



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**Study of experimental testbeds and demonstrators for
Future Media Internet Applications**

Πτυχιακή Εργασία

ΝΙΚΟΛΕΤΤΑ Γ. ΚΑΤΣΑΟΥΝΗ

Επιβλέπων :

Γεώργιος Δημητρακόπουλος,
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2017

Πτυχιακή Εργασία

**Study of experimental testbeds and demonstrators for
Future Media Internet Applications**

ΝΙΚΟΛΕΤΤΑ Γ. ΚΑΤΣΑΟΥΝΗ
A.M. 21212

Επιβλέπων :

Γεώργιος Δημητρακόπουλος,
Επίκουρος Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

Χρήστος Μιχαλακέλης, Επίκουρος
Καθηγητής
Κωνσταντίνος Τσερπές, Επίκουρος
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2017

Η Κατσαούνη Νικολέττα

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1)** Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2)** Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

*Η παρούσα πτυχιακή εργασία,
αφιερώνεται στους γονείς μου και στην αδελφή μου*

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	7
Abstract	8
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	10
Συντομογραφίες	11
Εισαγωγή	12
1 Software Defined Networks	13
1.1 Η ανάγκη νέας αρχιτεκτονικής δικτύων	13
1.2 Ορισμός SDN	14
1.3 Αρχές και πλεονεκτήματα SDN	14
1.4 SDN Αρχιτεκτονική	16
1.5 Southbound επικοινωνία	17
2 Network Function Virtualization	20
2.1 Η ανάγκη για Network Function Virtualization	20
2.2 Περιγραφή NFV τεχνολογίας και πλεονεκτήματα	20
2.3 SDN και NFV	21
3 Content Delivery Networks	24
3.1 Η έννοια του περιεχομένου (content)	24
3.2 Η ανάγκη για CDN	25
3.3 CDN - Ορισμός και αρχές λειτουργίας	26
3.4 Μηχανισμοί ανακατεύθυνσης	28
3.5 Ο κόσμος των CDNs	30
3.6 Κατηγορίες CDN	32
3.7 Αρχιτεκτονική Στρωμάτων	33
3.8 Η περίπτωση Akamai Technologies	34
4 Δίκτυα και Πολυμέσα	36
4.1 Πολυμέσα (multimedia)	36
4.2 Δικτύωση Πολυμέσων	37
4.2.1 Τεχνολογία Ροής (Streaming)	37
4.2.2 Τρόπος Εκπομπής	38
4.2.3 Προδιαγραφές QoS	40
4.2.4 Εύρος μετάδοσης (bandwidth)	41
4.3 Πολυμέσα και Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου	41
4.4 Προκλήσεις των μελλοντικών δικτύων πολυμέσων	42

5	Αλυσίδα αξίας της διανομής βίντεο.....	44
5.1	Ορισμός	44
5.2	Value chain και streaming	44
5.3	Value Chain εξέλιξη	46
5.3.1	Νέοι ανταγωνιστές	47
5.3.2	Ανάπτυξη OTT διανομής βίντεο	47
5.4	Μοντέλα ISP-CDN Συνεργασίας	49
6	Συνεργασία ISPs CDNs.....	51
6.1	Βασική Ιδέα.....	52
6.2	NFV/SDN Πλατφόρμα	53
6.3	Υλοποίηση υπηρεσιών περιεχομένου	54
6.4	Αλγόριθμος ενσωμάτωσης	57
6.5	Αξιολόγηση	58
6.6	Online vCDN διαχείριση.....	61
6.7	Αποτελέσματα.....	63
6.8	Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	63
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

Περίληψη

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για τη διανομή πολυμέσων και ιδιαίτερα βίντεο έχουν φέρει μεγάλες αλλαγές στον τρόπο μεταφοράς των περιεχομένων. Νέες ανάγκες έχουν δημιουργηθεί και καινούργιες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για να ανταπεξέλθουν στις νέες συνθήκες. Οι Πάροχοι Υπηρεσιών (ISPs) αντιμετωπίζουν μεγάλα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν έτσι ώστε να παραμείνουν ανταγωνιστικοί. Στην πτυχιακή αυτή παρουσιάζεται η νέα κατάσταση και ένας τρόπος συνεργασίας των ISPs με τους παρόχους Δικτύων Διανομής Περιεχομένου (CDNs) χρησιμοποιώντας εικονικές λειτουργίες δικτύου (NFV). Τα πλεονεκτήματα και για τις δύο πλευρές παρουσιάζονται καθώς και η διαδικασία ενσωμάτωσης των υπηρεσιών. Στο τέλος περιγράφονται πειράματα που έγιναν για να υποστηρίξουν τα οφέλη αυτής της ιδέας.

Λέξεις κλειδιά: διανομή πολυμέσων, ISPs, CDNs, NFV

Abstract

The ever increasing demands for multimedia delivery and especially video consumption tend to bring big changes in the way which becomes the content transfer. New needs arose and new technologies have developed in order to fulfill the multiple needs. The Internet Service Providers (ISPs) are faced with huge obstacles that must be passed in order to be able to stay in the game. In this thesis is described the new situation and a new way of collaboration between the ISPs and the Content Delivery Network (CDN). The ISPs are cooperating CDN software using Network Function Virtualization (NFV). The benefits for both sides are mentioned and the procedure of this embedding. At the end experiments that have done are presented to support the benefits of the idea.

Keywords: multimedia delivery, ISPs, CDNs, NFV

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Αρχές SDN	15
Εικόνα 2 SDN Architecture.....	17
Εικόνα 3 OpenFlow δομή.....	19
Εικόνα 4 Σχέση Data-Information-Content	25
Εικόνα 5 Διανομή με την χρήση CDN	28
Εικόνα 6 Υποστηριζόμενες υπηρεσίες CDN	31
Εικόνα 7 Αρχιτεκτονική CDN.....	34
Εικόνα 8 Unicast Broadcast Multicast Διανομή	39
Εικόνα 9 Value Chain Διανομής Βίντεο	45
Εικόνα 10 Ανάπτυξη των συντελεστών διανομής περιεχομένου	49
Εικόνα 11 CDN - ISP View	54
Εικόνα 12 Κανονικό Μοντέλο	55
Εικόνα 13 Διαχώριση κυκλοφορίας μέσω vHG	56
Εικόνα 14 Ενσωμάτωση vCDN υπηρεσιών στο δίκτυο	57
Εικόνα 15 Geant τοπολογία	59
Εικόνα 16 Αριθμός αποδοχής SLA.....	60
Εικόνα 17 Κατανάλωση Bandwidth	60
Εικόνα 18 Κατανάλωση υπολογιστικών πόρων	61
Εικόνα 19 Testbed ελέγχου CDN διαχείρισης	62
Εικόνα 20 Αποτελέσματα testbed.....	63
Εικόνα 21 Ryu Controller	64

Κατάλογος Πινάκων

Πίν.1: Διαφορές SDN-NFV.....	22
------------------------------	----

Συντομογραφίες

ISP	Internet Service Provider
CDN	Content Delivery Network
NFV	Network Function Virtualization
ONF	Open Networking Foundation
API	Application Programming Interface
OTT	Over-The-Top

Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια του προγράμματος Erasmus στο Bordeaux της Γαλλίας είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Daniel Negru στο LaBRI (Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique) και να συμμετάσχω στο Project που παρουσιάζεται σε αυτή την Πτυχιακή Εργασία.

Οι αυξημένες ανάγκες σε δικτύωση καθιστούν τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές ανίκανες να ανταπεξέλθουν στις νέες απαιτήσεις καθώς η διασύνδεση πολύπλοκων δικτυακών εξοπλισμών και η χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων, που χρειάζονται για τον τεράστιο όγκο των δεδομένων, δεν υποστηρίζονται από αυτές. Έτσι, καινοτομίες όπως τα SDN δίκτυα μετατρέπουν τα δίκτυα σε προγραμματιζόμενα μέσω λογισμικού που δεν περιορίζονται από περιορισμούς κατασκευαστή.

Παράλληλα, η ψυχαγωγία σε πραγματικό χρόνο (video και audio streaming) είναι η πρώτη υπηρεσία σε ζήτηση και καθώς το Διαδίκτυο αρχικά δεν δημιουργήθηκε για την διανομή πολυμέσων, η διαχείριση αυτού του όγκου επιβαρύνει ακόμη περισσότερο την αποτελεσματική δικτύωση. Τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (CDNs) με τη τοποθέτηση εξυπηρετητών σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες προσφέρουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας στους χρήστες ενώ την ίδια στιγμή διευκολύνουν τους Παρόχους Περιεχομένου στην μεταφορά των δεδομένων τους.

Η νέα τάξη πραγμάτων κλονίζει την αλυσίδα διανομής περιεχομένου με τους Παρόχους Υπηρεσιών (ISPs) να αντιμετωπίζουν προβλήματα να παραμείνουν στο προσκήνιο καθώς πλέον χρησιμοποιούνται μόνο ως μέσο σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Το βασικό πλεονέκτημά τους όμως είναι ότι διαχειρίζονται όλο το δίκτυο (π.χ. την δρομολόγηση πακέτων από τον αρχικό έως τον τελικό κόμβο). Εκμεταλλευόμενοι αυτό, οι ISPs μπορούν να συνεργαστούν με τους παρόχους CDN και περιεχομένου με συμφωνία ωφέλιμη και για τις δύο πλευρές αυξάνοντας την ίδια στιγμή την ποιότητα προσφερόμενων υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες

1 Software Defined Networks

1.1 Η ανάγκη νέας αρχιτεκτονικής δικτύων

Τα παραδοσιακά δίκτυα [1] διαμορφώνονται από τα hardware στοιχεία τους και το αντίστοιχο λογισμικό που τρέχει σε αυτά. Ιδανικά, το hardware του κάθε δικτύου πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- **Απλότητα:** Είναι ωφέλιμο τα δίκτυα να αποτελούνται από απλά οικονομικά δομικά στοιχεία, καθώς έτσι καθίστανται ανταγωνιστικά στην αγορά και η διαδικασία κατασκευής τους είναι ευκολότερη και όχι δαπανηρή σε χρόνο και χρήματα.
- **Ουδετερότητα:** Τα δίκτυα πρέπει να επιτρέπουν τη συνεργασία κομματιών hardware τα οποία είναι φτιαγμένα από διαφορετικούς κατασκευαστές αλλά λειτουργούν εύρυθμα μεταξύ τους.
- **Προσαρμοστικότητα:** Είναι απαραίτητο να παρέχεται η δυνατότητα αναβάθμισης του hardware έτσι ώστε να εξυπηρετεί τις ολοένα και αυξανόμενες μελλοντικές απαιτήσεις.

Όσον αφορά στο software, πρέπει να εξυπηρετεί μόνο μια απαίτηση. Πρέπει να υπάρχει **ευελιξία** ώστε να είναι δυνατή η αναβάθμιση του control plane για να είναι σε θέση να ακολουθήσει τις καινοτομίες.

Τα περισσότερα συμβατικά δίκτυα [2] είναι σχεδιασμένα βασισμένα σε ιεραρχικά μοντέλα που αποτελούνται από Ethernet switches συνδεδεμένα με κάποιου είδους δενδρική δομή. Μια τέτοια στατική αρχιτεκτονική είναι εξαιρετικά αποδοτική σε περιπτώσεις client-server, αλλά ανεπαρκής στις σημερινές ανάγκες (υπολογιστικές και αποθηκευτικές). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την συνεχή αλλαγή των traffic patterns, την ανάγκη μεγάλης υπολογιστικής ισχύος και bandwidth όπως επίσης και την έντονη τάση των επιχειρήσεων να στρέφονται προς διάφορες υπηρεσίες νέφους καθιστά αναγκαία την δημιουργία μιας νέας αρχιτεκτονικής που θα μπορεί να ανταπεξέλθει στις νέες απαιτήσεις.

1.2 Ορισμός SDN

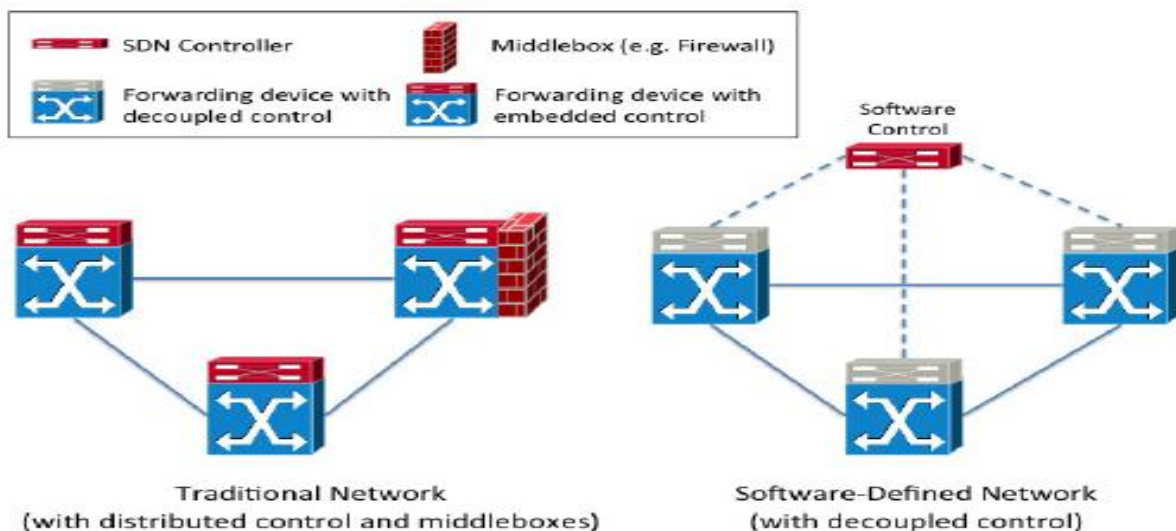
Ίσως το μόνο ενδιαφέρον των χρηστών είναι τα πακέτα των δεδομένων τους να φτάνουν στο σωστό προορισμό με χαρακτηριστικά που περιγράφονται από Quality of Service (QoS). Όμως, για τους διαχειριστές είναι εξίσου σημαντικό να μπορούν να ελέγξουν την κυκλοφορία του δικτύου. Λόγω της έλλειψης επαρκούς interface, το δίκτυο πρέπει να προγραμματίζεται ξεχωριστά σε κάθε κόμβο, που είναι εξαιρετικά χρονοβόρο καθώς το κεντρικό δίκτυο και η δρομολόγηση των πακέτων ανήκουν στο ίδιο interface.

Ο ONF (Open Networking Foundation), [\[3\]](#) επίσημος μη κερδοσκοπικός οργανισμός καθοδηγούμενος από χρήστες και με σκοπό την προώθηση και επιτάχυνση της υιοθέτησης του SDN, ορίζει το SDN ως εξής:

“The physical separation of the network control plane from the forwarding plane, [in which] a control plane controls several devices.”

1.3 Αρχές και πλεονεκτήματα SDN

Μια από τις βασικές αρχές πάνω στις οποίες βασίστηκε το SDN είναι το δυνητικό πλεονέκτημα διαχωρισμού των control και data plane του δικτύου, όπως αποτυπώνεται στην εικόνα Εικ.1. Αυτός ο διαχωρισμός παρέχει πολλές δυνατότητες στον διαχειριστή του δικτύου, αφού του προσφέρει κεντριοποιημένο ή ημι-κεντριοποιημένο έλεγχο προγραμματισμού. Επίσης, παρέχεται οικονομικό όφελος, καθώς το περίπλοκο software μπορεί να περιοριστεί σε ένα ή σε λίγα σημεία, γεγονός που το καθιστά ευκολότερο να επαναρυθμιστεί και να ελεγχθεί.



