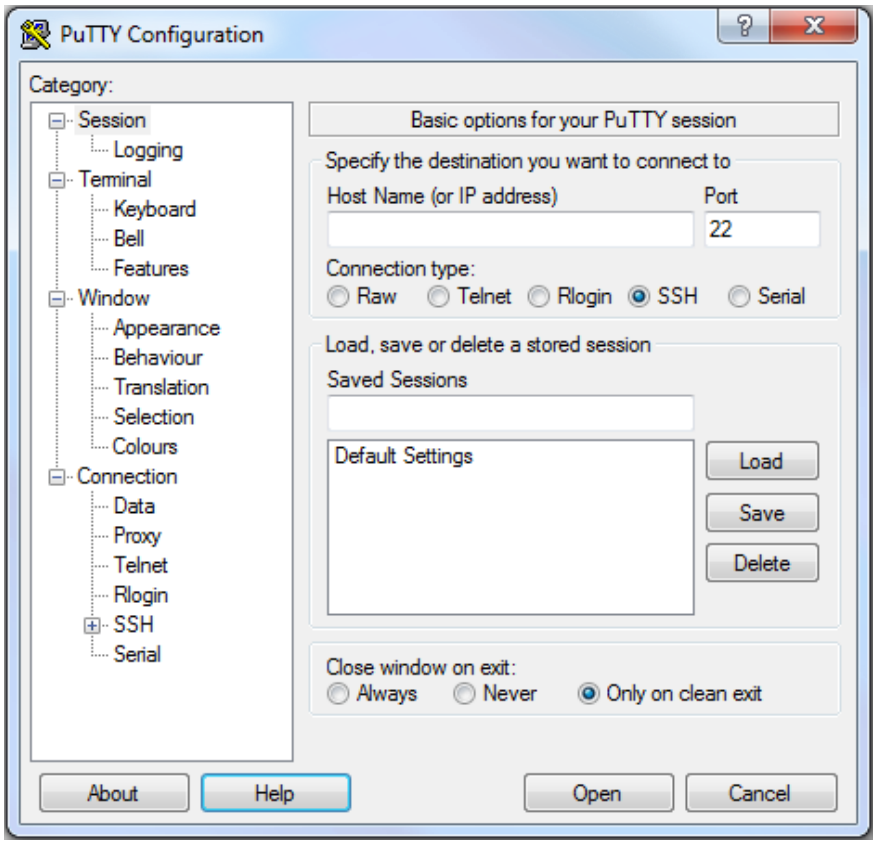
Εικόνα 24 : Περιβάλλον εργασίας Mininet

Το Wireshark είναι ένας αναλυτής πακέτων δικτύου. Ένας αναλυτής πακέτων δικτύου παρουσιάζει τα καταγεγραμμένα πακέτα δεδομένων με όσο το δυνατόν περισσότερες λεπτομέρειες. Θα μπορούσατε να σκεφτείτε έναν αναλυτή πακέτων δικτύου ως συσκευή μέτρησης για να εξετάσετε τι συμβαίνει μέσα σε ένα καλώδιο δικτύου, όπως ένας ηλεκτρολόγος χρησιμοποιεί ένα βολτόμετρο για να εξετάσει τι συμβαίνει μέσα σε ένα ηλεκτρικό καλώδιο (αλλά σε υψηλότερο επίπεδο, φυσικά). Στο παρελθόν, τέτοια εργαλεία ήταν είτε πολύ ακριβά, ιδιόκτητα ή και τα δύο. Ωστόσο, με την έλευση του Wireshark, αυτό έχει αλλάξει. Το Wireshark διατίθεται δωρεάν, είναι ανοιχτού κώδικα και είναι ένας από τους καλύτερους αναλυτές πακέτων που διατίθενται σήμερα [34].



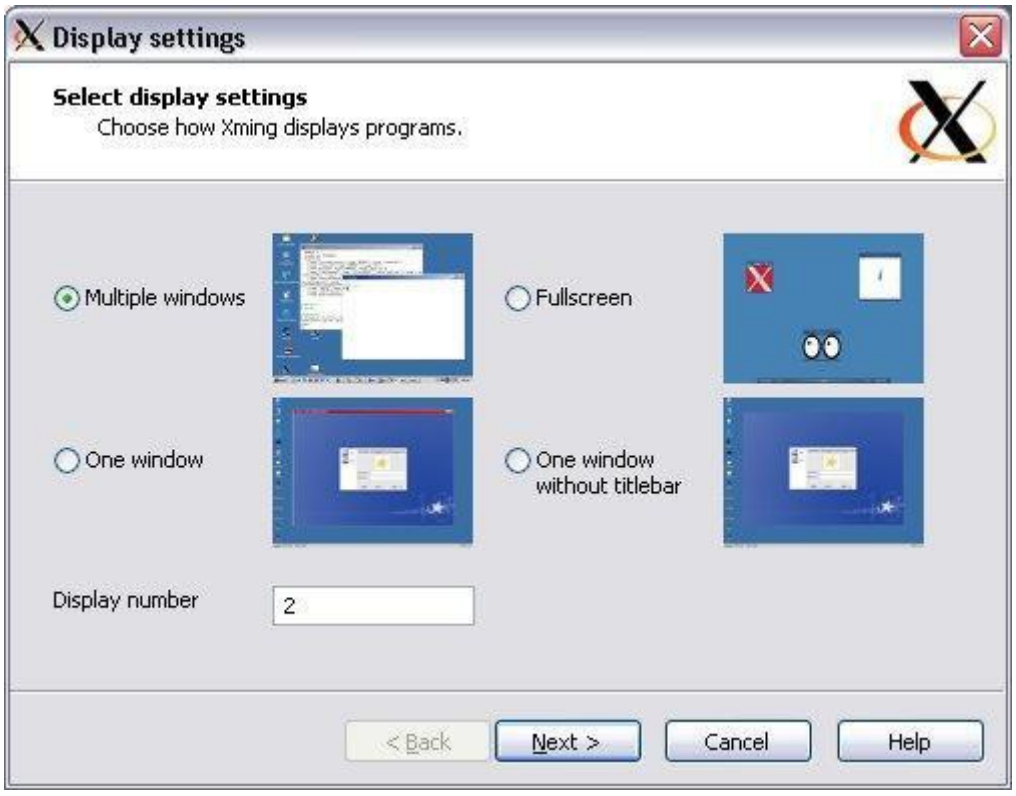
Εικόνα 25 : Περιβάλλον εργασίας Wireshark

Το PuTTY είναι ένας ανοικτού κώδικα εξομοιωτής απομακρυσμένου τερματικού, σειριακή κονσόλα και εφαρμογή μεταφοράς αρχείων δικτύου. Υποστηρίζει πολλά πρωτόκολλα δικτύου, όπως SCP, SSH, Telnet, rlogin και σύνδεση raw socket. Μπορεί επίσης να συνδεθεί σε σειριακή θύρα. Το PuTTY γράφτηκε αρχικά για Microsoft Windows, αλλά έχει μεταφερθεί σε και σε διάφορα άλλα λειτουργικά συστήματα όπως Linux και MacOS. Το PuTTY υποστηρίζει πολλές παραλλαγές σε ασφαλές απομακρυσμένο τερματικό [35].



Εικόνα 26 : Περιβάλλον εργασίας PuTTY

Το Xming είναι ένας ελεύθερος διακομιστής οθόνης X11 για λειτουργικά συστήματα Microsoft Windows, συμπεριλαμβανομένων των Windows XP και νεότερων εκδόσεων. Το Xming παρέχει στο διακομιστή οθόνης X Window System, ένα σύνολο παραδοσιακών εφαρμογών και εργαλείων δείγματος X, καθώς και ένα σύνολο γραμματοσειρών. Διαθέτει υποστήριξη πολλών γλωσσών και διαθέτει δυνατότητες επεκτάσεων γραφικών Mesa 3D, OpenGL και GLX 3D. Το Xming εκτελείται εγγενώς στα Windows και δεν χρειάζεται λογισμικό εξομοίωσης τρίτων. Το Xming μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εφαρμογές του Secure Shell (SSH) για την ασφαλή προώθηση των συνεδριών X11 από άλλους υπολογιστές. Υποστηρίζει το PuTTY και το ssh.exe και συνοδεύεται από μια έκδοση του plink.exe του PuTTY [36].



Εικόνα 27 : Περιβάλλον εργασίας Xming

5.2 Εγκατάσταση προαπαιτούμενων εφαρμογών υλοποίησης

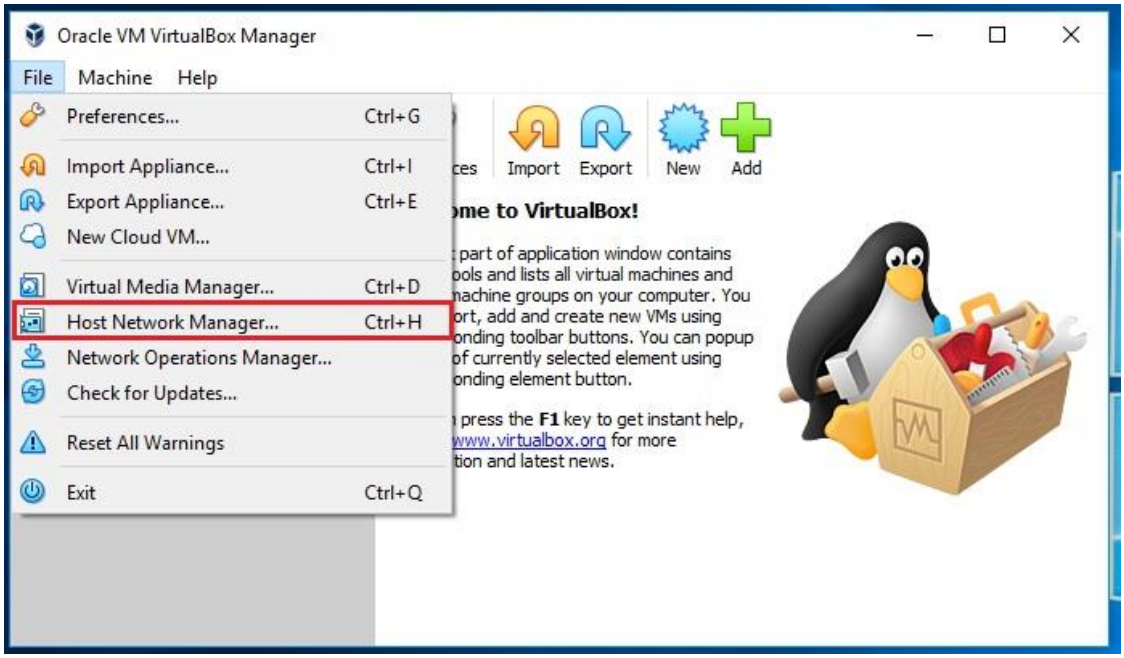
Σε αυτή την εργασία θα προσπαθήσουμε να προσομοιώσουμε ένα SDN δίκτυο και συγκεκριμένα βασιζόμενο στο OpenFlow πρωτόκολλο, κάνοντας χρήση του εξομοιωτή Mininet και παρουσιάζοντας διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης του ελεγκτή του δικτύου POX. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που κάνουν απαραίτητη την χρήση ενός εξομοιωτή όπως το Mininet και ενός προγράμματος εικονικοποίησης όπως το VirtualBox. Πρώτον, λόγω του περιορισμού σε διαθέσιμες δικτυακές συσκευές για την εφαρμογή του OpenFlow πρωτοκόλλου, και διάφορων περιφερειακών συσκευών για την εφαρμογή ενός τέτοιου δικτύου σε ένα μεγάλο αριθμό συσκευών είναι ανέφικτη προς το παρόν. Το Mininet είναι ένας εξομοιωτής δικτύων, ο οποίος δημιουργεί δίκτυα εικονικών χρηστών, μεταγωγέων, ελεγκτών και συνδέσεων. Το Mininet παρέχει ένα σύνολο έτοιμων τοπολογιών, αλλά και την δυνατότητα παραμετροποίησης τους. Συγκρίνοντας το με άλλους εξομοιωτές δικτύων, πλατφόρμες δοκιμών και προσομοιωτές, το Mininet υπερτερεί στον χρόνο εκκίνησης, στην κλιμάκωση, στο υψηλότερο εύρος ζώνης, αλλά και στο ότι είναι ευκολότερο να το εγκαταστήσει κάποιος. Ο POX ελεγκτής είναι προεγκατεστημένος στο Mininet και παρέχει ένα τρόπο επικοινωνίας με τους SDN μεταγωγείς, κάνοντας χρήση του OpenFlow πρωτοκόλλου. Είναι μία πλατφόρμα λογισμικού που έχει αναπτυχθεί σε Python και αποτελεί ένα δημοφιλές εργαλείο για διδασκαλία και έρευνα, σε δίκτυα SDN. Αποτελείται από επιμέρους συστατικά, τα οποία αποτελούν προγράμματα σε Python. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας βασικός ελεγκτής ή σαν βάση για την δημιουργία ενός πολυπλοκότερου SDN ελεγκτή. Ο POX χρησιμοποιεί την έκδοση 2.7 της Python και μπορεί να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε λειτουργικό σύστημα Linux, Mac, Windows.