Εικόνα 1 Αρχές SDN [4]

Το επίπεδο ελέγχου βρίσκεται σε λογισμικό που είναι εγκατεστημένο εξωτερικά από τα switches και οι εντολές προώθησης γίνονται από το control plane (Controller) και πραγματοποιούνται μέσα στα switches. Η συμπεριφορά του δικτύου είναι δυνατόν να αλλάξει μέσω αναβάθμισης του λογισμικού γεγονός που το καθιστά οικονομικότερο, καθώς σε σύγκριση με το hardware το κόστος αναβάθμισης ή και αντικατάστασης του λογισμικού είναι μικρό. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η ευελιξία διαχείρισης, ασφάλειας και βελτιστοποίησης των πόρων μέσω δυναμικών αυτοματοποιημένων προγραμμάτων χωρίς να είναι αναγκαία η αναμονή ενσωμάτωσης των χαρακτηριστικών στις προδιαγραφές των προμηθευτών. Το SDN δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να πειραματιστούν με νέες καινοτόμες ιδέες, και επιτρέπει στους διαχειριστές να δημιουργήσουν νέες υπηρεσίες και να προσαρμόσουν το δίκτυο στις ανάγκες των εφαρμογών.

Με τον διαχωρισμό των ελέγχων, [5] καθίσταται δυνατόν να υπάρξουν πολλαπλά control planes τα οποία να συνεργάζονται στην επίβλεψη του δικτύου και οι απαιτήσεις και οι πολιτικές των υποσυστημάτων μπορούν να συγχωνευθούν με αυτοματοποιημένο τρόπο, διαδικασία που είναι δαπανηρή στα παραδοσιακά δίκτυα. Επιπλέον, ένα δίκτυο μπορεί να "τεμαχιστεί" σε δευτερεύοντα υπο-δίκτυα χωρίς να επηρεαστεί η πραγματική συνδεσιμότητα ή ακόμα και να δημιουργηθούν απομονωμένα δίκτυα. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση είναι εφικτή και η εικονική εφαρμογή των πόρων (virtualization).

Η νέα γενιά δικτύων προσφέρει πλεονεκτήματα σε αρκετούς και διαφορετικούς τομείς. Πολλαπλές εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτή τη τεχνολογία προωθούνται και προτείνονται για δίκτυα επιχειρήσεων, data centers, WANs και για οικιακή χρήση. Οι καινούργιες υπηρεσίες που υποστηρίζονται από SDN περιλαμβάνουν πρωτόκολλα δρομολόγησης, network load-balancers, μεθόδους δρομολόγησης για κέντρα δεδομένων, διαχείριση κυκλοφορίας, multicasting και όλες τις μορφές πολιτικής διαχείρισης που βοηθούν στην επίτευξη επιχειρηματικών στόχων.

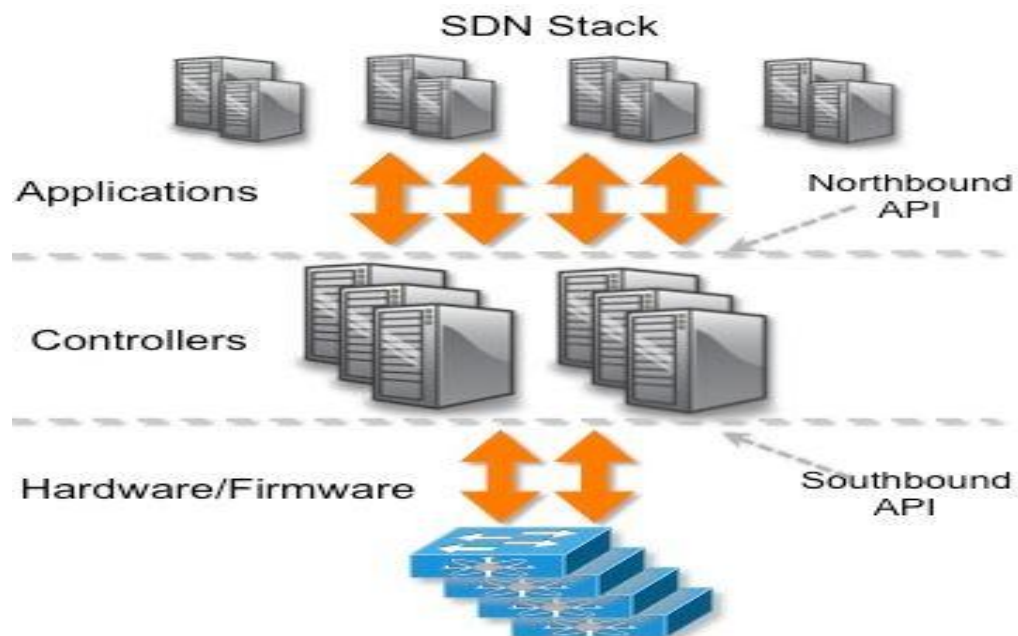
1.4 SDN Αρχιτεκτονική

Η SDN αρχιτεκτονική ορίζει πως μπορεί να σχεδιαστεί ένα δίκτυο και ένα υπολογιστικό σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί με την χρήση open software-based τεχνολογιών και hardware έτσι ώστε να τηρείται η βασική αρχή των SDN δικτύων, ο διαχωρισμός control και data plane. Τα βασικά δομικά στοιχεία της SDN αρχιτεκτονικής μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες:

1. **SDN Συσκευές Δικτύου:** Αποτελούν το hardware του δικτύου και είναι υπεύθυνες για την δρομολόγηση και την επεξεργασία των πακέτων δεδομένων.
2. **SDN Ελεγκτής (Controller):** Ο ελεγκτής έχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στο δίκτυο καθώς είναι εκείνος που μεταφέρει τις πληροφορίες μεταξύ των συσκευών του δικτύου και της εφαρμογής. Έτσι, μεταφράζει και στέλνει τις απαιτήσεις του διαχειριστή σχετικά με την διαδικασία δρομολόγησης των πληροφοριών που πρέπει να ακολουθηθεί, οι οποίες έχουν δοθεί μέσω του API, στο hardware. Την ίδια στιγμή, επιτρέπει την ενημέρωση του διαχειριστή για την τρέχουσα κατάσταση των συσκευών μεταφέροντας στατιστικά και άλλα δεδομένα, δημιουργώντας έτσι μία απλοποιημένη, εύκολα κατανοητή εικόνα του δικτύου.
3. **SDN Εφαρμογές:** Είναι προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με τον SDN ελεγκτή μέσω APIs (Application Programming Interface). Αυτές οι εφαρμογές είναι υπεύθυνες για να συγκεντρώνουν τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να τις παρουσιάσουν στον διαχειριστή του δικτύου, κυρίως σε περιπτώσεις που πρέπει να υπάρξει κάποια απόφαση για την πορεία των δεδομένων. Για παράδειγμα, θα μπορούσε

να είναι ένα πρόγραμμα αναγνώρισης επικίνδυνης δραστηριότητας στο δίκτυο για την πιθανή πρόληψη και αντιμετώπιση κακόβουλης ενέργειας.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, η επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων του δικτύου επιτυγχάνεται με την χρήση APIs. Συγκεκριμένα, μεταξύ του ελεγκτή και του επιπέδου εφαρμογής χρησιμοποιείται η «προς τον βορά» διεπαφή, ενώ μεταξύ του ελεγκτή και των διάφορων κόμβων (φυσικών ή εικονικών switches) υπάρχει η αντίστοιχη «προς το νότο». Το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα στα SDN δίκτυα για την «προς το νότο» διεπαφή είναι το OpenFlow, αναφορά στο οποίο γίνεται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2 SDN Architecture

1.5 Southbound επικοινωνία

Η ανάγκη δημιουργίας απαραίτητων πρωτοκόλλων που μπορούν να υποστηρίξουν την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή και των συσκευών δρομολόγησης εμφανίστηκε αρκετά νωρίς

με μία πρώτη σημαντική προσπάθεια την αρχιτεκτονική ForCES που αποτέλεσε τον πρόγονο του OpenFlow. Και οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές [\[5\]](#) οι οποίες βασίζονται στην αρχή διαχωρισμού των control και data planes καθώς και στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των δύο. Παρ' όλα αυτά είναι πολύ διαφορετικές σε επίπεδο σχεδιασμού, αρχιτεκτονικής, μοντέλου δρομολόγησης και πρωτοκόλλου διεπαφής.

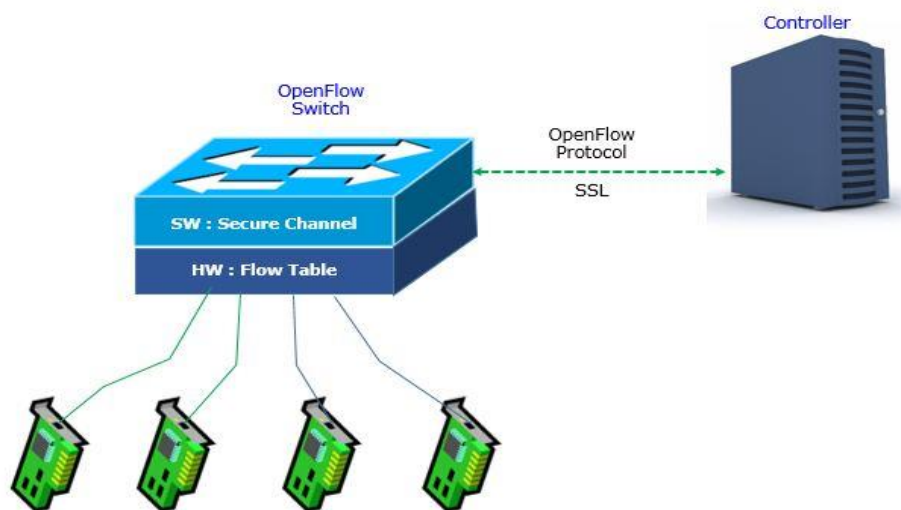
Το ForCES (Forwarding and Control Element Separation) ορίζει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο και τα σχετικά πρωτόκολλα για την τυποποίηση της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου προώθησης σε ένα δίκτυο ForCES (ForCES NE). Σύμφωνα με αυτό υπάρχουν δύο λογικές οντότητες το Στοιχείο Ελέγχου(Control Element CE) και το στοιχείο προώθησης(Forwarding Element FE) που επικοινωνούν μεταξύ τους. Το FE είναι υπεύθυνο να χρησιμοποιεί το διαθέσιμο hardware έτσι ώστε να κάνει τη διαχείριση των πακέτων πληροφοριών, ενώ το CE δίνει τις απαραίτητες εντολές στο πώς να γίνεται αποδοτικά η παραπάνω διαδικασία. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο ακολουθεί το αρχιτεκτονικό μοντέλο master-slave όπου τα FEs είναι οι slaves και τα CEs οι masters. Ένα σημαντικό δομικό στοιχείο είναι το LFB(Logical Function Block), το οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο στα FEs αλλά ελέγχεται από τα CEs μέσω του ForCES πρωτοκόλλου για να επιτυγχάνεται η επίβλεψη της σωστής επεξεργασίας των πακέτων.

Το OpenFlow δημιουργήθηκε μέσω της συνεργασίας που ξεκίνησε το 2008 μεταξύ του Πανεπιστημίου Stanford και του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Μπέρκλεϊ. Το Openflow είναι υπεύθυνο για την σωστή δρομολόγηση και πορεία των δεδομένων μέσα στις συσκευές του δικτύου. Τέτοιες συσκευές είναι:

- **Routers(δρομολογητές):** μπορούν να αποφασίζουν για την πορεία των πακέτων δεδομένων ελέγχοντας την επικεφαλίδα IP, δουλεύοντας στο 3^ο επίπεδο OSI(επίπεδο δικτύου). Μπορούν να λειτουργήσουν ως πύλες εξόδου(gateways) και διαθέτουν πίνακες προώθησης από την είσοδο έως την έξοδο των δεδομένων.
- **Switches(μεταγωγείς):** λειτουργούν στο 2^ο επίπεδο OSI(επίπεδο σύνδεσης δεδομένων) και προωθούν τα πακέτα δεδομένων σύμφωνα με την κεφαλίδα τους. Η συγκεκριμένη προώθηση βασίζεται στους πίνακες προώθησης.
- **Hubs (επαναληπτές):** είναι υπεύθυνες για την σύνδεση όλων των κόμβων του δικτύου με οποιασδήποτε μορφής οπτικό μέσο. Δουλεύουν στο 1^ο επίπεδο OSI (φυσικό στρώμα)

Οι δημιουργοί του OpenFlow πρωτοκόλλου παρατήρησαν πως υπάρχουν ομοιότητες σε ορισμένες βασικές λειτουργίες των routers και των switches και αποφάσισαν να δημιουργηθεί ένας ενιαίος τρόπος διαχείρισης των δεδομένων, τα οποία πλέον έχουν ομαδοποιηθεί σε διάφορες ροές(flows). Η δημιουργία αυτών των ροών καθώς και των πινάκων ροών(flow tables) είναι οι βασικοί λόγοι που το OpenFlow αποτέλεσε τον εξελιγμένο απόγονο του ForCES και που το τελευταίο έπαψε να χρησιμοποιείται. Αυτή η καινοτομία διευκολύνει την χρήση του πρωτοκόλλου ακόμα και σε δίκτυα όπου τα δομικά στοιχεία προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές και μπορεί να μην είναι συμβατά μεταξύ τους.

Ο έλεγχος της δρομολόγησης δεν βρίσκεται μέσα στις συσκευές του δικτύου, αλλά ο έλεγχος συγκεντρώνεται σε μία ή περισσότερες κεντρικές οντότητες τους Ελεγκτές (controllers). Ο ελεγκτής είναι ο «εγκέφαλος» του δικτύου και παρέχει στους διαχειριστές την απαραίτητη διεπαφή για δημιουργία, επεξεργασία και γενικότερα για έλεγχο των πινάκων ροών. Η άμεση επαφή του με τις συσκευές του δικτύου(σε αυτή την αρχιτεκτονική ονομάζονται data plane/data forwarding devices), επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους και τελικά οι συσκευές προώθησης δρομολογούν τα πακέτα πληροφοριών σύμφωνα με τους πίνακες ροής, όπως αυτοί έχουν δημιουργηθεί από τον controller. Έτσι, η δομή του πρωτοκόλλου μπορεί να συνοψιστεί στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 OpenFlow δομή

2 Network Function Virtualization

2.1 Η ανάγκη για Network Function Virtualization

Τα τελευταία χρόνια η αυξημένη κίνηση στο Διαδίκτυο καθώς και ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των κινητών συσκευών που συνδέονται σε αυτό (Smartphones, Tablets) , έχει οδηγήσει τους παρόχους υπηρεσιών να αναζητήσουν νέους τρόπος για να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις. Η αρχική ιδέα ήταν να επενδύσουν αρκετά χρήματα σε νέες αναβαθμισμένες υποδομές (hardware) , οι οποίες θα είναι σε θέση να αντέξουν τον τεράστιο φόρτο εργασίας. Το πρόβλημα όμως είναι πως εκτός από τον νέο εξοπλισμό θα πρέπει να αντιμετωπίσουν τα αυξανόμενα επίσης κόστη ενέργειας καθώς και την απόκτηση νέου εξειδικευμένου προσωπικού που θα μπορεί να σχεδιάσει, κατασκευάσει και θέσει σε λειτουργία hardware με δυνατότητες επεκτασιμότητας ανά πάσα στιγμή και με ελαχιστοποιημένο κόστος.

Αυτή η νέα τάξη πραγμάτων οδήγησε τις AT&T, BT, China Mobile, Deutsche Telekom και αρκετές άλλες εταιρείες τηλεπικοινωνιών, να παρουσιάσουν μία νέα καινοτόμα τεχνολογία που θα έδινε λύση στο υπάρχον πρόβλημα. Έτσι, τον Οκτώβριο του 2012 η αρχιτεκτονική εικονικών δικτύων (Network Function Virtualization- από δω και στο εξής NFV) βγήκε στο προσκήνιο με την υποστήριξη του Ινστιτούτου ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

2.2 Περιγραφή NFV τεχνολογίας και πλεονεκτήματα

Η εξάρτηση των δικτύων από τις υποδομές τους [12] καθώς και από αρκετές λειτουργίες τους όπως τα τείχη προστασίας (firewalls), load balancers, WAN optimization controller κλπ είναι το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι πάροχοι δικτύου όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Επιπροσθέτως, η περιορισμένη διάρκεια ζωής αυτών καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς επιδεινώνει το πρόβλημα και εκτινάσσει τα κόστη συντήρησης. Η τεχνολογία NFV εκμεταλλευόμενη το virtualization διαχωρίζει τις λειτουργίες του δικτύου από το hardware και επιτρέπει στο δίκτυο να ελέγχεται από εφαρμογές που «τρέχουν» σε έναν εμπορικό εξοπλισμό (Off-the-Shelf COTS)

Με αυτόν τον τρόπο οι πάροχοι δικτύων από το να αγοράσουν ακριβό εξοπλισμό (switches, storage, servers) μπορούν να αγοράσουν φθηνότερο για να τρέξουν τις εικονικές τους μηχανές (virtual machines) και έτσι να έχουν στη διάθεσή τους όλες τις λειτουργίες του δικτύου. Σε περίπτωση που ο πελάτης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει μία καινούργια λειτουργία δικτύου μπορεί πολύ απλά να δημιουργήσει ένα καινούργιο virtual machine.

Η τεχνολογία NFV παρουσιάζει μία σειρά από πλεονεκτήματα τα οποία είναι πολύ σημαντικά για την διαχείριση των δικτύων:

- **Εικονοποίηση (Virtualization):** μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πόροι του δικτύου χωρίς να υπάρχει ανησυχία για την τοποθεσία του φυσικού εξοπλισμού, για το είδος του και για τον τρόπο οργάνωσής του.
- **Ενορχήστρωση (Orchestration):** δυνατότητα διαχείρισης πάρα πολλών συσκευών
- **Προγραμματισιμότητα (Programmability):** είναι εφικτό να αλλάζει η λειτουργικότητα άμεσα.
- **Δυναμική Κλιμάκωση (Dynamic Scaling):** είναι σε θέση να αλλάξει μέγεθος και ποσότητα
- **Αυτοματισμός (Automation)**
- **Ορατότητα (Visibility):** μπορεί να γίνεται άμεση παρακολούθηση των πόρων και της συνδεσιμότητας του δικτύου
- **Ενσωμάτωση Υπηρεσιών (Service Integration)**
- **Διαφάνεια**

2.3 SDN και NFV

Είναι συχνό φαινόμενο να συγχέονται οι όροι Software Defined Networks και Network Function Virtualization καθώς και τα δύο έχουν προσφέρουν οφέλη. Όμως, αποσκοπούν να δώσουν λύσεις σε πολύ διαφορετικά προβλήματα και δεν είναι αλληλοεξαρτώμενα. Μπορούν να λειτουργήσουν πολύ αποδοτικά μαζί αλλά η χρήση του ενός δεν προϋποθέτει την χρήση του άλλου.

Πίνακας 1 Διαφορές SDN –NFV

SDN	NFV
Διαχωρίζει control και data plane	Διαχωρίζει τα στοιχεία του δικτύου από το hardware
Προγραμματίζει το control plane	Προγραμματίζει το data plane
Δημιουργήθηκε από την ακαδημαϊκή κοινότητα	Δημιουργήθηκε από τους Παρόχους Υπηρεσιών
Δουλεύει στο 2 ^ο και 3 ^ο επίπεδο OSI	Δουλεύει στο από το 4 ^ο έως το 7 ^ο επίπεδο OSI
Open Networking Foundation (ONF)	European Telecommunication Standards Institute (ETSI)
Απλοποιεί τις λειτουργίες κάνοντας την παραδοχή πως όλο το δίκτυο είναι απλοποιημένο σε ένα μόνο switch για τον προγραμματισμό των εφαρμογών	Απλοποιεί τις διαδικασίες σχεδιασμού, ολοκλήρωσης και συντήρησης της υποδομής του δικτύου σαν να είναι τώρα πολύ τυποποιημένη
<i>“Think of it as a general language or an instruction set that lets me write a control program for the network rather than having to rewrite all of code on each individual router”</i> Scott Shenker, Professor at UC Berkley	<i>“NFV will have a tremendous impact. It means we'll rebuild all telecom networks from how they are built today. When it's done, it will give a major benefit.”</i> Johan Wibergh, Networks Head at Ericsson

Από την μία πλευρά το SDN επικεντρώνεται στην επαναστατική ιδέα προγραμματισιμότητας των συσκευών του δικτύου, ενώ από την άλλη η NFV ασχολείται με την εικονοποίηση,

ενοποίηση και αποτελεσματική επικοινωνία των δικτυακών συσκευών. Παράλληλα, καθώς το SDN υπόσχεται την αυτοματοποίηση, την ενορχήστρωση και τη διαμόρφωση του δικτύου , η NFV στοχεύει να αυτοματοποιήσει την ανάπτυξη και τον έλεγχο των λειτουργιών του δικτύου, οι οποίες εκτελούνται σε κάποια πλατφόρμα εικονικού server.

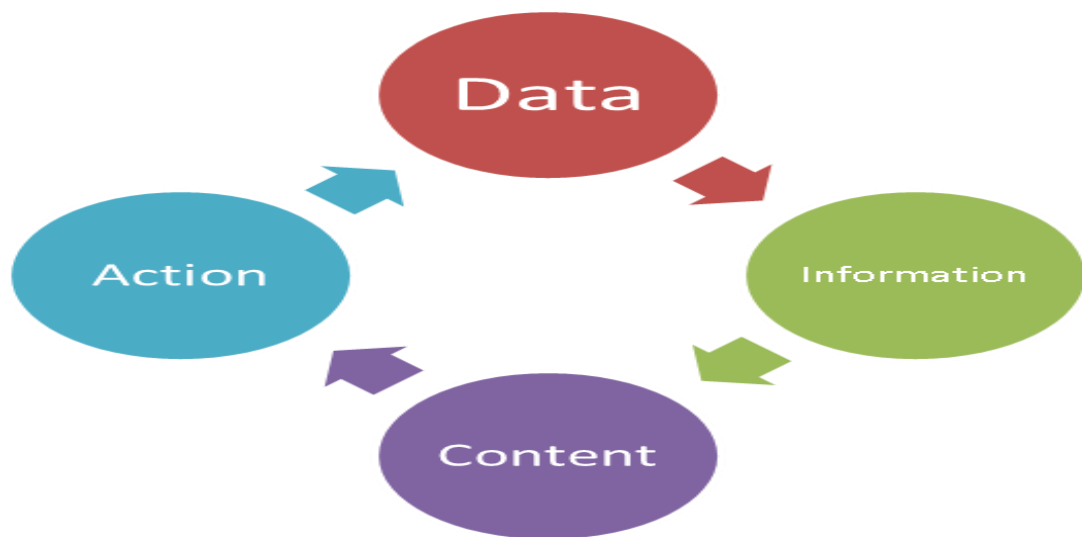
3 Content Delivery Networks

3.1 Η έννοια του περιεχομένου (content)

Ξεκινώντας την αναφορά μας στα Content Delivery Networks(Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου) – από εδώ και στο εξής CDN-, είναι απαραίτητο να επεξηγηθεί η έννοια του περιεχομένου. Είναι συχνό φαινόμενο να συγχέονται οι έννοιες δεδομένα και πληροφορίες με τη σημασία του περιεχόμενου και για αυτό ακολουθεί ο διαχωρισμός τους[\[6\]](#):

- **Δεδομένα (data):** Ως δεδομένα μπορούν να οριστούν οι δυαδικές ακολουθίες από bits που οι υπολογιστές είναι φτιαγμένοι να αντιλαμβάνονται και να επεξεργάζονται. Τα δεδομένα αυτά δεν μπορούν να γίνουν κατανοητά από τον άνθρωπο καθώς δεν έχουν καμία ανθρώπινη σημασία.
- **Πληροφορίες (information):** Η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων από τα υπολογιστικά συστήματα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πληροφοριών, δηλαδή μιας σειράς από ακολουθίες που μπορούν να κατανοηθούν από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Οι πληροφορίες μπορεί να έχουν είτε την μορφή κειμένου είτε την μορφή πολυμέσου (εικόνας , βίντεο).
- **Περιεχόμενο (content):** Στις μέρες μας γίνεται όλο και περισσότερο χρήση της λέξης περιεχόμενο. Η έννοια του περιεχομένου δεν περιλαμβάνει τίποτα περισσότερο από πληροφορίες σε συνδυασμό με κάποια επιπλέον δεδομένα τα οποία ονομάζονται metadata. Ο περιορισμός των υπολογιστικών συστημάτων να αντιλαμβάνονται και επεξεργάζονται δεδομένα μας οδηγεί στην ανάγκη δημιουργίας εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης του περιεχομένου.

Στην Εικόνα 4 γίνεται είναι φανερή η σχέση μεταξύ αυτών των εννοιών. Συγκεκριμένα, φαίνεται πως οι πληροφορίες αποτελούνται από δεδομένα και μαζί δημιουργούν το περιεχόμενο πάνω στο οποίο ο άνθρωπος μπορεί να επέμβει με διάφορες ενέργειες (επεξεργασία, εκτύπωση κλπ)



Εικόνα 4 Σχέση Data-Information-Content

3.2 Η ανάγκη για CDN

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση του παγκόσμιου ιστού [7] και η εκτεταμένη χρήση του από μια ολοένα και μεγαλύτερη βάση χρηστών είχε ως αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια συγκεκριμένες ιστοσελίδες να παρουσιάσουν μία πολύ μεγάλη ζήτηση που δεν ήταν σε θέση να υποστηρίξουν. Το πρόβλημα εμφανίστηκε αρχικά σε ιστοσελίδες όπως οι μηχανές αναζήτησης και δημοσιογραφικές σελίδες. Η δημιουργία των smartphones και γενικότερα η εξέλιξη της τεχνολογίας επέτρεψε στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο οποιαδήποτε στιγμή από πολλές διαφορετικές ηλεκτρονικές συσκευές και να συνεισφέρουν και οι ίδιοι στην τεράστια παγκόσμια «αποθήκη» πληροφοριών. Επιπλέον, η χρήση πολυμέσων ενέτεινε το πρόβλημα καθώς πλέον η ανάγκη σε πόρους ήταν πολύ μεγάλη. Συνήθως, οι ιστοσελίδες στην πιο απλή τους μορφή είναι στατικές που σημαίνει ότι είναι αρχεία αποθηκευμένα στη μνήμη κάποιου εξυπηρετητή και περιμένουν απλά κάποιος να τα ανακτήσει. Αυτό έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια με την ευρεία χρήση ιστοσελίδων με δυναμικό δεδομένα. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα δεδομένα δημιουργούνται έπειτα από αίτηση του χρήστη και η διαδικασία αυτή μπορεί να υλοποιείται είτε στον πελάτη είτε στον εξυπηρετητή.

Η κλασσική αρχιτεκτονική των δικτύων και αυτή που πάνω της βασίστηκαν όλες οι μορφές δικτύων είναι αυτή του πελάτη-εξυπηρετητή(client-server). Αυτό σημαίνει ότι ο client κάθε φορά που επιθυμεί να ανακτήσει κάποιο περιεχόμενο στέλνει ένα αίτημα στον server-ο οποίος μπορεί να βρίσκεται πολύ μακριά – και περιμένει έως ότου ο server να βρει και να αποστείλει τα δεδομένα που έχει αποθηκευμένα σε κάποια θέση μνήμης. Αυτή η αναζήτηση περιορίζεται από τον αριθμό προσπελάσεων της μνήμης που μπορεί να υποστηρίξει ο εξυπηρετητής. Έτσι λοιπόν, η έλλειψη κατάλληλου και επαρκούς εξοπλισμού είχε ως αποτέλεσμα την συμφόρηση των δικτύων(bottlenecks), την αλλοίωση ή απώλεια δεδομένων και συνεπώς την μείωση του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών.

Η πρώτη ιδέα αντιμετώπισης της παραπάνω κατάστασης ήταν να χρησιμοποιηθούν καλύτερες υποδομές δικτύου όπως και περισσότεροι διακομιστές. Μια τέτοια λύση φαινόταν ρεαλιστική αλλά δεν ήταν τεχνοοικονομικά βιώσιμη συν το γεγονός πως δεν είχαν εμφανιστεί ακόμα τα VNFs αποτελούσε ανασταλτικό παράγοντα στην επιτυχημένη εξυπηρέτηση των αιτημάτων.

3.3 CDN - Ορισμός και αρχές λειτουργίας

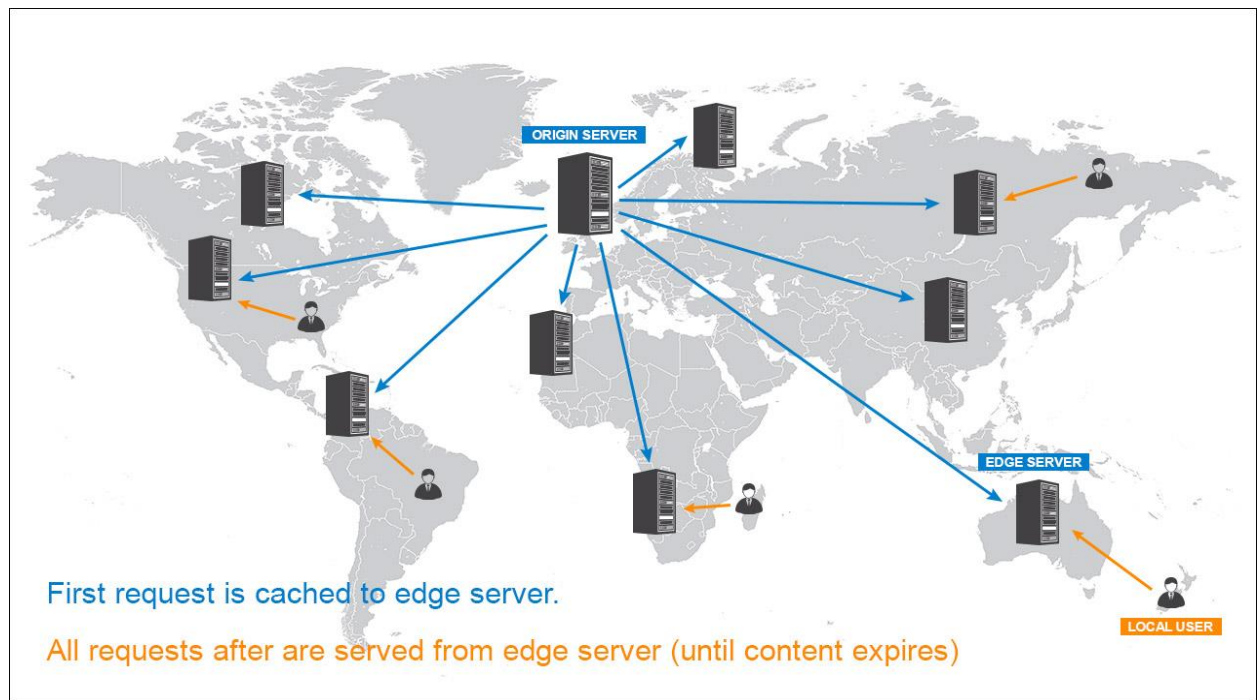
Για να αντισταθμιστούν τα προηγούμενα προβλήματα τα δίκτυα διανομής περιεχομένου εγκαινίασαν μια νέας μορφής δρομολόγησης των δεδομένων. Τα CDNs εκμεταλλεύονται την χρονική τοπικότητα (locality on time), χρησιμοποιούν δηλαδή την παραδοχή πως το περιεχόμενο που ανακτήθηκε πρόσφατα έχει τις περισσότερες πιθανότητες να ανακτηθεί ξανά σε μικρό χρονικό διάστημα. Ακόμη, βασικό στοιχείο είναι η δημιουργία αντιγράφων των δεδομένων σε αποθηκευτικούς σταθμούς (κόμβους) που βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στους χρήστες. Με την χρήση αυτών των λειτουργιών το δίκτυο μειώνει αισθητά τις πιθανότητες bottleneck και μεταφέρει την κίνηση στην περιφέρεια.