Ειδικότερα για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- Ένας φορητός υπολογιστής με επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i3-5010U CPU @ 2.10GHZ, 4GB RAM σε Windows 10 64bit.
- Το VirtualBox VM version 6.1.16 build 140961 της Oracle.
- Ο προσομοιωτής Mininet έκδοσης 2.2.2 σε λειτουργικό Linux Ubuntu 14.04.4 32bit με 1GB RAM και ο POX ελεγκτής εγκαταστάθηκαν στον υπολογιστή μέσω του VirtualBox.
- Ένας SSH client και πιο συγκεκριμένα το Putty.
- Το λογισμικό Xming για διαχείριση πολλαπλών παραθύρων.

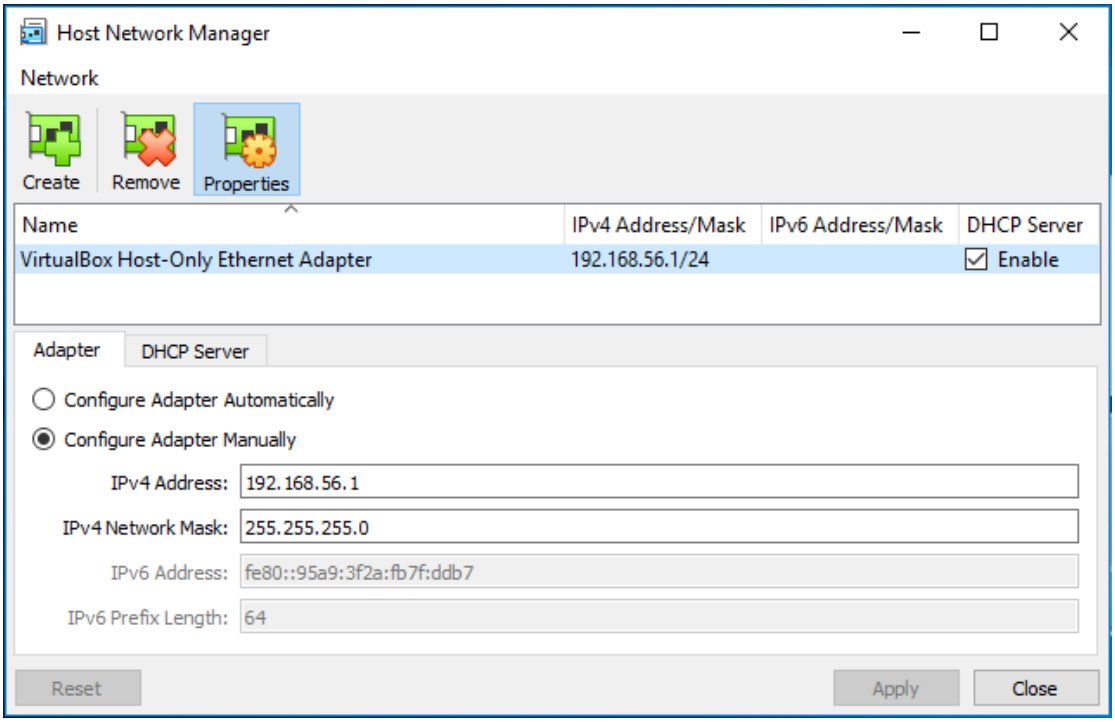
Εφόσον έχουμε ολοκληρώσει την εγκατάσταση του VirtualBox, στην συνέχεια θα πρέπει να εισάγουμε τον εξομοιωτή Mininet. Αυτό γίνεται βάση της παρακάτω διαδικασίας:

- Ανοίγουμε το VirtualBox, και πηγαίνουμε στην διαχείριση του τοπικού δικτύου.

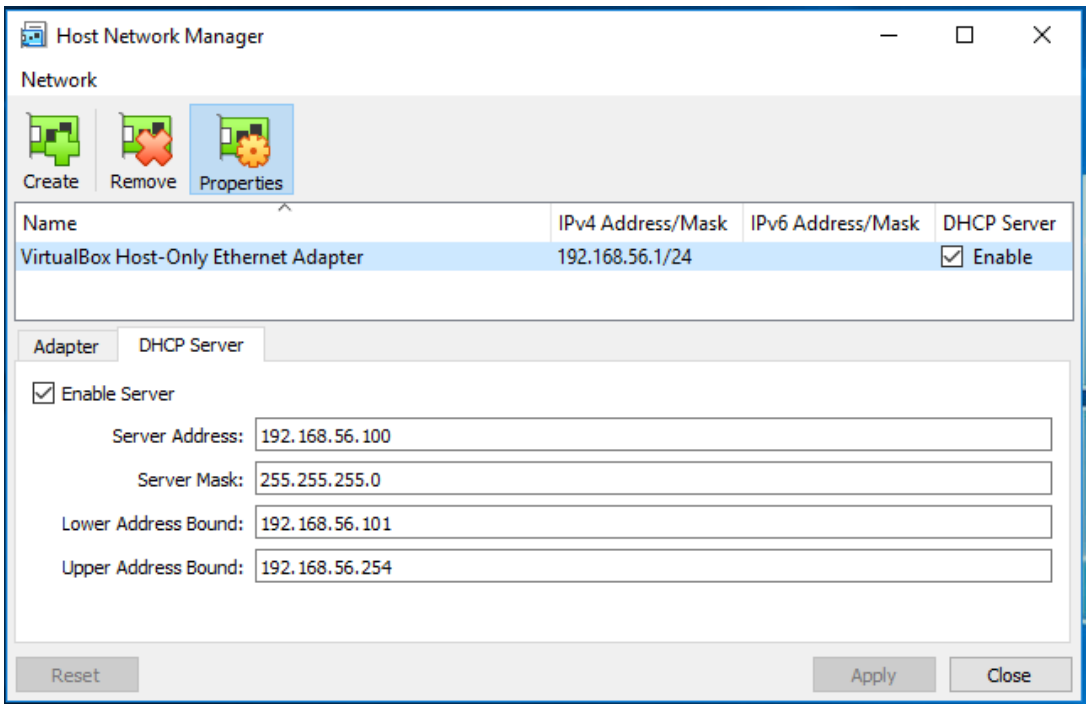


Εικόνα 28 : Ρυθμίσεις τοπικού δικτύου VirtualBox

- Επιβεβαιώνουμε πως οι ρυθμίσεις ορίζονται ως οι παρακάτω.

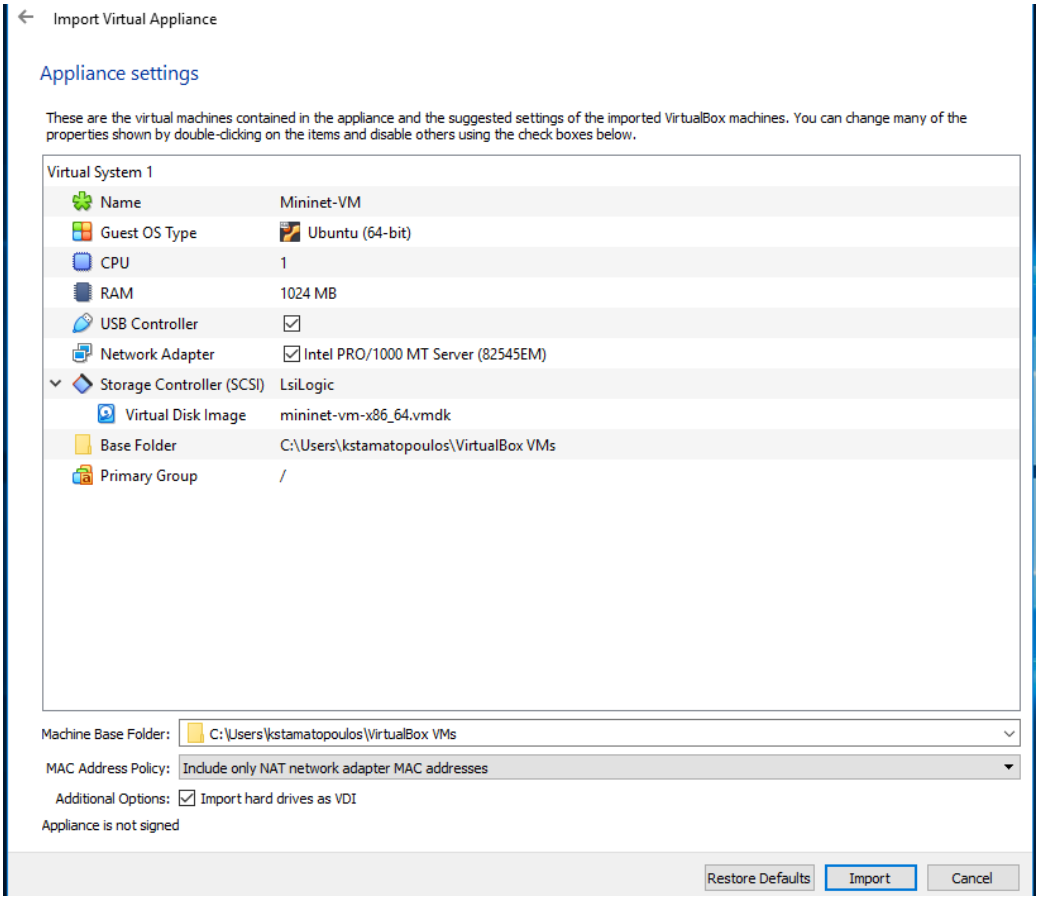


Εικόνα 29 : Ρυθμίσεις τοπικού δικτύου VirtualBox



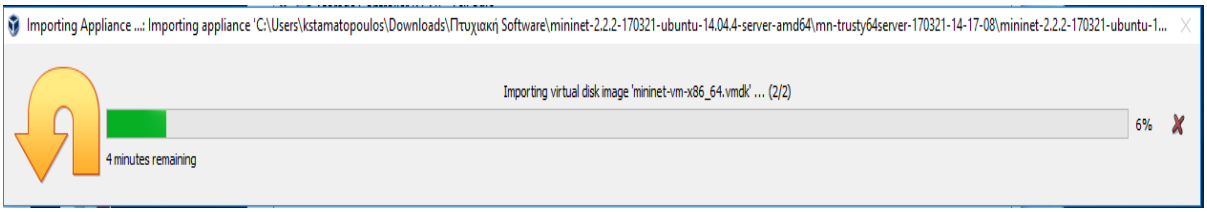
Εικόνα 30 : Ρυθμίσεις τοπικού δικτύου VirtualBox

- Στην συνέχεια, εισάγουμε την εφαρμογή Mininet στο VirtualBox μας.



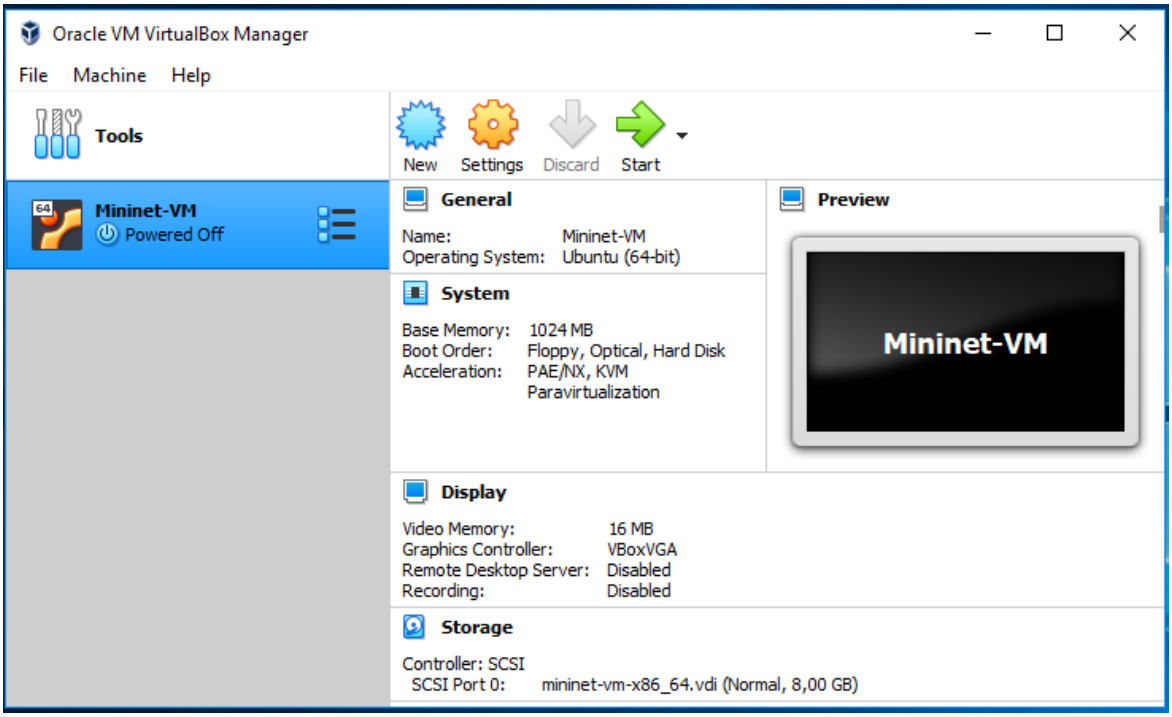
Εικόνα 31 : Εισαγωγή εφαρμογής Mininet στο VirtualBox

- Αναμένουμε μέχρις ότου ολοκληρωθεί η εισαγωγή του Mininet στο VirtualBox.



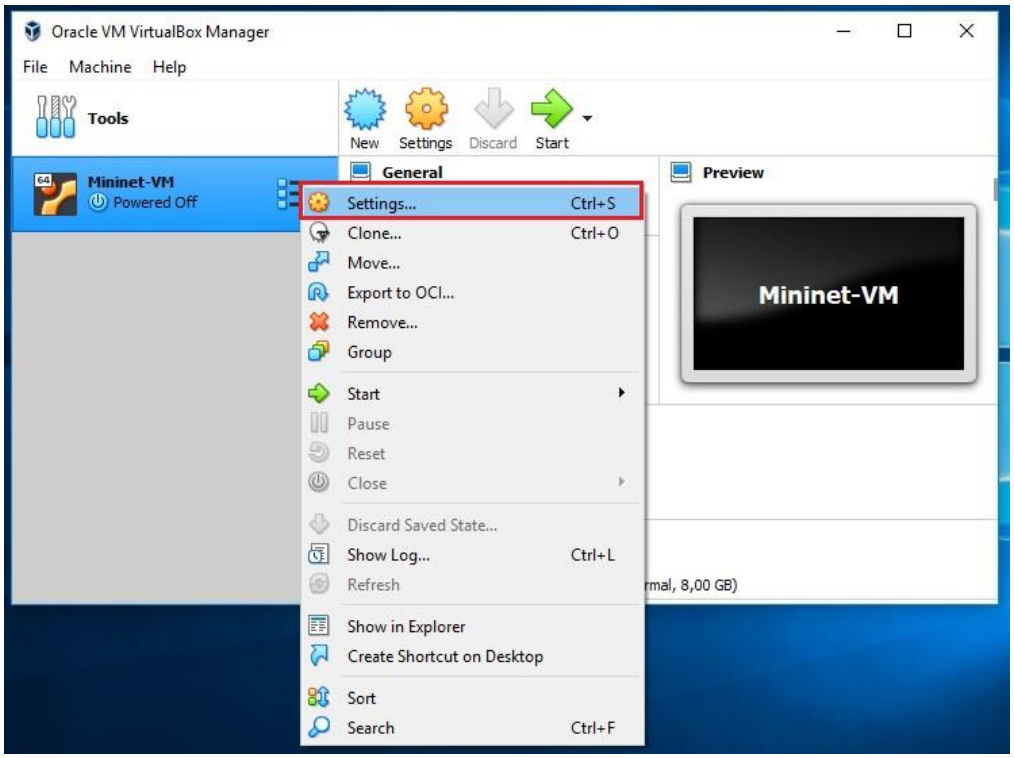
Εικόνα 32 : Διαδικασία εισαγωγής εφαρμογής Mininet στο VirtualBox

- Όταν ολοκληρωθεί η εισαγωγή του Mininet στο VirtualBox, θα έχουμε την παρακάτω εικόνα.



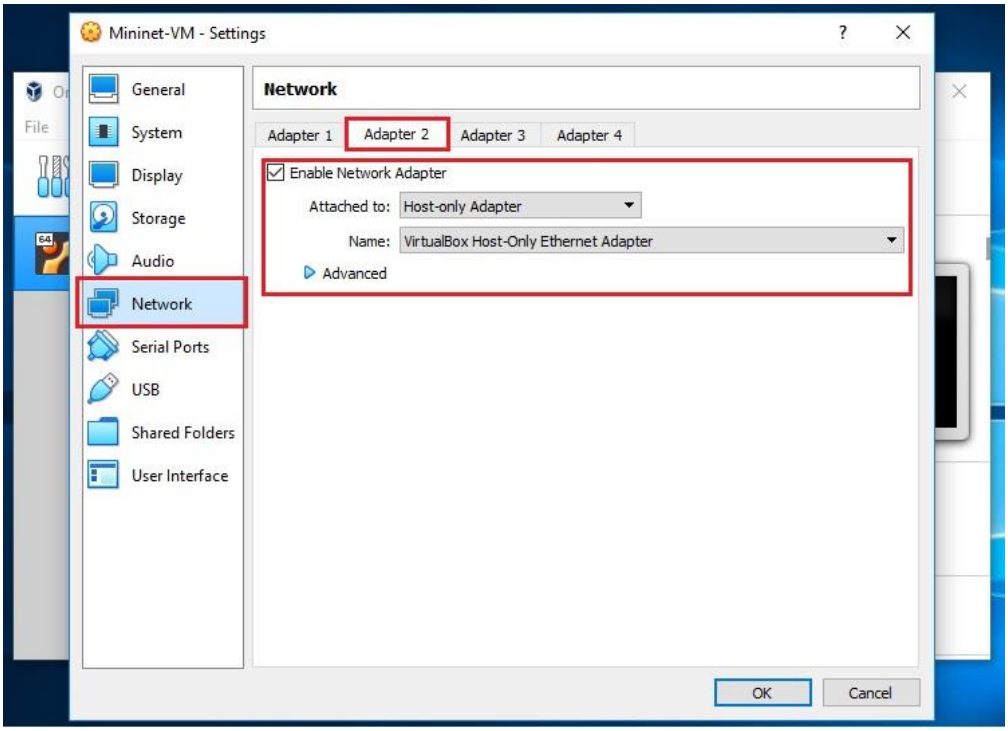
Εικόνα 33 : Εφαρμογή Mininet στο VirtualBox

- Έπειτα πηγαίνουμε στις ρυθμίσεις δικτύου του συστήματος Mininet που έχουμε εισάγει στο VirtualBox, πατώντας δεξί κλικ και μετά Ρυθμίσεις.



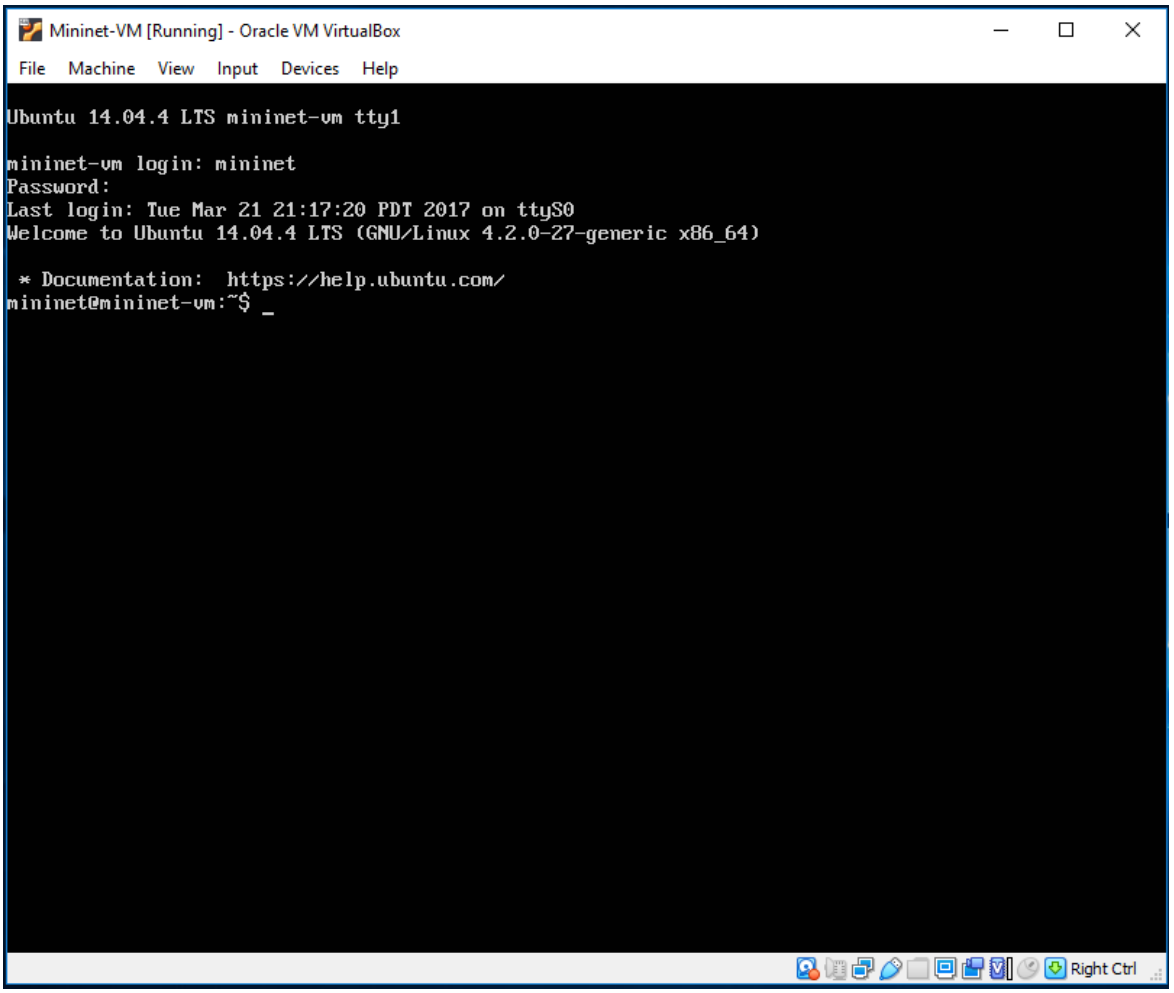
Εικόνα 34 : Ρυθμίσεις εφαρμογής Mininet

- Επιβεβαιώνουμε πως οι ρυθμίσεις ορίζονται ως οι παρακάτω.



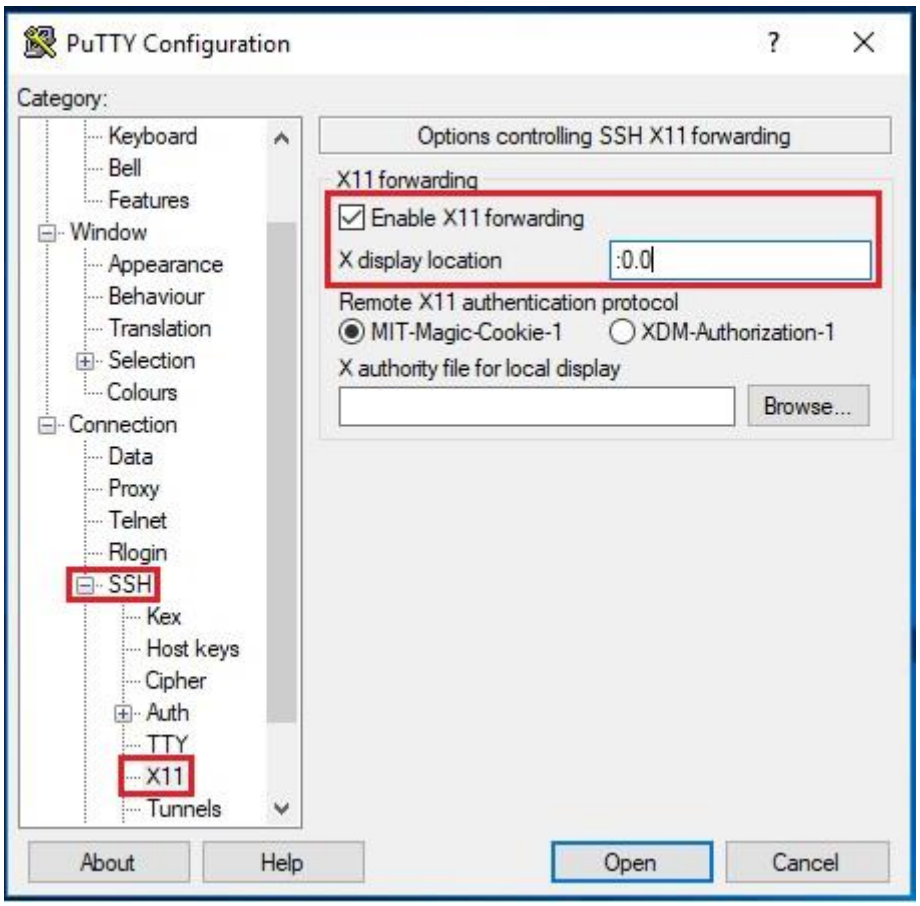
Εικόνα 35 : Ρυθμίσεις δικτύου εφαρμογής Mininet

- Εφόσον όλες οι προαναφερόμενες ρυθμίσεις και οι έλεγχοι έχουν ολοκληρωθεί, είμαστε πλέον σε θέση να εκκινήσουμε την λειτουργία του συστήματος Mininet που έχουμε εισάγει στο VirtualBox, πατώντας Εκκίνηση και μετά την ολοκλήρωση του ανοίγματος της εφαρμογής θα μας παρουσιαστεί η παρακάτω εικόνα. Εισάγουμε ως όνομα χρήστη : mininet και ως κωδικό πρόσβασης : mininet και η εφαρμογή μας είναι πλέον έτοιμη για χρήση.