Ένα CDN αποτελείται από ένα συνδυασμό υποδομών [\[8\]](#) που υποστηρίζουν μεταφορά περιεχομένου, αναζήτηση και δρομολόγηση πακέτων πληροφοριών, κατανομή περιεχομένου καθώς και κάποιου είδους λογιστικής λειτουργίας. Ακολουθεί η ακριβής σημασία και ο διαχωρισμός αυτών των λειτουργιών:

- **Μεταφορά περιεχομένου:** Η υποδομή ενός CDN αποτελείται από ένα σύνολο τελικών/υποκατάστατων server (οι οποίοι ονομάζονται επίσης και surrogates) που είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά αντιγράφων του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες.
- **Αναζήτηση και δρομολόγηση πληροφοριών:** Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου καθώς ανακατευθύνει τα αιτήματα των χρηστών στον πιο κατάλληλο εξυπηρετητή, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς παράκαμψης της συμφόρησης και ξεπερνώντας πιθανά flash crowds ή SlashDot φαινόμενα, ενώ την ίδια στιγμή επικοινωνεί με το τμήμα κατανομής περιεχομένου για να υπάρχει ανά πάσα στιγμή μία επαρκώς ενημερωμένη εικόνα των περιεχομένων που είναι αποθηκευμένα στην cache μνήμη των servers.
- **Κατανομή περιεχομένου:** Αυτό το κομμάτι είναι υπεύθυνο για την μεταφορά του περιεχομένου από τον κεντρικό server στους τελικούς servers και για τον έλεγχο της ακεραιότητας του περιεχομένου στις μνήμες cache.
- **Υπηρεσίες διαχείρισης:** Σε αυτό το σημείο διατηρείται ο αριθμός και τα στοιχεία των προσβάσεων των χρηστών και υπολογίζεται η συνολική χρήση του κάθε server του δικτύου. Αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες για ανίχνευση της κυκλοφορίας του δικτύου καθώς και για πιθανή χρέωση του πελάτη βάσει χρήσης.

Τα στοιχεία των CDNs έχουν την ικανότητα να λειτουργούν σε ομογενή αλλά και ανομοιογενή περιβάλλοντα, και για αυτό τα δίκτυα παροχής υπηρεσιών έχουν πολλαπλές μορφές και δομές. Μπορούν να είναι κεντριοποιημένα, αποκεντρωμένα είτε ιεραρχικά δίκτυα που υπακούουν σε κάποιον controller. Παρ' όλα αυτά κάθε δίκτυο τέτοια μορφής υποστηρίζει τις προαναφερόμενες λειτουργίες.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η ανακατεύθυνση DNS ή λιγότερες φορές ανακατεύθυνση HTTP και επανεγγραφή των URLs για την ανακατεύθυνση των αιτημάτων. Όλη αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα δίχως να γίνει αντιληπτή από τον χρήστη, που δεν χρειάζεται να κάνει καμία ρύθμιση όπως θα συνέβαινε με τους δικτυακούς διακομιστές μεσολάβησης (web proxies).



Εικόνα 5 Διανομή με την χρήση CDN[9]

3.4 Μηχανισμοί ανακατεύθυνσης

Για να αναφερθούν οι υπάρχοντες μηχανισμοί ανακατεύθυνσης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα παροχής περιεχομένου, είναι απαραίτητο πρώτα να γίνει μία αναφορά στην διαδικασία που λαμβάνει χώρα όταν ένας τερματικός σταθμός απαιτήσει μία πληροφορία μέσα από κάποια αναζήτηση στον φυλλομετρητή που όπως είναι γνωστόν αντιστοιχίζεται σε κάποια διεύθυνση URL. Αρχικά, [10] διαχωρίζεται το όνομα του σταθμού από τη διεύθυνση URL και σκοπός είναι η μετάφρασή του σε κάποια διεύθυνση IP. Ο εξυπηρετητής DNS που βρίσκεται στον server είναι υπεύθυνος για να κάνει αυτή την μετάφραση και στη συνέχεια να αναζητήσει στους ενδιάμεσους εξυπηρετητές DNS που βρίσκεται το ζητούμενο περιεχόμενο για να γίνει αντιστοιχία με την κατάλληλη διεύθυνση IP. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία ο πελάτης μέσω του φυλλομετρητή του εγκαθιδρύει μία TCP σύνδεση στέλνοντας τα πρώτα πακέτα. Εάν όλα πάνε καλά και δεν χαθούν ή καταστραφούν τα πακέτα η σύνδεση εγκαθιδρύεται και πλέον ο πελάτης μπορεί να στείλει αιτήματα HTTP που περιέχουν την ακριβή διεύθυνση της πληροφορίας που αναζητά. Εάν ο εξυπηρετητής HTTP έχει το αρχείο το στέλνει και η σύνδεση TCP τερματίζεται.

Η καινοτομία που προσφέρουν τα Δίκτυα διανομής περιεχομένου είναι η τοποθέτηση ενός αναδιανομέα είτε στον εξυπηρετητή περιεχομένου(αναδιανομή HTTP), είτε στον DNS εξυπηρετητή (αναδιανομή DNS) ή στο δρομολογητή του εξυπηρετητή περιεχομένου (μέθοδος Handoff).

- **Αναδιανομή μέσω HTTP:** Όταν ο χρήστης κάνει αίτηση για την ανάκτηση ενός αρχείου στέλνει το αντίστοιχο URL με το όνομα του εξυπηρετητή και την ακριβή θέση του αρχείου. Στην αναδιανομή HTTP ο εξυπηρετητής ,πέρα από το να επιτρέψει το αρχείο στον χρήστη, έχει τη δυνατότητα να απαντήσει με κάποιο άλλο URL και να ανακατευθύνει την αίτηση σε κάποιον άλλο εξυπηρετητή που περιέχει αντίγραφο του επιθυμητού αρχείου. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου αναδιανομής είναι πως είναι πολύ εύκολα υλοποιήσιμη αλλά το γεγονός πως όλες οι αιτήσεις πρέπει να περάσουν από τον κεντρικό εξυπηρετητή την καθιστά λιγότερο ελκυστική. Επίσης, ένα ακόμα τρωτό σημείο της είναι η έλλειψη «διαφάνειας», αφού η ανακατεύθυνση είναι εμφανή στον χρήστη μέσω της γραμμής διεύθυνσης του browser.
- **Αναδιανομή μέσω DNS:** Το DNS είναι υπεύθυνο για την μετάφραση ονομάτων σε IP διευθύνσεις χρησιμοποιώντας ένα δικό του πρωτόκολλο για την ανταλλαγή των πληροφοριών. Μόλις ο χρήστης στείλει ένα αίτημα επικοινωνίας με κάποιον εξυπηρετητή , δηλαδή μόλις γράψει στην γραμμή διεύθυνσης του browser το όνομα του εξυπηρετητή, αυτό που συμβαίνει είναι ότι ο τοπικός εξυπηρετητής DNS προσπαθεί να μεταφράσει το όνομα σε κάποια διεύθυνση IP . Εάν βρεθεί η πληροφορία στην cache του στέλνει την ζητούμενη πληροφορία αλλιώς στέλνει αιτήματα σε άλλους εξυπηρετητές για να βρεθεί η επιθυμητή πληροφορία. Αυτό γίνεται είτε μέσω της επαναλαμβανόμενης μεθόδου όπου θα στέλνονται συνεχώς ερωτήματα σε διαφορετικούς εξυπηρετητές μέχρι να βρεθεί ποιος διαθέτει την πληροφορία είτε μέσω της αναδρομικής μεθόδου όπου η αίτηση μεταβιβάζεται σε ένα ενδιάμεσο εξυπηρετητή που είναι υπεύθυνος για να βρει τον τερματικό εξυπηρετητή ονοματολογίας που εξυπηρετεί την ζώνη, η ερώτηση αποτιμάται, αποθηκεύεται στην cache και τελικά στέλνεται στον αιτών. Τα πλεονεκτήματα αυτής της αναδιανομής είναι η διαφάνεια ως προς τον χρήστη, η δυνατότητα πρόσβασης σε πολλά αντίγραφα που αυξάνει την αξιοπιστία και επιτρέπει την αποθήκευση

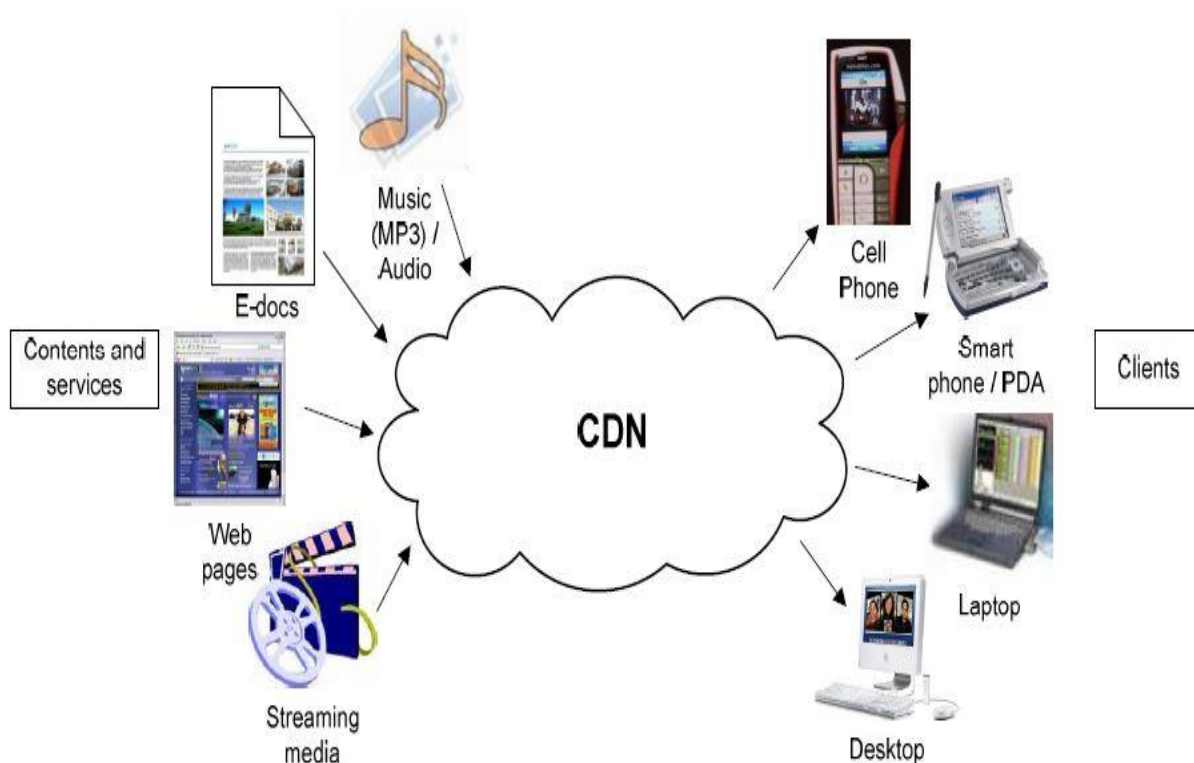
πολλαπλών αιτήσεων τοπικά στον πελάτη και τέλος η ευκολία συντήρησής του. Τα μειονεκτήματά της είναι πως ο τερματικός εξυπηρετητής δεν γνωρίζει την ακριβή θέση του πελάτη, αφού το αίτημα του στάλθηκε από έναν ενδιάμεσο εξυπηρετητή, η προσωρινή αποθήκευση στον τοπικό εξυπηρετητή DNS που έχει διάρκεια ίση με το TT (Time To Live). Γενικά όμως, αυτή η ανακατεύθυνση προτιμάται στα CDNs επειδή διαθέτουν αντικείμενα πληροφορίας μέσω HTTP και δεν χρησιμοποιούνται διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς.

- **TCP Handoff:** Το TCP είναι ένα stream πρωτόκολλο και μερικές φορές ονομάζεται TCP/IP λόγω της στενής του σχέσης με το IP. Όλες οι πληροφορίες που στέλνονται με την χρήση αυτού του πρωτοκόλλου αποτελούνται από κομμάτια (segments). Το κάθε segment έχει μία επικεφαλίδα με τις πληροφορίες του τερματικού εξυπηρετητή και τον φόρτο (payload). Μέσω της χρήσης του IP spoofing (μέθοδος που αλλάζει την κεφαλίδα ανακατευθύνοντας την αίτηση στον επιθυμητό εξυπηρετητή και συνήθως χρησιμοποιείται για κακοπροαίρετες προθέσεις) την θέση του τερματικού σταθμού την παίρνει ένα CDN το οποίο θα στείλει και την απάντηση στον πελάτη ξεγελώντας τον. Η μέθοδος TCP Handoff είναι διαφανής για τον χρήστη αλλά απαιτεί ειδικές ρυθμίσεις στο δίκτυο, δεν είναι ευέλικτη για πολλές αιτήσεις και δεν υπάρχουν περισσότερες από μία τοποθεσία αντιγράφων.

3.5 Ο κόσμος των CDNs

Ένας πάροχος περιεχομένου(πελάτης) μπορεί να υπογράψει κάποιο συμβόλαιο με έναν CDN πάροχο και έτσι να έχει το περιεχόμενό του τοποθετημένο στους servers του δικτύου. Αντίγραφα του περιεχομένου μπορεί να δημιουργούνται είτε κατά απαίτηση όταν υπάρχει το σχετικό request από ένα χρήστη, είτε μπορούν να έχουν δημιουργηθεί πρωτίστως τοποθετώντας το περιεχόμενο στους surrogate servers. Ο χρήστης έπειτα από κάθε αίτησή του επικοινωνεί δίχως να το αντιλαμβάνεται με τον κοντινότερο, διαθέσιμο server, από όπου και ανακτά το περιεχόμενο που αναζητά.

Οι CDN πάροχοι εγγυούνται την γρήγορη και άμεση μεταφορά οποιουδήποτε ψηφιακού περιεχομένου. Τέτοιο ψηφιακό περιεχόμενο μπορεί να είναι στατικό περιεχόμενο (εικόνες, έγγραφα κλπ), steaming πολυμέσα (real-time βίντεο, αρχεία ήχου), και πολλές άλλες υπηρεσίες περιεχομένου(υπηρεσία μεταφοράς αρχείων, υπηρεσία φακέλων κλπ). Συνήθως, πιο συχνοί πελάτες για ένα CDN είναι διαφημιστικές εταιρίες, κέντρα δεδομένων, πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Service Providers)- ή αλλιώς ISPs, φορείς κινητής επικοινωνίας, κατασκευαστές αναλώσιμων ηλεκτρονικών συσκευών και άλλες εταιρίες μεταφορών. Καθένας από αυτούς τους πελάτες επιθυμεί να διαφημίσει και να διανέμει το περιεχόμενό του στους τελικούς χρήστες μέσω του διαδικτύου με ένα αξιόπιστο και άμεσο τρόπο. Οι τελικοί χρήστες αλληλεπιδρούν με το CDN χρησιμοποιώντας Smartphones, tablets, laptops και desktops.