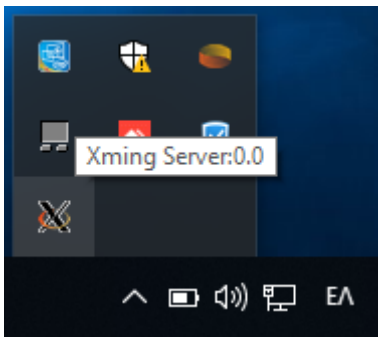
Εικόνα 36 : Αρχική οθόνη εφαρμογής Mininet

- Ακόμα, προκειμένου να μπορούμε να χειριστούμε απομακρυσμένα την προσομοίωση μας στο VirtualBox από ένα τερματικό SSH και χωρίς να αντιμετωπίζουμε προβλήματα συμβατότητας θα χρειαστεί να ορίσουμε στο τερματικό μας, το PuTTY στην δική μας περίπτωση, τις παρακάτω παραμέτρους.



Εικόνα 37 : Ρυθμίσεις παραμέτρων SSH εφαρμογής PuTTY

- Τέλος, επιβεβαιώνουμε πως το πρόγραμμα Xming τρέχει στην γραμμή εργασιών.



Εικόνα 38 : Λειτουργία εφαρμογής Xming

Τέλος, ενδεικτικά παραθέτονται παρακάτω μερικές από τις βασικές εντολές που υφίστανται στον προσομοιωτή Mininet και θα χρειαστούν στις υλοποιήσεις μας αλλά και στην καλύτερη και αποτελεσματικότερη διαχείριση του συστήματος.

- **dpctl :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει την προβολή των ροών στον πίνακα διακοπτών.

- **dump :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει πληροφορίες σχετικά με τους κόμβους, τους μεταγωγείς και τους ελεγκτές στο προσομοιωμένο δίκτυο.

- e**of :** Χρησιμοποιείται για έξοδο από την τρέχουσα τοπολογία.

- **exit :** Χρησιμοποιείται για έξοδο από τοπολογία. (Είναι παρόμοιο με το eof)

- **help :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει μια λίστα με τις διαθέσιμες εντολές.

- **ifconfig :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει την διεύθυνση IP ενός κόμβου.

- **intfs :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει τις διεπαφές που είναι συνδεδεμένες.

- **iperf :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει το εύρος ζώνης μεταξύ H/Y. (Χρησιμοποιείται γενικά για έλεγχο σύνδεσης TCP)

- **iperfudp :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει το εύρος ζώνης μεταξύ H/Y, αλλά χρησιμοποιείται για συνδέσεις UDP αντί για συνδέσεις TCP. (Είναι παρόμοιο με το iperf)

- **link :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει ποιος κεντρικός υπολογιστής και μεταγωγέας συνδέονται μεταξύ τους.

- **net :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει πώς τα στοιχεία δικτύου συνδέονται μεταξύ τους στο προσομοιωμένο δίκτυο. (Είναι παρόμοιο με το link)

- **nodes :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει τη λίστα των διαθέσιμων κόμβων.

- **ping :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει τη συνδεσιμότητα μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων.

- **pingall :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει τη συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των Η/Υ και μας λέει και ποιοι Η/Υ είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους.

- **pingallfull :** Χρησιμοποιείται για να εμφανίσει περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο σύνδεσης των Η/Υ. Επίσης, χρησιμοποιείται για να εμφανίσει τον ελάχιστο, τον μέσο και τον μέγιστο χρόνο που μεσολαβεί για την μετάδοση μετ' επιστροφής μεταξύ δύο Η/Υ σε ms.

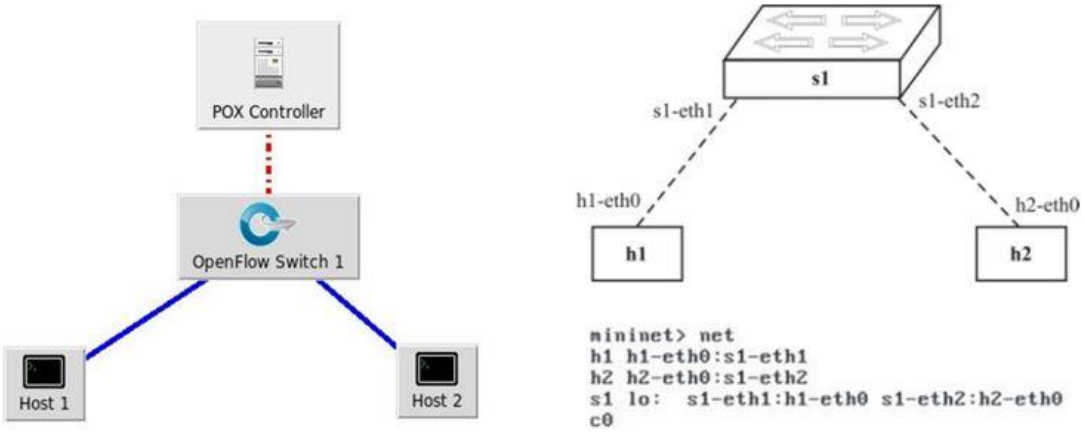
- **sudo wireshark & :** Χρησιμοποιείται για την ανάλυση πληροφορίας ελέγχου της κυκλοφορίας της OpenFlow ροής (Προϋποθέτει την εκ των προτέρων ενεργοποίηση του Xming Server για την λειτουργία του).

- **xterm :** Χρησιμοποιείται για να ανοίξει ένα νέο τερματικό παράθυρο συνδεδεμένο σε έναν κόμβο (Προϋποθέτει την εκ των προτέρων ενεργοποίηση του Xming Server για την λειτουργία του).

5.3 Υλοποίηση προσομοιώσεων

Βασική τοπολογία – Minimal topology : Η βασική τοπολογία περιλαμβάνει ένα ελεγκτή OpenFlow, ένα μεταγωγέα OpenFlow, δύο ηλεκτρονικούς υπολογιστές και συνδέσεις μεταξύ ελεγκτή - μεταγωγέα και ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η δημιουργία της βασικής τοπολογίας δημιουργείται μέσω της γραμμής εντολών με την εντολή :

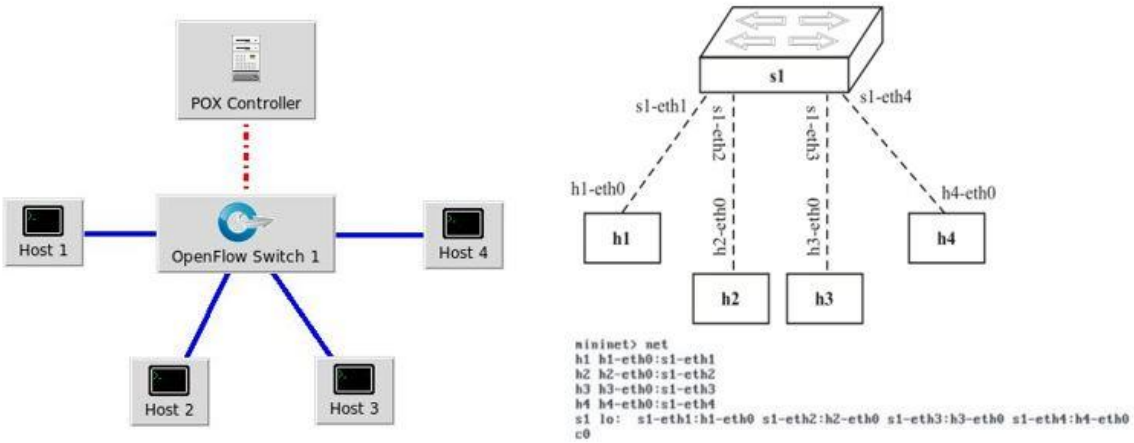
sudo mn --topo=minimal



Εικόνα 39 : Βασική Τοπολογία

<u>Απλή τοπολογία – Single topology :</u> Η απλή τοπολογία περιλαμβάνει ένα ελεγκτή OpenFlow, ένα μεταγωγέα OpenFlow, τέσσερις ηλεκτρονικούς υπολογιστές και συνδέσεις μεταξύ ελεγκτή - μεταγωγέα και ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η δημιουργία της απλής τοπολογίας δημιουργείται μέσω της γραμμής εντολών με την εντολή :

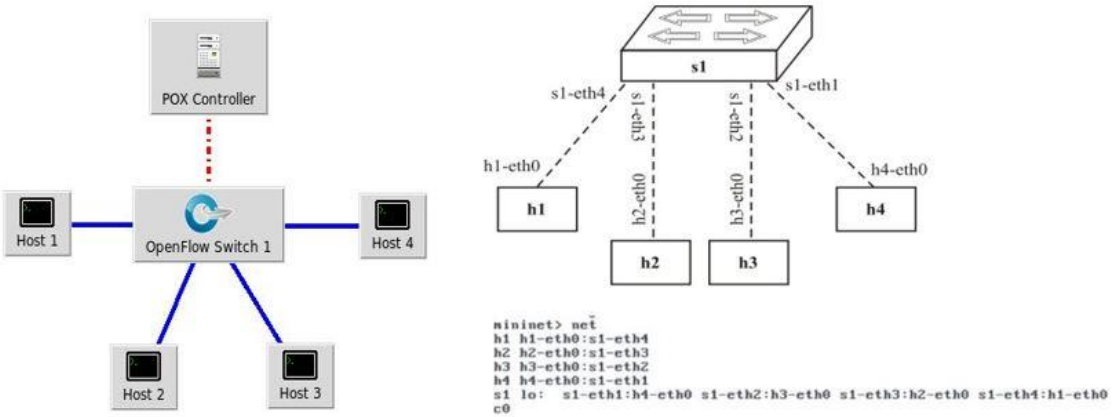
sudo mn --topo=single, 4



Εικόνα 40 : Απλή Τοπολογία

<u>Ανεστραμμένη τοπολογία – Reversed topology :</u> Η ανεστραμμένη τοπολογία περιλαμβάνει ένα ελεγκτή OpenFlow, ένα μεταγωγέα OpenFlow, τέσσερις ηλεκτρονικούς υπολογιστές και συνδέσεις μεταξύ ελεγκτή - μεταγωγέα και ηλεκτρονικών υπολογιστών. Είναι ίδια δομημένη με την απλή τοπολογία, ωστόσο αναστρέφονται οι συνδέσεις στις διεπαφές των συσκευών. Η δημιουργία της ανεστραμμένης τοπολογίας δημιουργείται μέσω της γραμμής εντολών με την εντολή :

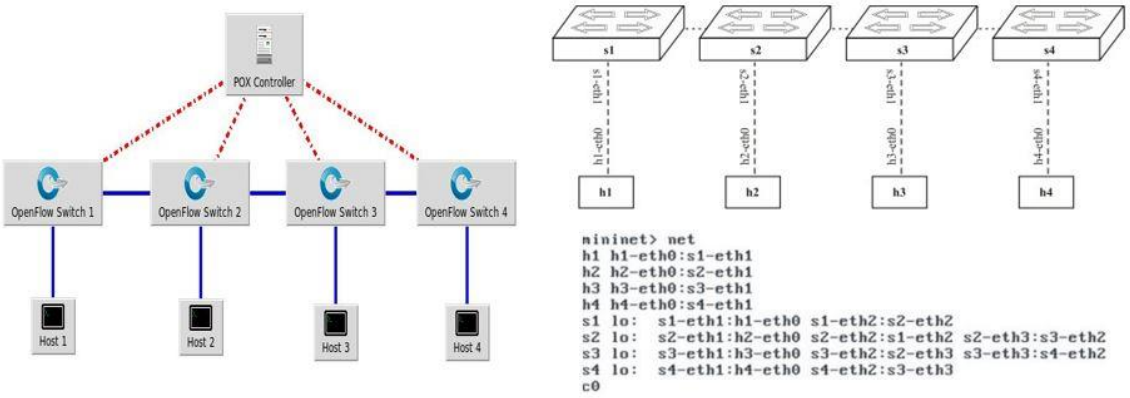
sudo mn --topo=reversed, 4



Εικόνα 41 : Ανεστραμμένη Τοπολογία

<u>Γραμμική τοπολογία – Linear topology :</u> Η γραμμική τοπολογία περιλαμβάνει ένα ελεγκτή OpenFlow, τέσσερις μεταγωγείς OpenFlow, τέσσερις ηλεκτρονικούς υπολογιστές και συνδέσεις μεταξύ ελεγκτή - διακοπτών, μεταξύ των διακοπτών και κάθε μεταγωγέα με τον αντίστοιχο ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η δημιουργία της γραμμικής τοπολογίας δημιουργείται μέσω της γραμμής εντολών με την εντολή :

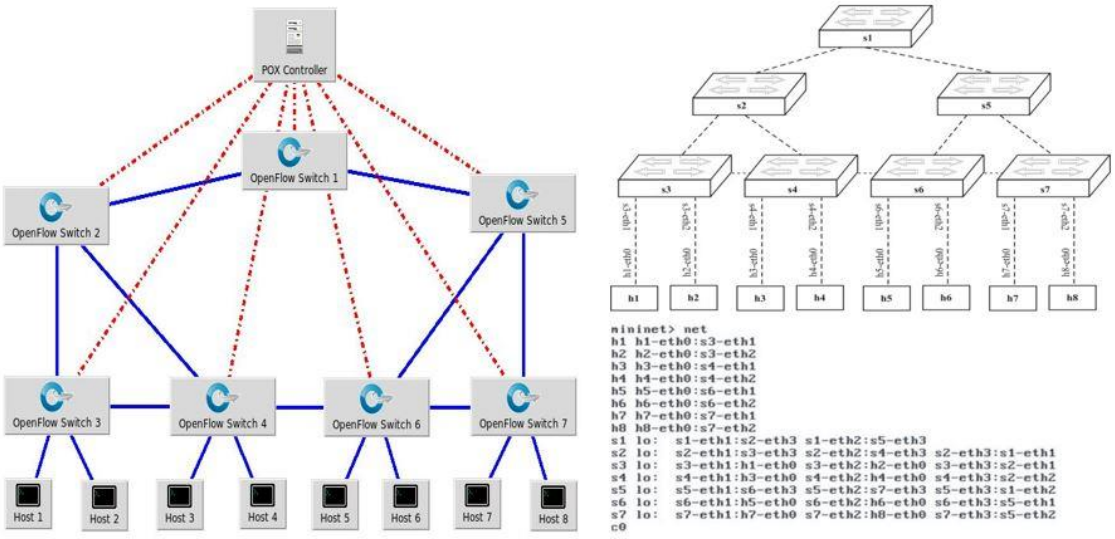
sudo mn --topo=linear, 4



Εικόνα 42 : Γραμμική Τοπολογία

<u>Δενδροειδής τοπολογία – Tree topology :</u> Η δενδροειδής τοπολογία περιλαμβάνει ένα ελεγκτή OpenFlow, επτά μεταγωγείς OpenFlow, οκτώ ηλεκτρονικούς υπολογιστές και συνδέσεις μεταξύ ελεγκτή – διακοπτών, μεταξύ των διακοπτών και κάθε μεταγωγέα με δύο αντίστοιχους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η δημιουργία της δενδροειδής τοπολογίας δημιουργείται μέσω της γραμμής εντολών με την εντολή :

sudo mn --topo=tree, 3



Εικόνα 43 : Δενδροειδής Τοπολογία

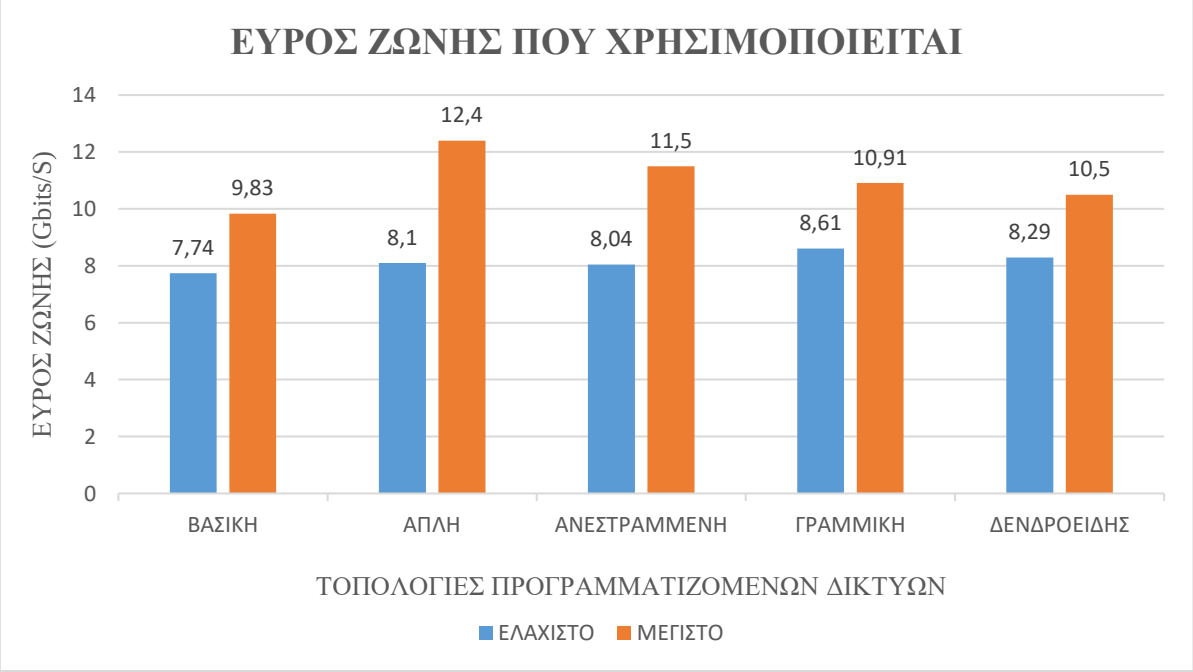
5.4 Αποδοτικότητα προσομοιώσεων

Σε αυτήν την ενότητα, πρόκειται να γίνει μια συγκριτική ανάλυση απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα που λάβαμε μετά την εκτέλεση των προσομοιώσεων της βασικής, της απλής, της ανεστραμμένης, της γραμμικής και της δενδροειδούς τοπολογίας προγραμματιζόμενων δικτύων. Η ανάλυση απόδοσης γίνεται με την σύγκριση όλων των δικτυακών τοπολογιών με βάση τη χρήση εύρους ζώνης, τον ρυθμό μετάδοσης πακέτων, τον απαιτούμενο χρόνο για μετάδοση πακέτου από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού και τη μέγιστη ληφθείσα ρυθμαπόδοση.

Αρχικά, γίνεται μια ανάλυση απόδοσης για τις πέντε τοπολογίες όπου η χρήση εύρους ζώνης παρουσιάζεται στην εικόνα 44 και το διάγραμμα 1.

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	ΒΑΣΙΚΗ	ΑΠΛΗ	ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	ΔΕΝΔΡΟΕΙΔΗΣ
Ελεγκτής OpenFlow	1	1	1	1	1
Διακόπτης OpenFlow	1	1	1	4	7
Η/Υ	2	4	4	4	8
Ελάχιστο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται (Gbits/s)	7.74	8.10	8.04	8.61	8.29
Μέγιστο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται (Gbits/s)	9.83	12.40	11.50	10.91	10.50

Εικόνα 44 : Χρήση εύρους ζώνης για βασικές τοπολογίες OpenFlow



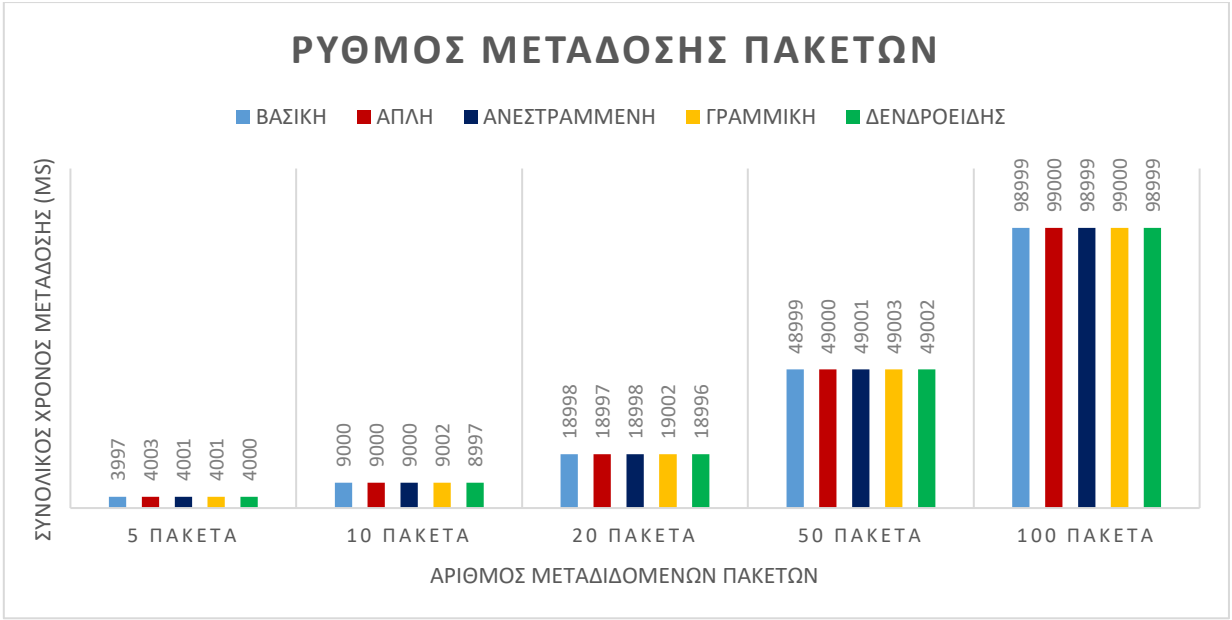
Διάγραμμα 1 : Χρήση εύρους ζώνης για βασικές τοπολογίες OpenFlow

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη χρήση του εύρους ζώνης του δικτύου, λαμβάνονται με την εκτέλεση της εντολής iPerf στο Mininet. Ο αριθμός των διακοπτών με δυνατότητα OpenFlow που απαιτούνται για την εφαρμογή της βασικής, της απλής, της ανεστραμμένης, της γραμμικής και της δενδροειδούς τοπολογίας προγραμματιζόμενων δικτύων είναι 1, 1, 1, 4 και 7 αντίστοιχα όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα και φαίνεται στην εικόνα 44. Με βάση τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, το εύρος ζώνης που χρησιμοποιήθηκε είναι το ελάχιστο στη βασική τοπολογία και το μέγιστο στην απλή τοπολογία όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1. Στη βασική τοπολογία συνδέονται μόνο δύο Η/Υ στον μεταγωγέα, ενώ στην απλή τοπολογία, συνδέονται τέσσερις Η/Υ, συνεπώς και η συνολική χρήση του εύρους ζώνης θα είναι μεγαλύτερη.