Εικόνα 6 Υποστηριζόμενες υπηρεσίες CDN [8]

Το κόστος χρήσης ενός CDN είναι αρκετά υψηλό και συνήθως δεν μπορεί να υποστηριχθεί από μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις ή από μη-κερδοσκοπικούς οργανισμούς. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή των υπηρεσιών ενός CDN περιλαμβάνουν:

- κόστος εύρους ζώνης (bandwidth)
- διακύμανση της κατανομής της κυκλοφορίας
- ο αριθμός των αντιγράφων του περιεχομένου στους surrogate servers
- ο αριθμός των surrogate servers
- υπηρεσίας σταθερότητας και αξιοπιστίας ολόκληρου του συστήματος και γενικότερα θέματα ασφάλειας που προκύπτουν.

Ο βασικός και κύριος στόχος των CDNs είναι να παρέχουν QoS στους τελικούς χρήστες κατά την ανάκτηση του περιεχομένου. Η βασικοί στόχοι σήμερα ενός CDN είναι να καταφέρει να πετύχει κατ' ελάχιστο επεκτασιμότητα, ασφάλεια, αξιοπιστία, άμεση και ικανοποιητική ανταπόκριση και υψηλή απόδοση.

3.6 Κατηγορίες CDN

Παγκοσμίως έχουν επικρατήσει δύο βασικές αρχιτεκτονικές για τα CDNs [\[11\]](#). Η αρχιτεκτονική πελατη-εξυπηρετητή (Client – Server Architecture) και η ομότιμη αρχιτεκτονική (Peer-to-Peer Architecture). Η κάθε μία από αυτές αποτελεί το θεμέλιο των δύο πιο δημοφιλών κατηγοριών CDN. Πάνω στην client-server αρχιτεκτονική έχουν βασιστεί τα Εμπορικά Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (Commercial CDN) τα οποία είναι και τα πιο διαδομένα , ενώ με την χρήση της ομότιμης αρχιτεκτονικής χτίστηκαν τα Ακαδημαϊκά Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (Academic CDN).

Ορισμένες από τις επιχειρήσεις οι οποίες έχουν αναπτύξει Commercial CDNs μόνες τους αρνούνται τη συνεργασία με άλλες αντίστοιχες για να μεταφέρουν το περιεχόμενο στους τελικούς χρήστες πιο αποδοτικά. Αυτό έχει ως συνέπεια οι πελάτες να μην έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τις υποδομές άλλων CDNs πέρα από εκείνο με το οποίο έχουν τη συνεργασία και έτσι δημιουργούνται τα λεγόμενα δικτυακά νησιά που δεν έχουν μεταξύ τους επικοινωνία. Παρ' όλα αυτά πολλές άλλες επιχειρήσεις έχουν κατανοήσει τη σημαντικότητα μίας τέτοια συνεργασίας και έχουν οδηγηθεί σε συμφωνίες όπου χρησιμοποιούν παράλληλα χιλιάδες εξυπηρετητές σε όλο τον κόσμο. Κάποιες από τις πιο γνωστές επιχειρήσεις που προσφέρουν Εμπορικά Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου είναι η Akamai και η EdgeStream.

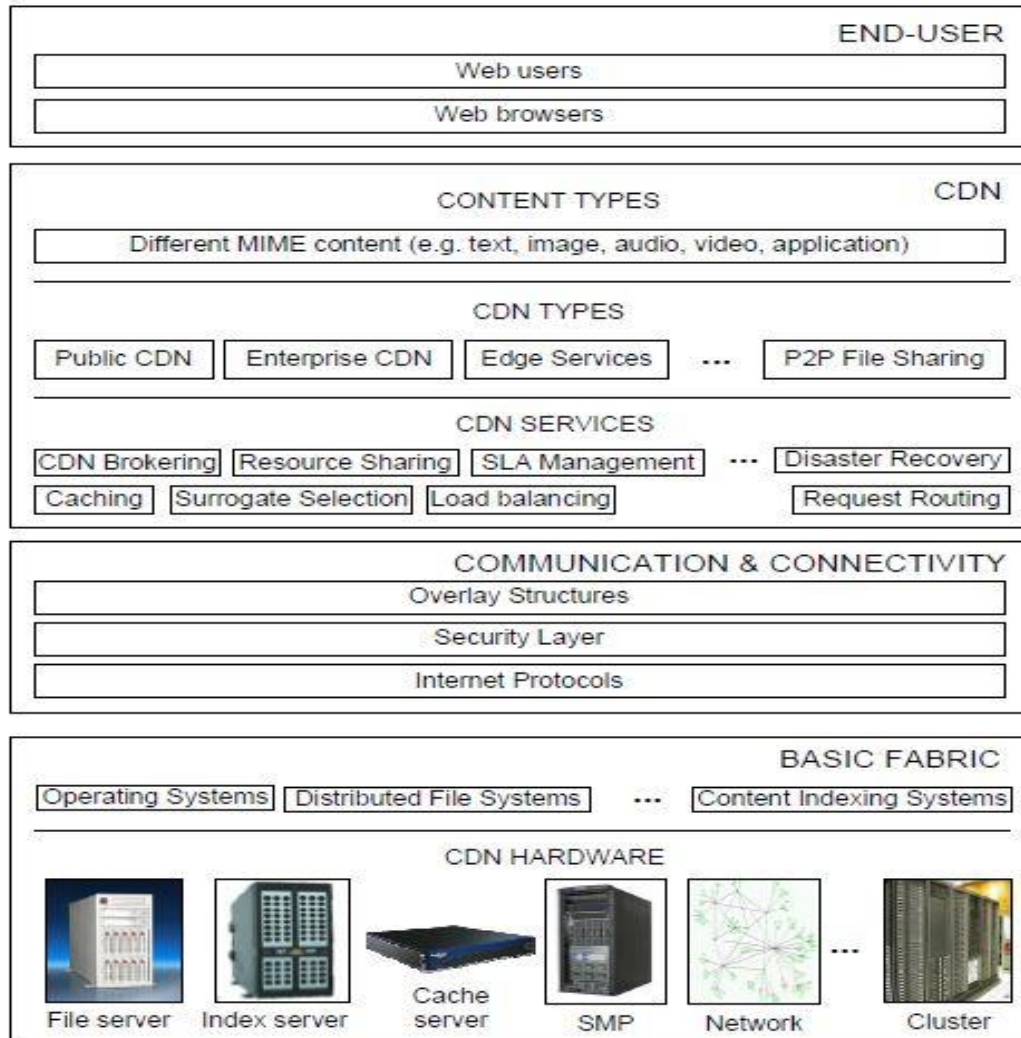
Σε αντίθεση με τα Εμπορικά CDNs τα ακαδημαϊκά χρησιμοποιούν μία πιο αποκεντριοποιημένη προσέγγιση για να είναι πιο εύκολη η αντιμετώπιση σφαλμάτων κατά την διάρκεια μεταφοράς του περιεχομένου μεταξύ των κόμβων. Τα Ακαδημαϊκά Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου έχουν το μειονέκτημα πως δεν μπορούν να διαχειριστούν δυναμικά πολυμέσα, τα οποία μεταβάλλονται συνεχώς. Η CoDeeN, Coral και Globule αποτελούν παραδείγματα αυτής της κατηγορίας.

3.7 Αρχιτεκτονική Στρωμάτων

Η αρχιτεκτονική των Δικτύων Διανομής Περιεχομένου μπορεί να περιγραφεί με την προσέγγιση στρωμάτων όπως και στο πρότυπο OSI. Τα CDNs, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7, αποτελούνται από τα εξής επίπεδα: βασικό επίπεδο, επίπεδο επικοινωνίας και σύνδεσης, επίπεδο δικτύου διανομής περιεχομένου και τέλος το επίπεδο τελικού χρήστη.

- **Βασική υποδομή:** περιλαμβάνει το υλικό που είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το υλικό μπορεί να περιλαμβάνει clusters, file servers κλπ. Σε αυτό το επίπεδο όμως ανήκει και το λογισμικό που τρέχει το παραπάνω hardware.
- **Επίπεδο Επικοινωνίας και σύνδεσης:** σε αυτό το επίπεδο ανήκουν όλα τα πρωτόκολλα δικτύου που χρησιμοποιούνται (TCP/UDP, FTP) καθώς επίσης και πιο συγκεκριμένα πρωτόκολλα όπως Internet Cache Protocol (ICP), Hypertext Caching Protocol (HTCP) και πρωτόκολλα ασφαλείας όπως Secure Sockets Layer (SSL).
- **Επίπεδο Δικτύου Διανομής Περιεχομένου:** περιέχει όλες τις βασικές λειτουργίες του CDN. Μπορεί να χωριστεί σε τρία υποστρώματα:
 1. Υπηρεσίες CDN,
 2. Κατηγορίες δικτύων και
 3. κατηγορίες περιεχομένου

- **Επίπεδο Τελικού Χρήστη:** Οι τελικοί χρήστες βρίσκονται στην κορυφή της αρχιτεκτονικής και είναι οι χρήστες που συνδέονται στο CDN δίκτυο δίνοντας μια URL διεύθυνση στη γραμμή αναζήτησης του φυλλομετρητή τους.



Εικόνα 7 Αρχιτεκτονική CDN

3.8 Η περίπτωση Akamai Technologies.



Το όνομα Akamai είναι μία χαβανέζικη λέξη που σημαίνει εφυής/έξυπνος. Η Akamai [\[19\]](#) είναι ένας αμερικάνικος CDN πάροχος που εδρεύει στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Διαθέτοντας περισσότερους από 216.000 εξυπηρετητές τοποθετημένους σε περισσότερα από 1.500 δίκτυα σε 120 χώρες, λαμβάνει καθημερινώς περισσότερα από 100 δισεκατομμύρια αιτήματα. Η εταιρεία υιοθέτησε την ιδέα της διανομής περιεχομένου το 1998 και μαζί με την έκρηξη χρήσης των πολυμέσων έφτασε να εξυπηρετεί το 30 τοις εκατό της παγκόσμιας διαδικτυακής κυκλοφορίας. Πελάτες της αυτά τα χρόνια υπήρξαν μεγάλες εταιρείες όπως οι Apple, Facebook, Bing ,Twitter, eBay, Google και LinkedIn.

4 Δίκτυα και Πολυμέσα

4.1 Πολυμέσα (multimedia)

Υπάρχει πληθώρα ορισμών που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για να περιγράψουν την έννοια των πολυμέσων και συνδέονται με την οπτική γωνία που τα βλέπει κάποιος. Διαφορετικά αντιλαμβάνεται την έννοια ένας ερευνητής και αλλιώς ένας τελικός χρήστης. Ένας αρκετά ολοκληρωμένος ορισμός δόθηκε από τον Tannenbaum το 1998 και τα περιγράφει ως εξής:

“Πολυμέσα στον χώρο της Τεχνολογίας Πληροφορίας (information field), σημαίνει “πολλαπλοί μεσολαβητές”, μεταξύ της πηγής και του παραλήπτη της πληροφορίας ή “πολλαπλά μέσα”, μέσω των οποίων η πληροφορία αποθηκεύεται, μεταδίδεται, παρουσιάζεται ή γίνεται αντιληπτή.”

Ως μέσα (media) μπορούν να θεωρηθούν διάφορες μορφές δεδομένων όπως κείμενο, γραφικά, εικόνες, κινούμενες εικόνες (animation), βίντεο και ήχος. Οι εφαρμογές που διαχειρίζονται περισσότερα από ένα μέσα επικοινωνίας ονομάζεται πολυμεσικές και αποτελούν ένα συνεχώς εξελισσόμενο τμήμα της πληροφορικής.

Η βασική ιδιότητα των πολυμεσικών εφαρμογών (multimedia applications) είναι η αλληλεπιδραστικότητα, που σημαίνει ότι ο χρήστης πρέπει να έχει την δυνατότητα να αλληλεπιδρά με την εφαρμογή επιλέγοντας την ταχύτητα, την μορφή και να παρεμβαίνει στη ροή της πληροφορίας μέσω ενός περιβάλλοντος διεπαφής. Η ιδιότητα αυτή προέκυψε από τα βιντεοπαιχνίδια τα οποία αποδείχθηκε ότι είναι αρκετά πιο διασκεδαστικά και ενδιαφέροντα όταν ο παίκτης μπορεί να αλληλεπιδράσει με το σύστημα σε πραγματικό χρόνο οποιαδήποτε στιγμή. Η ίδια παρατήρηση υπάρχει και για το εκπαιδευτικό υλικό, το οποίο έχει την ικανότητα να γίνεται ευκολότερα αντιληπτό από τους μαθητές όταν υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία και οι εκπαιδευόμενοι μπορούν να επηρεάσουν την ροή του μαθήματος.

4.2 Δικτύωση Πολυμέσων

Μαζί με την εκρηκτική ανάπτυξη των πολυμέσων [\[15\]](#) , την συνεχή βελτιστοποίηση της ποιότητας βίντεο και των πολυμεσικών πόρων δημιουργήθηκε η ανάγκη για την δικτύωσή τους (multimedia networking). Με τη βοήθεια των τηλεπικοινωνιών και των εξελιγμένων πλέον πολυμεσικών υπολογιστών οι χρήστες μπορούν να στέλνουν να λαμβάνουν και γενικά να μοιράζονται οποιαδήποτε πολυμεσική πληροφορία ακόμη και σε πραγματικό χρόνο.

Υπάρχουν αρκετά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα δίκτυα πολυμέσων από την παραδοσιακή δικτύωση.

4.2.1 Τεχνολογία Ροής (Streaming)

Η τεχνολογία streaming επινοήθηκε με στόχο να υπάρξει η δυνατότητα παρακολούθησης βίντεο δίχως ο χρήστης να περιμένει έως ολόκληρο το βίντεο να παραληφθεί και μετά να γίνει η αναπαραγωγή του. Το streaming επέτρεψε την συμπίεση του ψηφιακού βίντεο μέσω δικτύων και έτσι την ευκολότερη διανομή του μέσα στο δίκτυο. Τα βήματα που πρέπει να γίνουν πλέον είναι η καταγραφή του βίντεο σε ψηφιακή μορφή από τον αποστολέα (είναι σε αναλογική μορφή και στη συνέχεια να γίνει η ψηφιοποίησή του), η συμπίεση του με χρήση των ανάλογων αλγορίθμων (codecs), η αποστολή του στον server ο οποίος και θα τεμαχίσει το υλικό σε πακέτα για το διανείμει μέσα στο δίκτυο και τέλος η παραλαβή των πακέτων από τους τελικούς παραλήπτες πάντα με την χρήση των απαραίτητων πρωτοκόλλων ασφαλείας. Η σειρά με την οποία καταφθάνουν τα πακέτα ονομάζεται ροή και η αναπαραγωγή του βίντεο ξεκινάει με την παραλαβή του πρώτου πακέτου.

Γίνεται διαχωρισμός της πολυμεσικής ροής [\[16\]](#) σε πραγματικού χρόνου (real-time transmission) και κατ'απαίτηση (of-demand material streaming):

- Η **ροή πραγματικού χρόνου** χρησιμοποιείται κυρίως για την απευθείας μετάδοση κάποιου γεγονότος ή την άμεση επικοινωνία. Είναι απαραίτητο λοιπόν η μετάδοση του

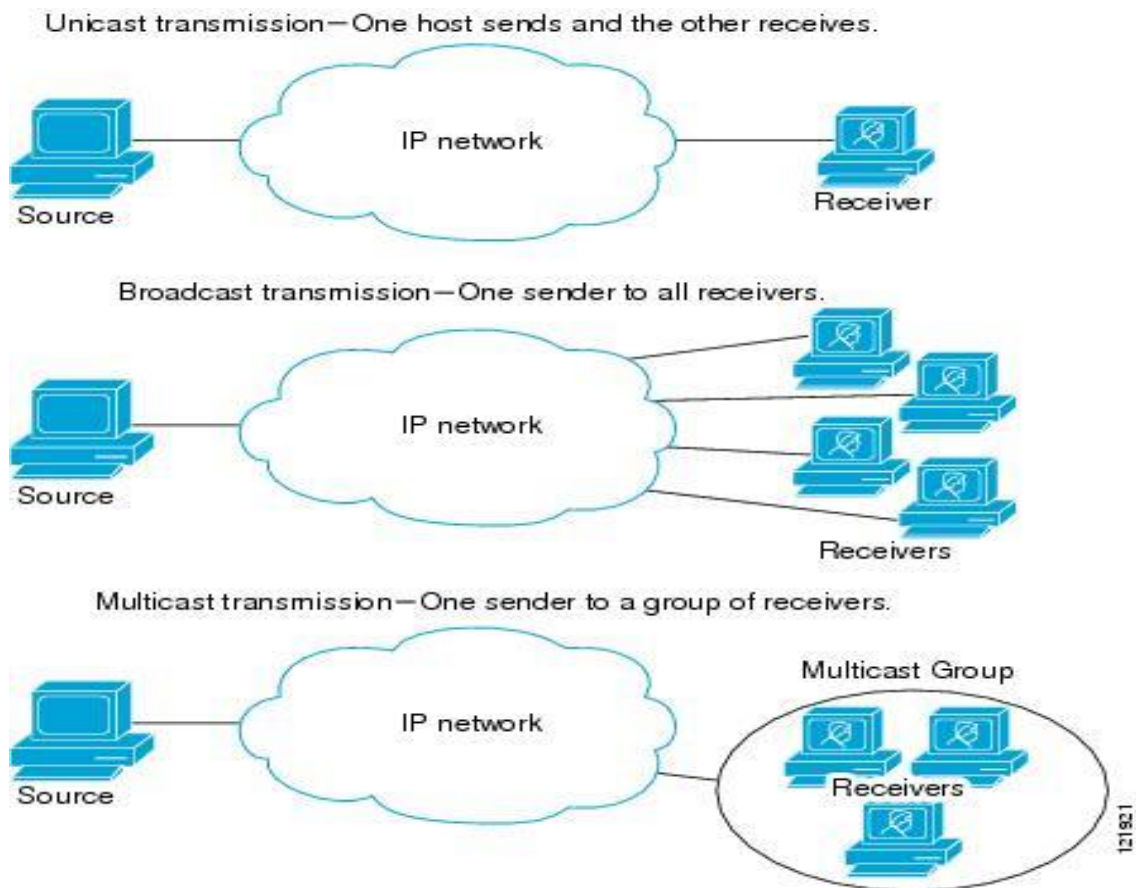
ήχου και του βίντεο να είναι συνεχής και οι καθυστερήσεις να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Οι καθυστερήσεις σε μεταδόσεις πραγματικού χρόνου είναι ένα συνηθές φαινόμενο και η διακύμανση τους ονομάζεται jitter. Σε περίπτωση που κάποιο πακέτο πληροφορίας χαθεί υπάρχει η πιθανότητα επανεκπομπής του, γεγονός που θα δημιουργήσει συμφόρηση στο δίκτυο. Λόγω του γεγονότος ότι ο βασικός στόχος της ροής πραγματικού χρόνου είναι η ταχύτητα αποστολής πακέτων να είναι ίση με την ταχύτητα παραλαβής τους την κάνει να εξαρτάται άρρηκτα από το εύρος ζώνης τους δικτύου. Ένα αρκετά συχνό φαινόμενο είναι ορισμένοι χρήστες να αδυνατούν να παρακολουθήσουν υλικό σε ροή πραγματικού χρόνου. Αυτό συμβαίνει διότι τα ειδικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται πολλές φορές αντιμετωπίζουν προβλήματα με τα τείχη ασφαλείας.

- Η **ροή κατ'απαίτηση** ή διαφορετικά μέθοδος progressive streaming είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Τα πακέτα πληροφορίας που στέλνονται από τον αποστολέα αποθηκεύονται στον παραλήπτη και έτσι σχηματίζεται σιγά-σιγά το αρχικό αρχείο. Έτσι, οποιαδήποτε στιγμή ο παραλήπτης έχει την δυνατότητα να ξαναπαρακολουθήσει το βίντεο καθώς η πληροφορία δεν χάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρακολούθηση υψηλής ποιότητας βίντεο ανά πάσα στιγμή όμως αρκετές φορές ο παραλήπτης πρέπει να περιμένει μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι την παραλαβή ολόκληρου του αρχείου και επίσης είναι ευκολότερο να παραβιαστεί η πνευματική ιδιοκτησία μέσω την αντιγραφής και αποστολής ολόκληρου του αρχείου.

4.2.2 Τρόπος Εκπομπής

- **Multicast:** Το μοντέλο αυτό ομαδοποιεί τους χρήστες που επιθυμούν να λάβουν το ίδιο υλικό μέσω της χρήσης δρομολογητών πολυεκπομπής αποσυνδέεται ο κεντρικός server από τους χρήστες και στέλνει μόνο μία ροή δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο ακόμα και αν συνδεθούν επιπλέον χρήστες ο φόρτος δεν αυξάνεται. Το multicast χρησιμοποιεί το Internet Group Management Protocol (IGMP) για να διαχωρίσει τις ομάδες χρηστών και τα μέλη κάθε ομάδας. Το ίδιο το πρωτόκολλο χρησιμοποιούν και οι δρομολογητές για να στείλουν την πληροφορία στα μέλη του δικτύου.

- **Broadcast:** Το broadcast μοντέλο στέλνει το πακέτο πληροφοριών σε όλους τους παραλήπτες ενός συγκεκριμένου δικτύου. Η διεύθυνση προορισμού στο πακέτο είναι και broadcast διεύθυνση. Οπότε όλες οι συσκευές/παραλήπτες του δικτύου θα λάβουν την ίδια πληροφορία.
- **Unicast:** Η μέθοδος unicast χρησιμοποιείται για να σταλεί ένα μήνυμα σε ακριβώς ένα παραλήπτη. Στην περίπτωση που πρέπει να σταλούν μηνύματα σε περισσότερους παραλήπτες θα πρέπει να σταλούν περισσότερα unicast μηνύματα και το καθένα από αυτά να απευθύνεται σε ένα συγκεκριμένο παραλήπτη. Η αποστολή λοιπόν μίας τέτοιας πληροφορίας προϋποθέτει την ακριβή διεύθυνση IP του παραλήπτη.



Εικόνα 8 Unicast Broadcast Multicast Διανομή [\[14\]](#)

4.2.3 Προδιαγραφές QoS

Το QoS ή Quality of Services είναι η ικανότητα ενός στοιχείου του δικτύου να εγγυηθεί ότι μεταφορά της πληροφορίας και όλες οι απαιτήσεις σε εξυπηρέτηση μπορούν να ικανοποιηθούν. Στα δίκτυα πολυμέσων είναι απαραίτητο να υπάρχουν αυτές οι προδιαγραφές καθώς στα audio και video streams τα λάθη και οι καθυστερήσεις είναι πολύ πιθανές.

Κατά καιρούς ερευνητικά ινστιτούτα έχουν προτείνει διάφορα πρωτόκολλα QoS όπως το MPLS (MultiProtocol Label Switching). Οι εγγυήσεις που πρέπει να παρέχει ο πάροχος υπηρεσιών δεν περιορίζονται μόνο στο επίπεδο δικτύου αλλά είναι εξίσου σημαντικό να λαμβάνει υπόψιν και το επίπεδο εφαρμογής. Ακόμη, πρέπει να υπάρχει συνεργασίας όλων των υποσυστημάτων ενός συστήματος μεταφοράς, που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τη διαχείριση των πόρων και των ουρών στα switches του δικτύου. Η εφαρμογή ελέγχου του δικτύου θα πρέπει να ενημερώνεται συνεχώς για τον φόρτο και την κατάσταση του συστήματος και έτσι να αλλάζει τις QoS παραμέτρους ανάλογα. Συνεπώς, και το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να μπορεί να υποστηρίξει τις υπάρχουσες εφαρμογές πολυμέσων.

Οι βασικοί στόχοι των QoS προδιαγραφών είναι:

- **Latency (προβλέψιμη καθυστέρηση):** Η καθυστέρηση στην μεταφορά των πακέτων πληροφοριών μπορεί να μειωθεί αισθητά χρησιμοποιώντας μηχανισμούς προτεραιότητας στους buffers. Τα πακέτα με μεγαλύτερη προτεραιότητα αποστέλλονται πρώτα όταν το δίκτυο είναι διαθέσιμο ενώ εκείνα που έχουν χαμηλότερη περιμένουν στην ουρά.
- **Προβλέψιμη απώλεια πακέτων:** Ένα αρκετά συχνό φαινόμενο που παρατηρείται στα πολυμεσικά δίκτυα είναι η απώλεια πακέτων. Μία τέτοια κατάσταση οδηγεί σε αναμεταδόσεις τους χαμένων πακέτων, γεγονός που πολύ πιθανόν να δημιουργήσει υπερφόρτωση στους buffers που διαθέτουν περιορισμένη χωρητικότητα. Το πρόβλημα απώλειας πακέτων αντιμετωπίζεται με διαφορετικούς τρόπους και εξαρτάται από το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται. Όταν γίνεται χρήση TCP τα πακέτα ξαναστέλλονται μέχρι να επιστραφεί απάντηση παράδοσής τους ενώ στην περίπτωση UDP διαπραγματεύεται η επαναποστολή τους. Μια πιθανή λύση είναι ακόμη η αγνόηση των

χαμένων πληροφοριών κυρίως σε περιπτώσεις που οι μεγάλες καθυστερήσεις μπορούν να δημιουργήσουν χειρότερο πρόβλημα.

- **Αντιμετώπισης της μεταβλητότητας στην Καθυστέρηση (Jitter):** Είναι αδύνατον στα δίκτυα μεταφοράς πολυμέσων να υπάρχει ομοιομορφία στις καθυστερήσεις. Σε περιπτώσεις που οι καθυστερήσεις κυμαίνονται στα πλαίσια των nanoseconds αυτή η μεταβλητότητα δεν παρουσιάζει κάποιο ουσιαστικό πρόβλημα. Σε μεγαλύτερες όμως διαφορές μεταξύ της διάρκειας των καθυστερήσεων είναι επιτακτικό να υπάρξει κάποιος τρόπος αντιμετώπισης. Συνήθως, γίνεται χρήση του buffering, είτε από το λογισμικό είτε από το ίδιο το δίκτυο, όπου πριν την αναπαραγωγή του περιεχομένου γίνεται προσωρινή αποθήκευση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μία καθυστέρηση όμως εγγυάται την ομοιόμορφη ροή των δεδομένων.

4.2.4 Εύρος μετάδοσης (bandwidth)

Είναι απαραίτητο τα δίκτυα πολυμέσων να διαθέτουν μεγάλο εύρος μετάδοσης καθώς ο όγκος των πληροφοριών είναι πολύ μεγάλος. Και για αυτό συνήθως ανέρχεται στην τάξη των Gbits/sec. Ακόμη, στα πολυμεσικά δίκτυα χρησιμοποιείται η τεχνολογία ATM (Asynchronous Transfer Mode, δηλαδή ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς και πρόκειται για το πρότυπο που υιοθέτησε την έννοια αναπήδησης πακέτου, αναμετάδοσης πλαισίου (frame relay) και την υπηρεσία δεδομένων υψηλών ταχυτήτων με μεταγωγή (Switched Multimegabit Data Service-SMDS).

4.3 Πολυμέσα και Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου

Τα CDNs έχουν διαδραματίσει ένα πάρα πολύ βασικό ρόλο στο multimedia networking [17] και τα τελευταία χρόνια έχουν συμπεριλάβει στις εγκαταστάσεις τους υποδομές τόσο για Web έγγραφα και πολυμέσα όσο και για δυνατότητα παροχής υπηρεσιών διανομής όπως streaming και Video on Demand (VoD). Όπως και αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο τα CDNs χρησιμοποιούν τεχνικές αντιγραφής, αποθήκευσης και διανομής περιεχομένου για να αποφευχθούν καταστάσεις συμφόρησης των εξυπηρετητών και για να επιτρέψουν στο δίκτυο να αναπροσαρμόζεται και να αντιδρά σε αλλαγές της δημοτικότητας του περιεχομένου.

4.4 Προκλήσεις των μελλοντικών δικτύων πολυμέσων

Η τεχνολογία δικτύωσης πολυμέσων έχει κάνει μεγάλα άλματα τα τελευταία χρόνια τόσο σε εμπορικό επίπεδο όσο και σε ακαδημαϊκό. Όμως, υπάρχουν ακόμη πολλές προκλήσεις [18] που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για τα μελλοντικά συστήματα πολυμέσων. Αρχικά, είναι αρκετά σημαντικό να αναπτυχθούν συστήματα αξιολόγησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τιμολόγηση, διαχείριση και βελτιστοποίηση στα δίκτυα επόμενης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να δημιουργηθούν εφαρμογές που να αξιολογούν την ποιότητα των real-time 2D και 3D εφαρμογών έχοντας πάντα ως παραμέτρους το λειτουργικό κόστος, τις επιδόσεις κλπ. Είναι αρκετά σημαντικό αυτοί οι μηχανισμοί να λαμβάνουν τις μετρήσεις σε επίπεδο εφαρμογής. Παράλληλα, μπορούν να δημιουργηθούν εφαρμογές αξιολόγησης της ποιότητας του βίντεο λαμβάνοντας πληροφορίες από τα πακέτα και το δίκτυο δίχως να υπάρχει πρόσβαση στο αποκωδικοποιημένο βίντεο.

Όσον αφορά στα CDNs, παρόλο που βασικός τους σκοπός είναι να μεγιστοποιήσουν την διαθεσιμότητα περιεχομένου στους χρήστες, τα δίκτυα πολυμέσων επόμενης γενιάς δημιουργούν την ανάγκη για επιπλέον βελτιώσεις. Είναι απαραίτητο λοιπόν, να μπορούν να υποστηρίξουν περιβάλλοντα με μεγάλη ετερογένεια που περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία από δίκτυα, συσκευές και υψηλές απαιτήσεις από τους χρήστες.

Την ίδια στιγμή κρίνεται αναγκαία η αναβάθμιση των μηχανισμών εξατομίκευσης, των QoS εφαρμογών καθώς και των αλγορίθμων δρομολόγησης, ελεγκτών κυκλοφορίας καθώς και πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας (IEEE 802.11 k). Επίσης, οι εφαρμογές πολυμέσων

μπορούν να εκμεταλλευτούν την πολυεπίπεδη συνδεσιμότητα των ασύρματων συσκευών και τις πολλαπλές τους διευθύνσεις παρέχοντας καλύτερη επίδοση.

Τέλος, ο περιορισμός των διαθέσιμων πόρων στις κινητές συσκευές (σε επεξεργαστή, μνήμη, παροχή ενέργειας) δυσκολεύει την αποδοτική αναπαραγωγή πολυμέσων υψηλής ποιότητας. Για αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία αρχιτεκτονική που να έχει σαν κέντρο τον χρήστη και την ικανοποίηση των απαιτήσεών του, παρέχοντάς του υψηλής ποιότητας περιεχόμενο σε χαμηλή τιμή ακόμη και στις κινητές συσκευές.