Στη συνέχεια, οι συγκρίσεις των πέντε τοπολογιών βασίζονται στο ρυθμό μετάδοσης πακέτων (PTR). Το PTR και για τις πέντε τοπολογίες συγκρίνεται στην εικόνα 45 και φαίνεται γραφικά στο διάγραμμα 2.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΔΟΘΗΚΑΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΑΚΕΤΩΝ (ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΑ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΛΕΠΤΟΥ, ms)				
	ΒΑΣΙΚΗ	ΑΠΛΗ	ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	ΔΕΝΔΡΟΕΙΔΗΣ
5	3997	4003	4001	4001	4000
10	9000	9000	9000	9002	8997
20	18998	18997	18998	19002	18996
50	48999	49000	49001	49003	49002
100	98999	99000	98999	99000	98999

Εικόνα 45 : Ρυθμός μετάδοσης πακέτων για βασικές τοπολογίες OpenFlow



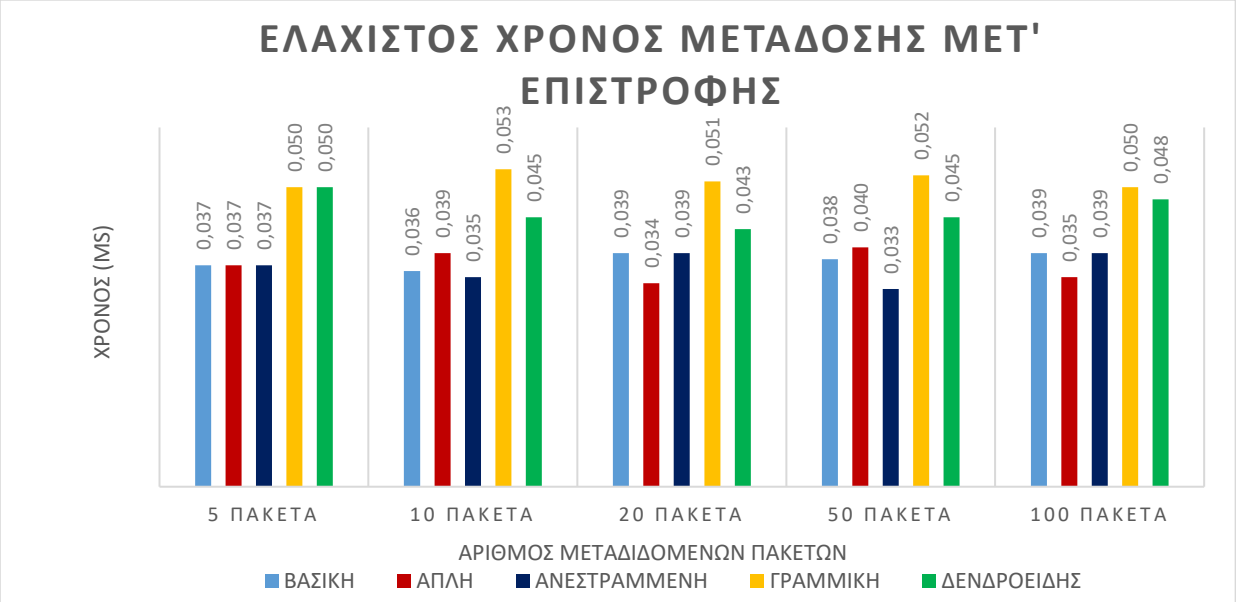
Διάγραμμα 2 : Ρυθμός μετάδοσης πακέτων για βασικές τοπολογίες OpenFlow

Με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για το PTR, ο συνολικός χρόνος που χρειάζονται οι πέντε τοπολογίες προγραμματιζόμενων δικτύων για διαφορετικό αριθμό μετάδοσης πακέτων είναι σχεδόν παρόμοιος μεταξύ τους. Η συμπεριφορά όλων των κόμβων σε οποιοδήποτε προγραμματιζόμενο δίκτυο είναι η ίδια, καθώς το προγραμματιζόμενο δίκτυο είναι ενεργό για το ίδιο χρονικό διάστημα, για εκτέλεση διαφορετικών τοπολογιών δικτύου σε κοινό ρυθμό μετάδοσης πακέτων.

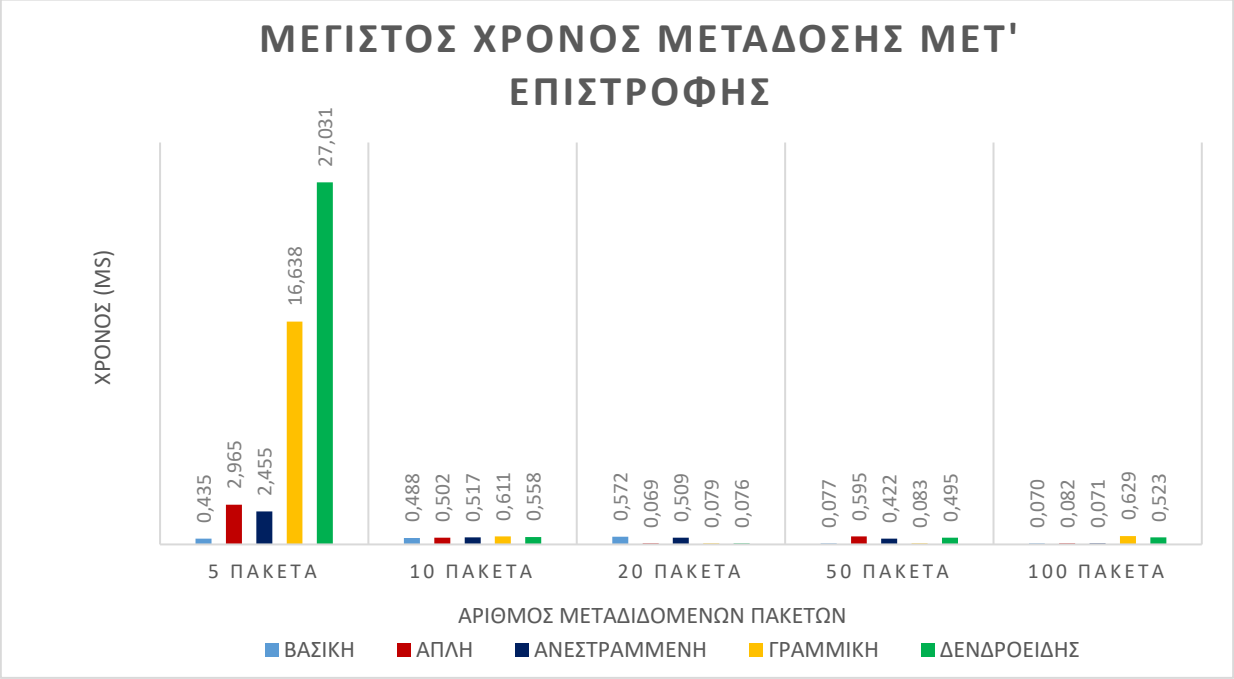
Στη συνέχεια, η σύγκριση των πέντε τοπολογιών γίνεται βάση της καθυστέρησης μεταξύ των κόμβων σε ένα δίκτυο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί βρίσκοντας τον χρόνο μετάδοσης μετ' επιστροφής (rtt) μεταξύ των κόμβων, εκτελώντας τη δοκιμή συνδεσιμότητας ping. Μία καθυστέρηση μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων για διαφορετικές τοπολογίες δικτύου με μεταβλητή PTR παρουσιάζεται στην εικόνα 46 και φαίνεται γραφικά στο διάγραμμα 3 και στο διάγραμμα 4 για ελάχιστη και μέγιστη καθυστέρηση αντίστοιχα.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΔΟΘΗΚΑΝ	ΒΑΣΙΚΗ		ΑΠΛΗ		ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ		ΓΡΑΜΜΙΚΗ		ΔΕΝΔΡΟΕΙΔΗΣ	
	Min. rtt (ms)	Max. rtt (ms)	Min. rtt (ms)	Max. rtt (ms)	Min. rtt (ms)	Max. rtt (ms)	Min. rtt (ms)	Max. rtt (ms)	Min. rtt (ms)	Max. rtt (ms)
5	0.037	0.435	0.037	2.965	0.037	2.455	0.050	16.638	0.050	27.031
10	0.036	0.488	0.039	0.502	0.035	0.517	0.053	0.611	0.045	0.558
20	0.039	0.572	0.034	0.069	0.039	0.509	0.051	0.079	0.043	0.076
50	0.038	0.077	0.040	0.595	0.033	0.422	0.052	0.083	0.045	0.495
100	0.039	0.070	0.035	0.082	0.039	0.071	0.050	0.629	0.048	0.523

Εικόνα 46 : Καθυστέρηση μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων για βασικές τοπολογίες OpenFlow



Διάγραμμα 3 : Ελάχιστος χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων για βασικές τοπολογίες OpenFlow



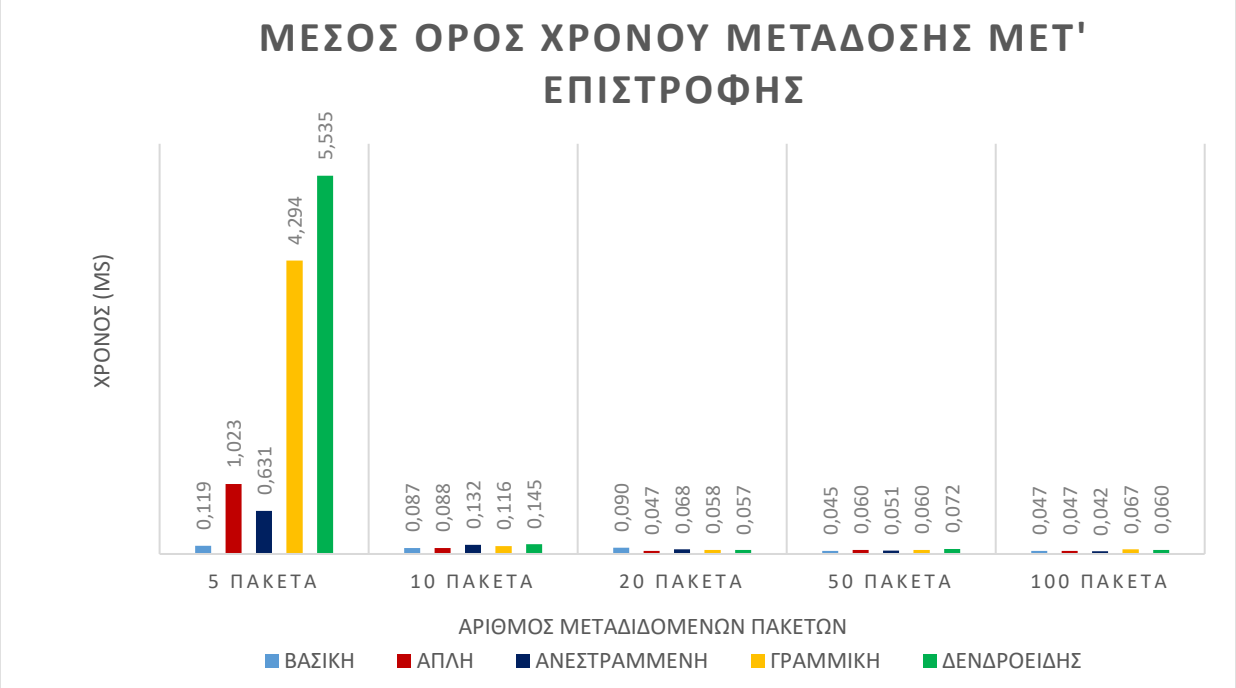
Διάγραμμα 4 : Μέγιστος χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων για βασικές τοπολογίες OpenFlow

Στις παραπάνω προαναφερόμενες τοπολογίες επιτυγχάνεται μια καθυστέρηση ως προς τον χρόνο μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιώντας μηνύματα πακέτων ICMP (Echo Request and Reply). Μια εντολή ping εκτελείται μεταξύ του Η/Υ h1 και του Η/Υ h2, του Η/Υ h4, του Η/Υ h4, του Η/Υ h4 και του Η/Υ h8 αντίστοιχα για όλες τις τοπολογίες και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται καταγράφονται στην εικόνα 46. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, είναι σαφής η ένδειξη ότι μια δενδροειδής τοπολογία χρειάζεται περισσότερο χρόνο για τη μετάδοση του πακέτου στον κόμβο προορισμού σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τοπολογίες. Για αυτό ευθύνεται ο αριθμός των κόμβων που μεσολαβούν μέχρι τον τελικό παραλήπτη, καθώς απαιτείται περισσότερος χρόνος μετάδοσης για τους ενδιάμεσους κόμβους για την παράδοση του πακέτου στον τελικό προορισμό του.

Αντιθέτως, η βασική τοπολογία απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο για να παραδώσει το πακέτο στον προορισμό του, καθώς όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με έναν μόνο μεταγωγέα με δυνατότητα OpenFlow. Η παράδοση πακέτων θα είναι ταχύτερη σε μία βασική τοπολογία. Επιπροσθέτως, παρακάτω στην εικόνα 47 όπως επίσης και στο διάγραμμα 5 παρουσιάζεται ενδεικτικά και ο μέσος όρος χρόνου μετάδοσης μετ’ επιστροφής.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΔΟΘΗΚΑΝ	ΒΑΣΙΚΗ	ΑΠΛΗ	ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	ΔΕΝΔΡΟΕΙΔΗΣ
	avg. rtt (ms)	avg. rtt (ms)	avg. rtt (ms)	avg. rtt (ms)	avg. rtt (ms)
5	0.119	1.023	0.631	4.294	5.535
10	0.087	0.088	0.132	0.116	0.145
20	0.090	0.047	0.068	0.058	0.057
50	0.045	0.060	0.051	0.060	0.072
100	0.047	0.047	0.042	0.067	0.060

Εικόνα 47 : Μέσος όρος χρόνου μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων για βασικές τοπολογίες OpenFlow



Διάγραμμα 5 : Μέσος όρος χρόνου μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων για βασικές τοπολογίες OpenFlow

Τέλος, οι συγκρίσεις μεταξύ των βασικών τοπολογιών προγραμματιζόμενων δικτύων γίνονται βάση ανάλυσης της ρυθμαπόδοσης του δικτύου. Ως ρυθμαπόδοση ενός δικτύου ορίζεται η ποσότητα δεδομένων που μεταδίδονται από πηγή σε προορισμό σε μία δεδομένη χρονική περίοδο, που συνήθως μετράτε σε bits ανά δευτερόλεπτο (bps).

Αναλυτικότερα, είναι μια αναλογία μέγιστου εύρους ζώνης δέκτη προς το χρόνο μετάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων :

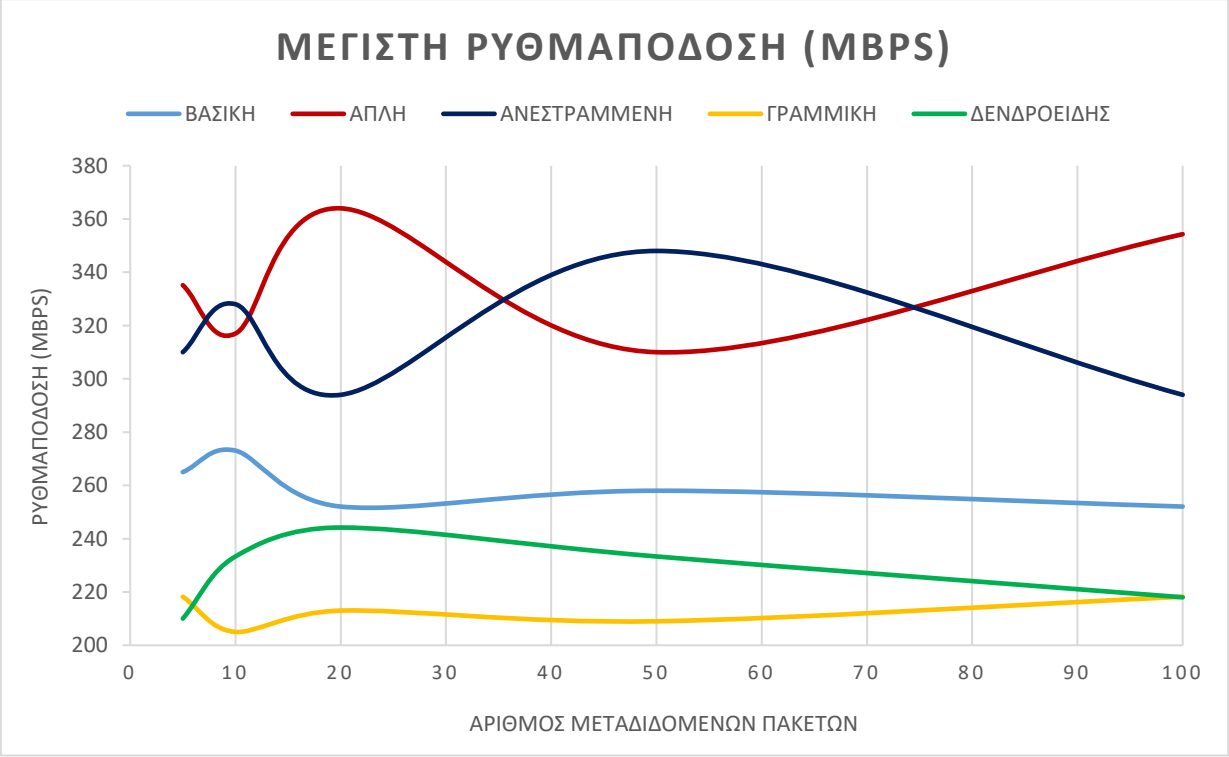
" Ρυθμαπόδοση = μέγιστο εύρος ζώνης δέκτη / χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής "

Η συνολική ρυθμαπόδοση ενός δικτύου μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση εύρους ζώνης και το χρόνο μετάδοσης μετ' επιστροφής και όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, υπολογίζεται και παρουσιάζεται γραφικά στα παρακάτω διαγράμματα 6 και 7 και στις εικόνες 48 και 49.

" Μέγιστη απόδοση = μέγιστο εύρος ζώνης / ελάχιστο rtt "

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΔΟΘΗΚΑΝ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ (Mbps)				
	ΒΑΣΙΚΗ	ΑΠΛΗ	ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	ΔΕΝΔΡΟΕΙΔΗΣ
5	265.675	335.135	310.810	218.2	210
10	273.055	317.948	328.571	205.849	233.333
20	252.051	364.705	294.871	213.921	244.186
50	258.684	310	348.484	209.807	233.333
100	252.051	354.285	294.871	218.2	218.75

Εικόνα 48 : Μέγιστη ρυθμαπόδοση για βασικές τοπολογίες OpenFlow

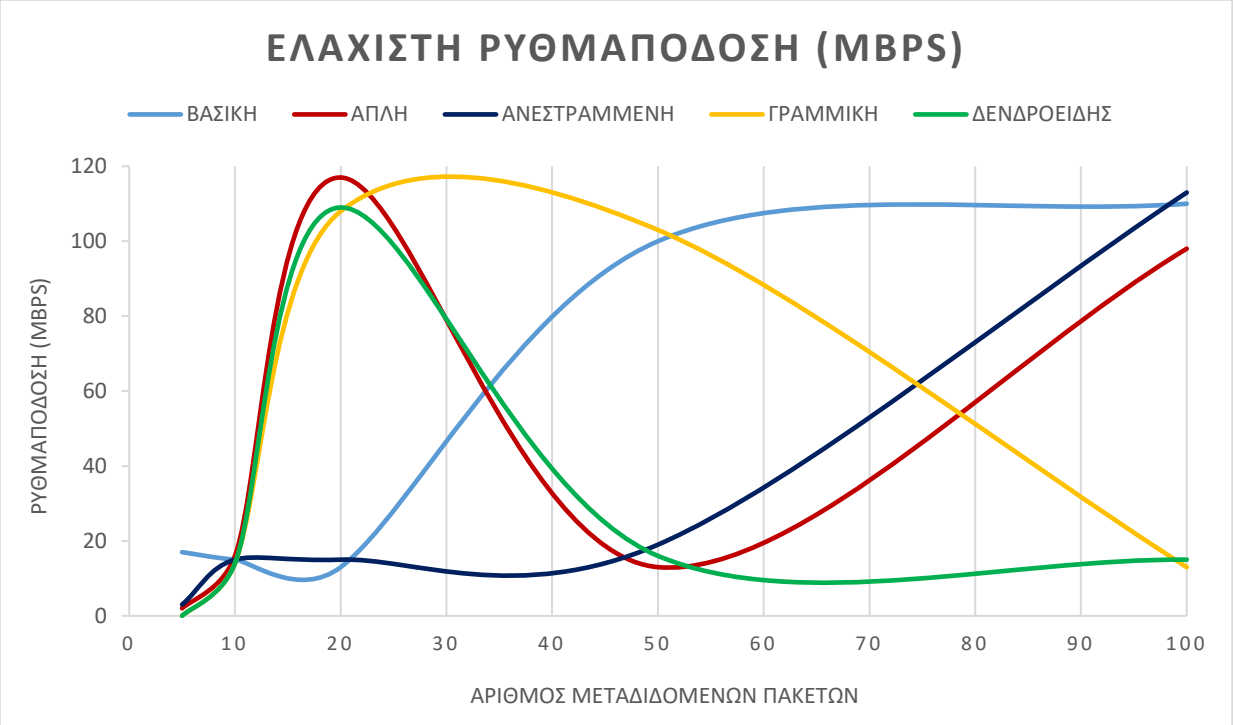


Διάγραμμα 6 : Μέγιστη ρυθμαπόδοση για βασικές τοπολογίες OpenFlow

" Ελάχιστη απόδοση = ελάχιστο εύρος ζώνης / μέγιστο rtt "

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΔΟΘΗΚΑΝ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ (Mbps)				
	ΒΑΣΙΚΗ	ΑΠΛΗ	ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	ΔΕΝΔΡΟΕΙΔΗΣ
5	17,793	2,731	3,274	0,517	0,306
10	15,860	16,135	15,551	14,091	14,856
20	13,531	117,391	15,795	108,987	109,078
50	100,519	13,613	19,052	103,734	16,747
100	110,571	98,780	113,239	13,688	15,850

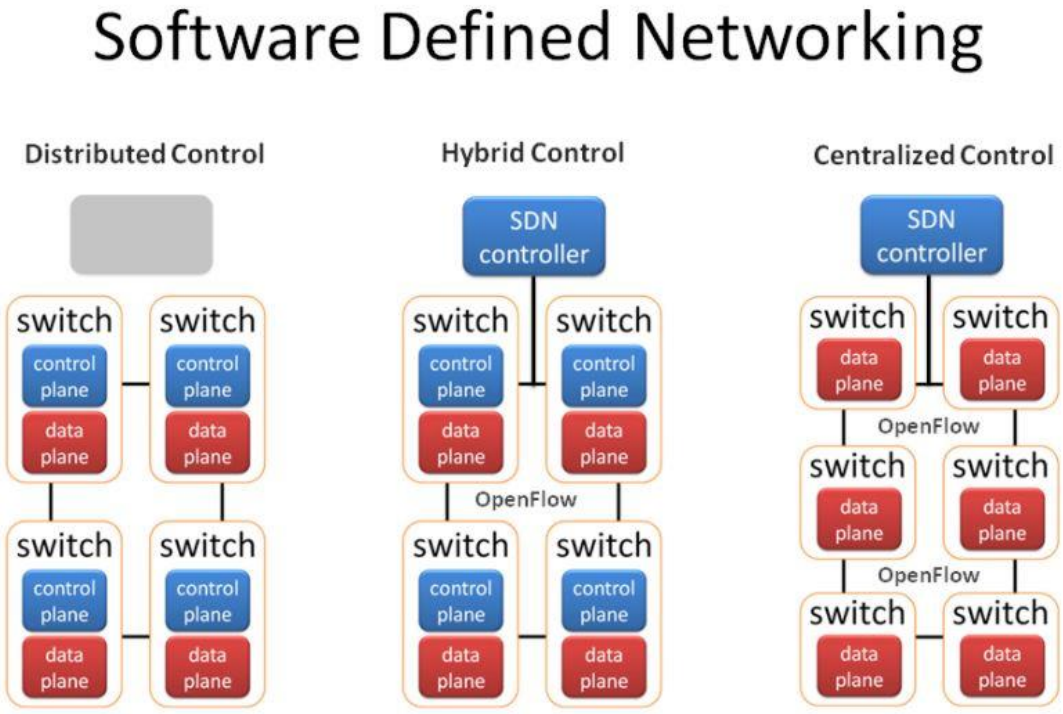
Εικόνα 49 : Ελάχιστη ρυθμαπόδοση για βασικές τοπολογίες OpenFlow



Διάγραμμα 7 : Ελάχιστη ρυθμαπόδοση για βασικές τοπολογίες OpenFlow

Ένα γράφημα μέγιστης και ελάχιστης ρυθμαπόδοσης σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης πακέτων φαίνεται στο διάγραμμα 6 και στο διάγραμμα 7 αντίστοιχα. Από τα ληφθέντα γραφήματα, παρατηρούμε ότι η ρυθμαπόδοση της δενδροειδούς τοπολογίας είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες τέσσερις τοπολογίες, και αυτό συμβαίνει επειδή η χρήση του εύρους ζώνης είναι από τις μικρότερες και η συνολική καθυστέρηση διάδοσης μετ' επιστροφής μεταξύ κόμβων είναι επίσης η μεγαλύτερη.

Ωστόσο, η απλή τοπολογία έχει τη μέγιστη ρυθμαπόδοση σε σύγκριση με τις άλλες τέσσερις τοπολογίες, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απλή τοπολογία έχει μόνο έναν μεταγωγέα και μεταξύ των δύο Η/Υ στο δίκτυο υπάρχουν μόνο δύο κόμβοι. Έτσι, στην απλή τοπολογία η καθυστέρηση είναι μικρότερη και η απόδοση είναι μεγαλύτερη ενώ στη δενδροειδή τοπολογία η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη και η απόδοση είναι μικρότερη.