5 Αλυσίδα αξίας της διανομής βίντεο

5.1 Ορισμός

Σύμφωνα με τον Michael Porter και το βιβλίο του Competitive Advantage το 1985 , η αλυσίδα αξίας (value chain) μπορεί να οριστεί ως εξής:

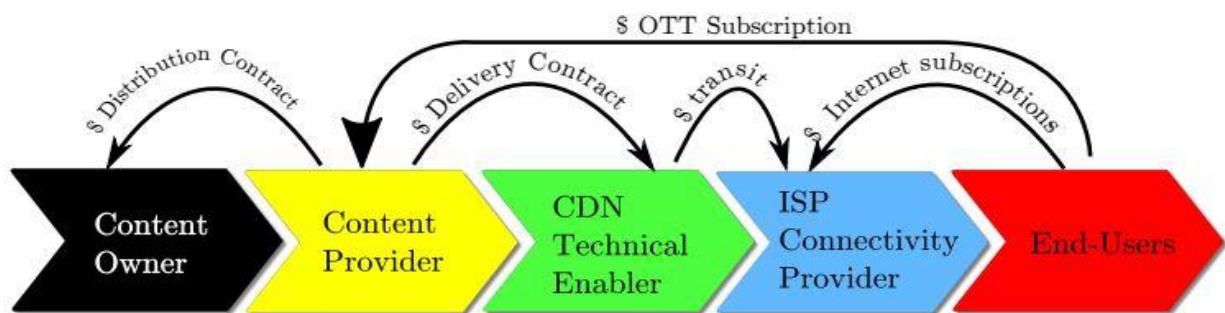
Η αλυσίδα αξίας είναι μια αλυσίδα δραστηριοτήτων που μια επιχείρηση εκτελεί, προκειμένου να παραδώσει ένα προϊόν ή μία υπηρεσία στην αγορά (πελάτη). Βασίζεται στην ιδέα πως κάθε επιχείρηση/οργανισμός μπορεί να διαχωριστεί σε υποσυστήματα καθένα από τα οποία διαθέτει εισροές, διαδικασίες τροποποίησης και εκροές. Για να λειτουργήσουν σωστά όλα τα δομικά στοιχεία των υποσυστημάτων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κατανάλωση πόρων – χρημάτων, εργασίας, υλικών, εξοπλισμού, διοίκησης και διαχείρισης. Ο τρόπος με τον οποίο οι δραστηριότητες της αλυσίδας αξίας πραγματοποιούνται συνδέεται με το κόστος παραγωγής και συνεπώς επηρεάζει το κέρδος.

5.2 Value chain και streaming

Όσον αφορά συγκεκριμένα στη διανομή βίντεο μέσω Διαδικτύου (Over-the-Top ή OOT βίντεο) και ιδιαίτερα στο βίντεο streaming, λόγω των δυνατοτήτων που παρέχει σε καταναλωτές και επιχειρήσεις αποτελεί έναν τομέα όπου οι προηγούμενοι οικονομικοί όροι βρίσκουν πρακτική εφαρμογή. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η αλυσίδα αξίας της διανομής βίντεο streaming. Παρατηρείται μία σειρά από αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των συντελεστών της [\[20\]](#) που έχουν ως εξής:

- **Οι Κάτοχοι του Περιεχομένου (Content Owners)** πουλάνε το υλικό τους στους **Παρόχους Περιεχομένου (Content Providers)**.

- Οι **Πάροχοι Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISPs)** πουλάνε το την συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο στους **Τελικούς Χρήστες (End Users)**.
- Οι **CPs** πουλάνε την πρόσβαση στο ΟΟΤ περιεχόμενο στους **Τελικούς Χρήστες**.
- Τέλος, οι Κάτοχοι **CDN** τοποθετούνται μεταξύ των **CPs** και των **ISP**.



Εικόνα 9 Value Chain Διανομής Βίντεο

1.1.1. Internet Service Providers

Οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Service Providers)-από εδώ και στο εξής ISPs- είναι εταιρείες τηλεπικοινωνιών [\[13\]](#) που παρέχουν συνδέσεις και υπηρεσίες διαδικτύου σε ιδιώτες πελάτες και οργανισμούς. Είναι αρκετά συχνό φαινόμενο οι ISPs πέρα από την πρόσβαση στο Internet και την κινητή και σταθερή επικοινωνία να προσφέρουν και πακέτα λογισμικού όπως φυλλομετρητές, λογαριασμούς email, και προσωπικές ιστοσελίδες. Οι ISPs είτε φιλοξενούν ιστοσελίδες είτε παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας τους και συνδέονται μεταξύ τους μέσω σημείων πρόσβασης δικτύου και άλλων υποδομών. Η κοστολόγηση χρήσης των υπηρεσιών τους ποικίλει ανά χώρα, ενώ ενδεικτικά το κόστος φιλοξενίας στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής ανέρχεται στα 20 δολάρια τον μήνα.

Η πρώτη εμπορική εκδοχή τους που ακολούθησε το ARPANET υποστηρίζεται πως είναι η Telnet το 1974, ενώ ο πρώτος ISP στην μορφή που τον γνωρίζουμε σήμερα θεωρείται το «The World» που ξεκίνησε να παρέχει τις υπηρεσίες του το 1989.

Σήμερα μερικοί από τους μεγαλύτερους ISPs παγκοσμίως είναι:

- **Comcast:** Είναι ένας Αμερικάνικος πάροχος τηλεπικοινωνιών με το μεγαλύτερο μονοπώλιο καλωδιακής τηλεόρασης στον κόσμο και ο μεγαλύτερος πάροχος Internet στις Ηνωμένες Πολιτείες. Διαθέτει ακόμη επιπλέον υπηρεσίες όπως Ασφάλεια Διαδικτύου και Γονικό Έλεγχο.
- **AT&T:** Η AT&T παρέχει DSL και dial-up υπηρεσίες καθώς και οπτικές επικοινωνίες ακολουθώντας το πρότυπο U-Verse σε περισσότερους από 17 εκατομμύρια εγγεγραμμένους χρήστες. Παρέχει πολλαπλές υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων κινητής τηλεφωνίας, Internet, ψηφιακή τηλεόραση και υπηρεσίας τηλεφωνίας σε πολλές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών. Οι DSL υπηρεσίες της κυμαίνονται από 768Kbps σε 6 Mbps ενώ οι οπτικές της ίνες καλύπτει ταχύτητες των 45Mbps. Η AT&T δίνει τη δυνατότητα υψηλών ταχυτήτων Internet για streaming ταινιών, βίντεο καθώς και download μεγάλων πακέτων δεδομένων.

5.3 Value Chain εξέλιξη

Η τεράστια ζήτηση σε βίντεο streaming [\[21\]](#) έχει δημιουργήσει την ανάγκη για διανομές με μεγαλύτερο bandwidth με αποτέλεσμα οι συντελεστές της αλυσίδας διανομής να παλεύουν να καλύψουν τις νέες απαιτήσεις επενδύοντας σε νέο εξοπλισμό. Παράλληλα, υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός μεταξύ των υπηρεσιών OOT βίντεο (βλ. περίπτωση Netflix) και των υπηρεσιών Video on Demand (VoD) που παρέχονται από τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών στα triple πακέτα (τηλεφωνία, Διαδίκτυο και ψηφιακή/αναλογική τηλεόραση), καθώς οι χρήστες έχουν πρόσβαση στο OOT περιεχόμενο μέσω αυτών των πακέτων. Ακόμη, είναι συχνό φαινόμενο η αλυσίδα να κλονίζεται από ισχυρές εταιρίες ηλεκτρονικής και μηχανών αναζήτησης που διευρύνουν τις υπηρεσίες τους παλεύοντας να επηρεάσουν και να ελέγξουν την πρόσβαση των καταναλωτών στα περιεχόμενα και τις εφαρμογές.

5.3.1 Νέοι ανταγωνιστές

Τα τελευταία χρόνια εντείνεται επίσης το φαινόμενο εταιρείες ηλεκτρονικής και μηχανών αναζήτησης να προσπαθούν δυναμικά να μπουν στον στίβο μάχης για την παροχή OTT διανομή περιεχομένου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Apple και η Google. Η Apple έχει σημειώσει τεράστια επιτυχία δίνοντας στις συσκευές της (φορητοί υπολογιστές, iPads και iPhones) εύκολη πρόσβαση στο online κατάστημά της, iTunes, το οποίο αρχικά είχε μόνο μουσικό περιεχόμενο αλλά σήμερα έχει φτάσει να παρέχει πολλές ταινίες και τηλεοπτικά προγράμματα. Από την άλλη πλευρά, η Google ξεκίνησε να εξαπλώνεται στην διανομή του βίντεο το 2006 με την αγορά του YouTube όπου και έγινε αυτόματα πάροχος περιεχομένου . Ακόμη από το 2011 με την δημιουργία του Google Fiber λειτουργεί ως ISP, ενώ πρόσφατα δημιούργησε το δικό της Cloud CDN . Παράλληλα, και οι δύο εταιρείες έχουν διευρύνει τις υπηρεσίες τους, δημιουργώντας το Apple TV και το Google TV αντίστοιχα όπου οι πελάτες τους μπορούν να κάνουν χρήση των OTT τηλεοπτικών υπηρεσιών. Καινοτομίες που έχουν εισαγάγει, όπως η ευκολότερη πρόσβαση σε περιεχόμενο που είναι σχετικό με προηγούμενες προβολές του χρήστη, με τις αξιολογήσεις του καθώς και με την πορεία που ακολουθεί μέσα στο κανάλι είναι στοιχεία που τις καθιστούν αρκετά ανταγωνιστικές για τους ISPs.

5.3.2 Ανάπτυξη OTT διανομής βίντεο

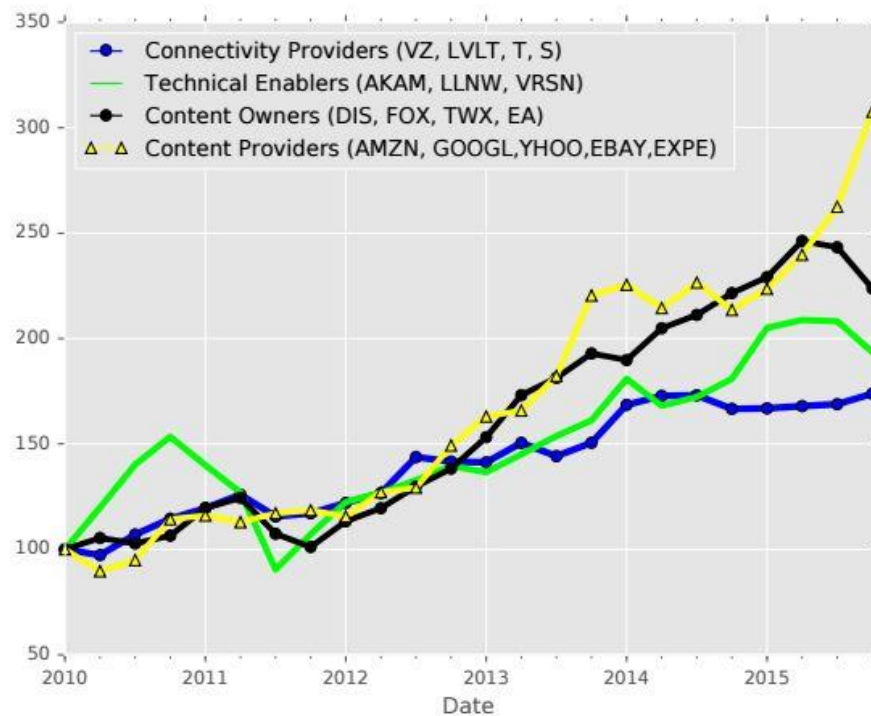
Είναι γεγονός πως τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία γενικότερη τάση στροφής στη κατ' απαίτηση διανομή βίντεο. Αν και ακόμα είναι αρκετά περισσότεροι οι οπαδοί της παραδοσιακής τηλεόρασης τα συνεχώς αυξανόμενα ποσοστά της OTT διανομής τηλεοπτικού περιεχομένου, κυρίως στις μικρότερες ηλικίες, έχουν οδηγήσει τους ιδιοκτήτες περιεχομένου και τα τηλεοπτικά κανάλια να αναζητήσουν συνεργασίες με τους παρόχους περιεχομένου όπως το Netflix και Hulu. Αυτή η συνεργασία απομακρύνει τους παραδοσιακούς ραδιοτηλεοπτικούς φορείς και τους φορείς δικτύων από την αλυσίδα αξιών ενώ την ίδια στιγμή ενδυναμώνονται οι παροχοί περιεχομένου που μπορούν να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους στους τελικούς χρήστες ανεξάρτητοι, βασιζόμενοι στην ουδετερότητα δικτύου.

Η ουδετερότητα δικτύου είναι μία έννοια που πρωτοεμφανίστηκε το 2003 από τον καθηγητή Tim Wu του Πανεπιστημίου της Columbia. Σύμφωνα λοιπόν με τον Wu τόσο η κινητή συνδεσιμότητα όσο και η καλωδιακή και τηλεφωνική πρέπει να αντιμετωπίζουν όλες τις ιστοσελίδες και υπηρεσίες με ακριβώς τον ίδιο τρόπο. Αυτό σημαίνει πως δεν θα υφίστανται διαφορετικές χρεώσεις σύμφωνα με τον χρήστη, το αιτούμενο περιεχόμενο, την εφαρμογή, τον εξοπλισμό ή ακόμα και με τον τρόπο σύνδεσης στο δίκτυο.

Φυσικά μια τέτοια πολιτική βρίσκει αντίθετες πολλές μεγάλες ISP εταιρείες όπως η AT&T, Comcast και Verizon οι οποίες επιθυμούν να μειώσουν την ταχύτητα ανάπτυξης των CPs προωθώντας τα δικά τους αντίστοιχα προϊόντα. Αυτό μπορεί να γίνει υποστηρίζοντας την ιδέα πως η ταχύτητα streaming, το bandwidth και άλλα QoS μπορούν να αυξομειωθούν ανάλογα με το χρηματικό ποσό που έχει καταβληθεί από τον χρήστη.

Στην ανταγωνιστική όμως αγορά αυτό που κάνει τη διαφορά για τον τελικό χρήστη είναι η τελική τιμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ISPs να μην αντιμετωπίζουν δυσκολίες να παραμείνουν ισχυροί στην αλυσίδα αξίας. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται γραφικά η πορεία των κεφαλαίων όλων των συντελεστών. Οι Content Owners και οι CP παρουσιάζουν αύξηση της τάξεως των 125% και 200% αντίστοιχα ενώ οι ISPs μόνο 70%.

Παρ' όλα αυτά, οι ISPs έχουν ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Διαθέτουν τον πλήρη έλεγχο του δικτύου (π.χ. διαχειρίζονται ολόκληρη τη διαδικασία δρομολόγησης από την αρχή έως το τέλος). Επίσης, οι εξελιγμένες υποδομές των ISPs τους επιτρέπουν να εγγυώνται την ποιότητα των υπηρεσιών τους και να προσφέρουν στους πελάτες δίκτυα με δυνατότητες εξ ολοκλήρου ελέγχου του εξοπλισμού και της δρομολόγησης, κάτι που είναι αδύνατο στην OTT διανομή.