Εικόνα 50 : Το μέλλον των δικτύων

6ο Κεφάλαιο : Συμπεράσματα

Τα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό έχουν τραβήξει τα φώτα της δημοσιότητας πάνω τους και έχουν δημιουργηθεί μεγάλες προσδοκίες. Κυρίως αφορούν μία τάση που έχει οδηγήσει ακόμα και σε χαρακτηρισμούς όπως : η επανάσταση στον χώρο των δικτύων. Η πραγματικότητα είναι πως πρόκειται εν μέρη για κάποια ριζική καινοτομία που θα αλλάξει τα πάντα στον χώρο, και πιο συγκεκριμένα μια σύμπραξη παλιών και νέων εργαλείων μέσα σε ένα καινούργιο πλαίσιο / αρχιτεκτονική που είναι αποτέλεσμα μιας νέας αντίληψης των δικτύων. Η αρχιτεκτονική αυτή θα εμπλουτίσει τον τρόπο που οι τεχνικοί σχεδιάζουν, υλοποιούν και διαχειρίζονται τα δίκτυα. Προστίθενται δυνατότητες που δεν υπήρχαν ως τώρα, όμως αυτό γίνεται με έναν μη επιθετικό τρόπο καθώς τα προγραμματιζόμενα δίκτυα δεν επιδιώκουν την εξαφάνιση των συμβατικών δικτύων και την επικράτηση της δικής τους αρχιτεκτονικής. Αντιθέτως, η ενσωμάτωση των προγραμματιζόμενων δικτύων θα γίνει σταδιακά, με την χρήση και την επέκταση των υπαρχόντων υποδομών και σε τεχνολογία αλλά και σε τεχνογνωσία.

Με βάση την ανάλυση απόδοσης των προτεινόμενων τοπολογιών δικτύου και τη συζήτηση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απόδοση της απλής τοπολογίας είναι καλύτερη σε σύγκριση με τις άλλες τέσσερις τοπολογίες με ορισμένους περιορισμούς. Εάν στη απλή τοπολογία ο αριθμός των κεντρικών υπολογιστών στο δίκτυο αυξηθεί, τότε η απόδοση του δικτύου μειώνεται αυτόματα. Και αυτό αιτιολογείται καθώς θα διαχειρίζεται ολόκληρο το φορτίο ενός δικτύου με ένα μόνο μεταγωγέα OpenFlow και οι καταχωρήσεις ροής σε έναν μεταγωγέα θα είναι περισσότερες. Εάν, επί παραδείγματι, ο μεταγωγέας OpenFlow αρνείται την υπηρεσία λόγω κάποιας βλάβης, τότε ολόκληρο το δίκτυο θα καταστραφεί. Επίσης, η ταχύτητα των ροών, το εύρος ζώνης, η ρυθμαπόδοση, η πιθανότητα απώλειας πακέτων και πολλές άλλες φυσικές παράμετροι επηρεάζονται λόγω των περιορισμών του υλικού. Στην απλή τοπολογία, η συνολική απόδοση του δικτύου βελτιώνεται σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τοπολογίες με βάση το φόρτου δικτύου. Σε μία απλή τοπολογία, ολόκληρος ο φόρτος δικτύου αντιμετωπίζεται από έναν μόνο μεταγωγέα με δυνατότητα OpenFlow ανεξάρτητα από τον αριθμό των Η/Υ. Στην απλή τοπολογία, ο φόρτος δικτύου κατανέμεται σε ένα μοναδικό μεταγωγέα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για το χειρισμό ροής περιορισμένων εισόδων. Όλοι οι μεταγωγείς πρέπει να έχουν σχεδόν ίσο αριθμό ροής καταχωρήσεων, ο οποίος ελέγχεται από τον ελεγκτή.

Επίσης, τα σημαντικά μειονεκτήματα για την γραμμική και την δενδροειδή τοπολογία είναι ότι σε περίπτωση δυσλειτουργίας, καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο λόγω περισσότερων απαιτήσεων υλικού, και κυρίως, είναι και πιο δαπανηρή η εγκατάσταση τους επειδή δεδομένου ότι, ο αριθμός των απαιτήσεων των διακοπτών OpenFlow είναι περισσότερος, καθώς εξαρτάται και από τον αριθμό των Η/Υ σε ένα δίκτυο. Αν και, η ταχύτητα του δικτύου θα αυξηθεί λόγω πολλαπλών διακοπτών και πολλαπλών εισόδων ροής, και η γρήγορη επεξεργασία πακέτων θα έχει επιτευχθεί, αντιθέτως θα απαιτείται περισσότερος χώρος και κόστος για την εγκατάσταση, λόγω περισσότερων απαιτήσεων υλικού. Μερικές φορές, ο μεγαλύτερος αριθμός κόμβων επηρεάζει επίσης τη συνολική ταχύτητα της ροής δεδομένων στο δίκτυο. Έτσι, αυτό θα δημιουργήσει μια αμφιλεγόμενη κατάσταση όσον αφορά την μελέτη της ταχύτητας.

Η γραμμική και η δενδροειδής τοπολογία παρότι είναι εύκολο να εφαρμοστούν με μία μόνο εντολή, η πολυπλοκότητα του δικτύου θα είναι κάπως μεγαλύτερη από την βασική, την απλή και την ανεστραμμένη τοπολογία, κυρίως λόγω του ότι ο αριθμός των διακοπτών μεταξύ των Η/Υ είναι διαφορετικός. Και η απόδοση τους με βάση την ταχύτητα, είναι πιο περιορισμένη σε σύγκριση με την βασική, την απλή και την ανεστραμμένη τοπολογία.

Σε αντίθεση με την απλή τοπολογία, στην δενδροειδή τοπολογία ολόκληρος ο φόρτος δικτύου κατανέμεται στους μεταγωγείς του δικτύου, το οποίο είναι ανέφικτο σε ένα δίκτυο απλής τοπολογίας. Εάν ο αριθμός των Η/Υ αυξηθεί, η συνολική απόδοση του δικτύου απλής τοπολογίας σίγουρα θα μειωθεί, αλλά αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση της δενδροειδούς τοπολογίας δικτύου καθώς ο φόρτος διαμοιράζεται. Επίσης, η απαίτηση χώρου για την εγκατάσταση και το κόστος διαμόρφωσης είναι χαμηλότερο στην απλή τοπολογία, παρά στην γραμμική και την δενδροειδή τοπολογία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βικιπαίδεια, η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια (2019). Δίκτυο υπολογιστών, Ανακτήθηκε 5 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα https://el.wikipedia.org/wiki/Δίκτυο_υπολογιστών

2. Wikipedia, the free encyclopedia (2019). Computer network, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_network

3. National Inventors Hall of Fame. (2017). Inductee Details - Paul Baran, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα https://www.invent.org/

4. National Inventors Hall of Fame. (2017). Inductee Details - Donald Watts Davies, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα https://www.invent.org/

5. Roberts Larry, Marrill Tom (1966). Toward a Cooperative Network of Time-Shared Computers, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα http://www.packet.cc/files/toward-coop-net.html

6. Chris Sutton (2004). Internet Began 35 Years Ago at UCLA with First Message Ever Sent Between Two Computers, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα https://web.archive.org/web/20080308120314/http://www.engineer.ucla.edu/stories/2004/Internet35.htm

7. Spurgeon, Charles E. (2000). Ethernet The Definitive Guide. O'Reilly & Associates, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ISBN 1565926609

8. J. M. Jornet and M. Pierobon (2011). Nanonetworks: A New Frontier in Communications, Ανακτήθηκε 16 Ιανουαρίου 2019 από ιστοσελίδα https://cacm.acm.org/magazines/2011/11/138218-nanonetworks-a-new-frontier-in-communications/fulltext

9. Gratton, Dean A. (2013). The Handbook of Personal Area Networking Technologies and Protocols, Ανακτήθηκε 16 Ιανουαρίου 2019 από ISBN 9780521197267

10. Edwards, Wade (2005). CCNP Complete Study Guide, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από ISBN 9780782144215

11. Bradley Mitchell (2018). A WAN Is a Wide Area Network. Here's How They Work, Ανακτήθηκε 16 Ιανουαρίου 2019 από https://www.lifewire.com/wide-area-network-816383

12. Microsoft (2009). Physical Network Interface, Ανακτήθηκε 17 Ιανουαρίου 2019 από https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/it-pro/windows-server-2008-R2-and-2008/dd392944(v=ws.10)

13. Taitradioacademy (2017). How do repeater systems work?, Ανακτήθηκε 15 Ιανουαρίου 2019 από https://www.taitradioacademy.com/topic/repeater-systems-1/

14. Cisco Systems (2014). Traffic regulators: Network interfaces, hubs, switches, bridges, routers, and firewalls, Ανακτήθηκε 17 Ιανουαρίου 2019 από https://learningnetwork.cisco.com/servlet/JiveServlet/previewBody/2810-102-1-7611/primch5.pdf

15. Cisco Systems (2014). Cisco Networking Academy's Introduction to Basic Switching Concepts and Configuration, Ανακτήθηκε 17 Ιανουαρίου 2019 από http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2181836&seqNum=5

16. Cisco Systems (2015). Cisco Networking Academy's Introduction to Routing Dynamically, Ανακτήθηκε 17 Ιανουαρίου 2019 από http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2180210&seqNum=4

17. Douglas Harper (2014). Modem entry, Ανακτήθηκε 17 Ιανουαρίου 2019 από https://web.archive.org/web/20140903093303/http://etymonline.com/index.php?term=modem&allowed_in_frame=0

18. Boudriga Noureddine (2010). Security of mobile communications, Ανακτήθηκε 17 Ιανουαρίου 2019 από ISBN 0849379423

19. Βικιπαίδεια, η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια (2019). Εικονικοποίηση, Ανακτήθηκε 19 Ιανουαρίου 2019 από https://el.wikipedia.org/wiki/Εικονικοποίηση

20. Benzekki, Kamal; El Fergougui, Abdeslam; Elbelrhiti Elalaoui, Abdelbaki (2016). "Software-defined networking (SDN): A survey". *Security and Communication Networks*. Ανακτήθηκε 12 Φεβρουαρίου 2021 από https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sec.1737

21. Wikipedia, the free encyclopedia (2019). Software-defined networking, Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από ιστοσελίδα https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking

22. N. Handigol, S. Seetharaman, M. Flajslik, N. McKeown, and R. Johari. Plug-n-serve: Load-balancing web traffic using openflow. ACM SIGCOMM Demo, 2009. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από hal-00825087, version 5 - 19 Jan 2014

23. Sushant Jain, Alok Kumar, Subhasree Mandal, Joon Ong, Leon Poutievski, Arjun Singh, Subbaiah Venkata, Jim Wanderer, Junlan Zhou, Min Zhu, et al. B4: Experience with a globally-deployed software defined wan. In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM, pages 3–14. ACM, 2013. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από hal-00825087, version 5 - 19 Jan 2014

24. K.K. Yap, R. Sherwood, M. Kobayashi, T.Y. Huang, M. Chan, N. Handigol, N. McKeown, and G. Parulkar. Blueprint for introducing innovation into wireless mobile networks. In Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, pages 25–32. ACM, 2010. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από hal-00825087, version 5 - 19 Jan 2014

25. Dimitra E. Simeonidou, Reza Nejabati, and Mayur Channegowda. Software defined optical networks technology and infrastructure: Enabling software-defined optical network operations. In Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, page OTh1H.3. Optical Society of America, 2013. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από hal-00825087, version 5 - 19 Jan 2014

26. K.L. Calvert, W.K. Edwards, N. Feamster, R.E. Grinter, Y. Deng, and X. Zhou. Instrumenting home networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 41(1):84–89, 2011. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από hal-00825087, version 5 - 19 Jan 2014

27. Benzekki, Kamal; El Fergougui, Abdeslam; Elbelrhiti Elalaoui, Abdelbaki (2016). "Software-defined networking (SDN): A survey". *Security and Communication Networks*. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sec.1737

28. G. V. Nikolaev, Network Monitoring with Software Defined networking Towards: OpenFlow network monitoring, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft university of Techonolgy, 2013. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021

29. ITC70LT Morteza Fakoorrad (132133 IVCMM) Application Layer of Software Defined Networking: pros and cons in terms of security (Master Thesis) σελ. 21-22. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021

30. Brent Salisbury (2013). Inside Google's Software-Defined Network, Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από https://www.networkcomputing.com/networking/inside-googles-software-defined-network

31. Wikipedia, the free encyclopedia (2019). List of SDN controller software, Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από ιστοσελίδα https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_SDN_controller_software

32. Βικιπαίδεια, η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια (2019). VirtualBox, Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από https://el.wikipedia.org/wiki/VirtualBox

33. Mininet Overview (2018). Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από ιστοσελίδα http://mininet.org/overview/

34. Wireshark Overview (1998). Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από ιστοσελίδα https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/ChapterIntroduction.html

35. Wikipedia, the free encyclopedia (2020). PuTTY, Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από ιστοσελίδα https://en.wikipedia.org/wiki/PuTTY

36. Wikipedia, the free encyclopedia (2020). Xming, Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου 2021 από ιστοσελίδα https://en.wikipedia.org/wiki/Xming