Εικόνα 10 Ανάπτυξη των συντελεστών διανομής περιεχομένου [20]

5.4 Μοντέλα ISP-CDN Συνεργασίας

Στην παραδοσιακή μορφή της αλυσίδας αξιών διανομής βίντεο δεν υπάρχει συνεργασία μεταξύ των CDNs και των ISPs καθώς η φύση των προβλημάτων που καλούνται να λύσουν είναι διαφορετική. Από την μία πλευρά η διανομή του περιεχομένου απαιτεί την βέλτιστη επιλογή του server που θα εξυπηρετήσει το αίτημα (Server Selection – SS) ενώ από την άλλη πλευρά οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει να είναι αποτελεσματικοί όσον αφορά στην σωστή διαχείριση της εκάστοτε κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο (Traffic Engineering – TE). Για να επιτευχθεί η σωστή επιλογή του καταλληλότερου CDN server ωστόσο πρέπει να καλύπτονται όλες οι εξής προϋποθέσεις: Αρχικά, πρέπει ο εξυπηρετητής να διαθέτει το ζητούμενο περιεχόμενο, στη συνέχεια θα πρέπει να ελεγχθεί αν το περιεχόμενο είναι στην σωστή μορφή έτσι ώστε να είναι συμβατό με τις προδιαγραφές του χρήστη που έστειλε το αίτημα και τέλος αρκετά σημαντικό

είναι να υπάρχει η δυνατότητα το περιεχόμενο να μπορεί να φτάσει στον χρήστη στην βέλτιστη δυνατή ποιότητα για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του. Τις πρώτες δύο ανάγκες μπορεί να τις καλύψουν πλήρως τα CDNs όμως η ποιότητα του περιεχομένου είναι στενά συνδεδεμένη με τον τρόπο που οι ISPs δρομολογούν τα πακέτα πληροφορίας μέσα στο δίκτυό τους.

Με τις παραπάνω διαπιστώσεις έγινε σαφές [22] [23] πως η συνεργασία των CDNs και των ISPs είναι μονόδρομος στην αποτελεσματική διαχείριση των αιτημάτων και την παράδοση πολυμέσων που καλύπτουν όλα τα QoS. Όμως, η απλή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους δεν σημαίνει άμεσα και την δίκαιο μοίρασμα των κερδών καθώς και την αποτελεσματική λειτουργία. Καταρχήν, στην περίπτωση που τα CDNs γνωρίζουν ολοκληρωτικά το ISP δίκτυο μπορεί να έχει άσχημα αποτελέσματα στην απόδοση του συστήματος αφού οι ρόλοι συγχέονται (latency για τα CDNs και χρήση των μονοπατιών δρομολόγησης για τους ISPs). Ένα ακόμα ζήτημα που προκύπτει είναι η επιθυμία των παρόχων υπηρεσιών να μην μοιράζονται τις πληροφορίες τους έτσι ώστε να κρατάνε κρυφές τις υποδομές τους. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκαν συγκεκριμένα μοντέλα συνεργασίας [24] :

- **Μη συνεταιριστικό μοντέλο:** Σε αυτό το σενάριο οι CDN- servers είναι τοποθετημένοι έξω από το ISP δίκτυο. Ο βασικός λόγος που δεν υπάρχει μία ενεργή συνεργασία μεταξύ των δικτύων είναι ότι και οι δύο πλευρές επιθυμούν να κρατήσουν μυστικές κάποιες πληροφορίες που είναι κρίσιμες για την επιχειρηματική τους επιτυχία. Σήμερα, τα interface για μία τέτοια επικοινωνία δεν είναι ευρέως ανεπτυγμένα και σε περίπτωση συνεργασίας με χρήση αυτού του μοντέλου γίνεται συμφωνία για την κίνηση στα δίκτυα και στους surrogates. Η περιορισμένη χρήση του είναι αποτέλεσμα του ότι τα CDNs δεν μπορούν να έχουν απευθείας πρόσβαση στις πληροφορίες δρομολόγησης και για να αποκτήσουν πρέπει να επιβαρυνθούν με επιπλέον ανταλλαγή πακέτων που προκαλεί συμφόρηση στα δίκτυα ενώ ο αριθμός των στάσεων μέχρι το επιθυμητό surrogate αυξάνεται σημαντικά. Ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι το πρόγραμμα Open Connect της Netflix.
- **Διαχειριζόμενο μοντέλο:** Σε αυτή την περίπτωση τα CDNs έχουν τη δυνατότητα να τοποθετούν απευθείας στο ISP δίκτυο τους surrogates. Έτσι , μειώνεται ο αριθμός των στάσεων που μέχρι να προσπελαστεί ο κατάλληλο εξυπηρετητής και την ίδια στιγμή ο φόρτος εργασίας για τους ISPs μειώνεται. Αυτή η διαδικασία έχει κάποια μειονεκτήματα καθώς οι ISPs αρνούνται να δώσουν μία ολοκληρωμένη εικόνα του δικτύου τους. Είναι απαραίτητο επίσης να υπάρξει συμφωνία των παρόχων υπηρεσιών με καθένα από τους

παρόχους CDN και σε περίπτωση αύξησης της κυκλοφορίας πρέπει να αναβαθμίζονται οι surrogates. Παράδειγμα αυτής της αρχιτεκτονικής αποτελεί το Google Global Cache.

- **Εξουσιοδοτημένα CDNs:** Οι πάροχοι υπηρεσιών έχουν την δυνατότητα να μεταπωλήσουν τις CDN υπηρεσίες όπως γίνεται στην περίπτωση του Akamai Aura Licensed CDN.
- **Telco CDN:** Είναι ο παραδοσιακός τρόπος CDN-ISP «συνεργασίας» όπου οι ISPs μπαίνουν στην διαδικασία να χτίσουν ένα CDN. Αυτή η τεχνική είναι αρκετά ακριβή για τους παρόχους που σε ελάχιστες περιπτώσεις μόνο μπορούν να το υποστηρίξουν.

6 Συνεργασία ISPs CDNs

6.1 Βασική Ιδέα

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια τα τελευταία χρόνια οι απαιτήσεις σε βίντεο streaming αυξάνονται διαρκώς αλλάζοντας έτσι το τοπίο του σύγχρονου Internet. Για να καλυφθούν οι ανάγκες αποτελεσματικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο CDNs μειώνοντας την αναγκαιότητα των Παρόχων Περιεχομένου να διαθέτουν δικές τους περίπλοκες υποδομές. Η διανομή των πολυμέσων με αυτόν τον τρόπο γίνεται Over-The-Top περιορίζοντας τον ρόλο των ISPs οι οποίοι στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μόνο ως μέσο που παρέχει συνδεσιμότητα.

Παρ' όλα αυτά οι ISPs διαθέτουν ακόμη το πλεονέκτημα του πλήρη ελέγχου δρομολόγησης των πληροφοριών μέσα στο δίκτυο το οποίο μπορούν να χρησιμοποιήσουν σε συνεργασία με τους άλλους παράγοντες διανομής βίντεο για να παρέχουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών στον χρήστη. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτό το προτέρημα [\[25\]](#) καθώς και τις ήδη υπάρχουσες –αλλά μη τελειοποιημένες- προσπάθειες που έχουν γίνει μεταξύ ISPs και CDNs για συνεργασία παρουσιάζεται σε αυτό το Project μία νέα αρχιτεκτονική που έχει πολλαπλά οφέλη τόσο για τους ISPs όσο και για τους παρόχους CDN.

Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η λύση όπου οι ISPs μπορούν να υποστηρίξουν μία NFV υποδομή με δυνατότητα παροχής πολλών υπηρεσιών, ενώ ταυτόχρονα οι CDNs θα ενσωματώσουν τις δυνατότητές τους διανομής περιεχομένου μέσα στις virtualized υπηρεσίες (Virtual Network Functions-VNF). Με άλλα λόγια το λογισμικό των CDNs θα τρέχει μέσα στο εικονικό δίκτυο με την χρήση εικονικών CDN υπηρεσιών (vCDN Network Function) εκμεταλλευόμενο όλες τις παροχές των VFN όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3. Με αυτόν τον τρόπο, οι CDNs μπορούν να διευρύνουν το δίκτυό τους δίχως μεγάλο κόστος για την αγορά καινούργιου εξοπλισμού και οι ISPs μπορούν να αυξήσουν τα κέρδη τους κοστολογώντας διαφορετικά τις υπηρεσίες τους με την μειωμένη κυκλοφορία στο δίκτυό τους. Η δημιουργία

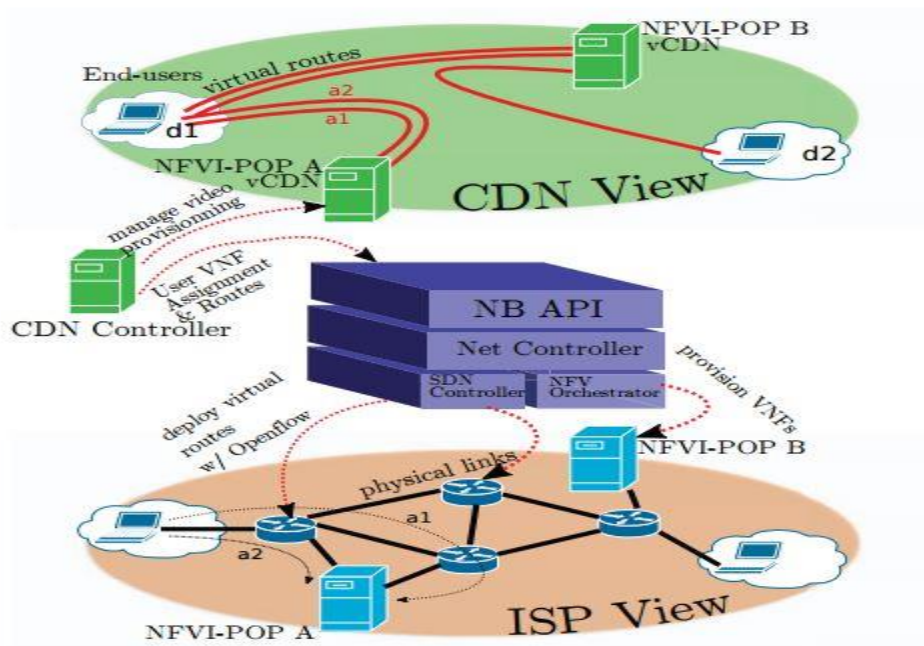
νέων vCDN υπηρεσιών θα γίνεται μέσω μίας NFV/SDN πλατφόρμας και το συμβόλαιο μεταξύ ISPs και CDNs θα πρέπει να μεταφράζει την εκάστοτε συμφωνία σε vCDN υπηρεσίες.

6.2 NFV/SDN Πλατφόρμα

Για να υλοποιηθεί η συνεργασία μεταξύ ISPs και CDNs προτείνεται μία NFV/SDN πλατφόρμα που θα φιλοξενεί τις εικονικές vCDN υπηρεσίες και παράλληλα θα παρουσιάζει στο CDN μία αφαιρετική εικόνα της υποδομής του ISP δικτύου.

Συγκεκριμένα, η απαραίτητη υπολογιστική ισχύος (CPU, RAM και αποθηκευτικός χώρος) θα παρέχεται από τους ISPs και οι χρήστες θα συνδέονται με SDN switches που θα δίνουν τη δυνατότητα να δημιουργούνται εικονικές διαδρομές μέσα στο δίκτυο σύμφωνα με τις εντολές που θα λαμβάνονται από τους CDNs. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11 η πλατφόρμα θα παρέχει δύο θα παρέχει διαφορετική εικόνα του δικτύου για τους ISPs και διαφορετική για τους CDNs. Από την μία πλευρά ο ISP έχει μία ολοκληρωμένη εικόνα της τεχνικής υποδομής του δικτύου και από την άλλη το CDN έχουν πρόσβαση μόνο στην απλοποίηση της.

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα δίνει στους παρόχους CDN πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν ώστε να αναδιαμορφώσουν την κυκλοφορία σχετικά με τις αποφάσεις τους. Για παράδειγμα μπορεί το CDN να αποφασίσει όλοι οι χρήστες να λαμβάνουν το περιεχόμενο από τον VCDN εξυπηρετητή απολαμβάνοντας έτσι τις υπηρεσίες υψηλής ποιότητας έως κάποιο συγκεκριμένο bandwidth (βλ. Κεφάλαιο 7.6). Στην περίπτωση που αυτό το όριο ξεπεραστεί τα αιτήματα ανακατευθύνονται στον CDN server όπου και εξυπηρετούνται με τη μεγαλύτερη δυνατή ποιότητα.



Εικόνα 11 CDN - ISP View

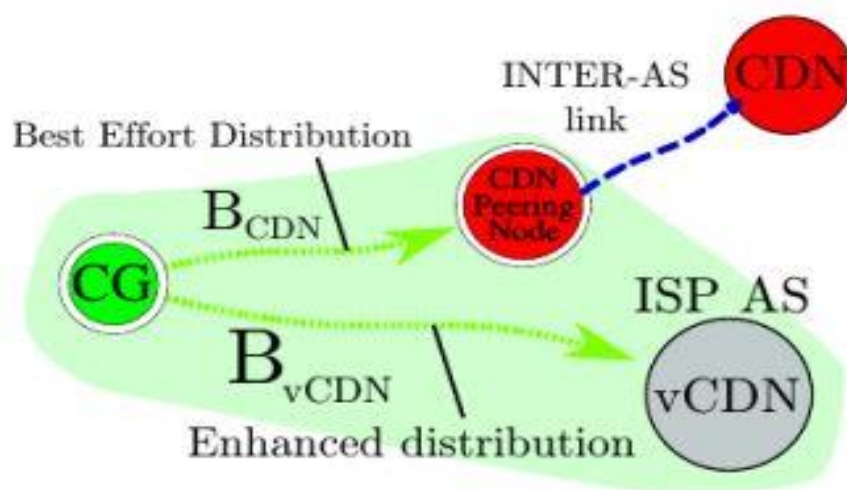
Με αυτόν τον τρόπο οι ISPs κρατούν τις υποδομές τους κρυφές και μπορούν έτσι να διαπραγματευτούν τις παρεχόμενες υπηρεσίες τους με τους CDNs επικυρώνοντάς αυτές μέσω ενός Service Level Agreement (SLA). Με το SLA εγκαθιδρύεται η συνεργασία μεταξύ τους και έτσι πλέον κάθε φορά που το CDN κρίνει πως χρειάζονται vCDNs ώστε να παραδώσει επιτυχώς το περιεχόμενο στους χρήστες αιτείται από τους ISPs τη δημιουργία τους. Εφόσον ο ISP μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις και έχει υπογράψει την αντίστοιχη σύμβαση ανταποκρίνεται στην αίτηση και αναπτύσσει τα vCDNs δίχως να ενημερώνει το CDN για περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με την τοπολογία του. Το SLA αφορά χαρακτηριστικά όπως η διάρκεια του περιεχομένου (στην περίπτωση του βίντεο η μέση διάρκεια του βίντεο), ο αριθμός των βίντεο που εξυπηρετούνται, ο επιθυμητός στόχος bit rate, η τοποθεσία του χρήστη, η διάρκεια του SLA κλπ και ουσιαστικά υποχρεώνει τους ISPs να εγγυηθούν την ποιότητα των υπηρεσιών τους.

6.3 Υλοποίηση υπηρεσιών περιεχομένου

Έχοντας υπογράψει το SLA πρέπει να αρχίσει η διαδικασία κατάλληλης μορφοποίησης του δικτύου από τους ISPs ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του φόρτου. Η διαδικασία που χρησιμοποιεί τις SDN δυνατότητες για να δημιουργήσει μία αλυσίδα από δικτυακές υπηρεσίες

είναι γνωστή ως Service Function Chain (SFC) και το βασικό της πλεονέκτημα είναι η αυτόματη δημιουργία virtual συνδέσεων και υπηρεσιών που μπορούν να διαχειρίζονται αποδοτικά τις ροές κυκλοφορίες. Η μετάβαση λοιπόν από το SLA στην SFC αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

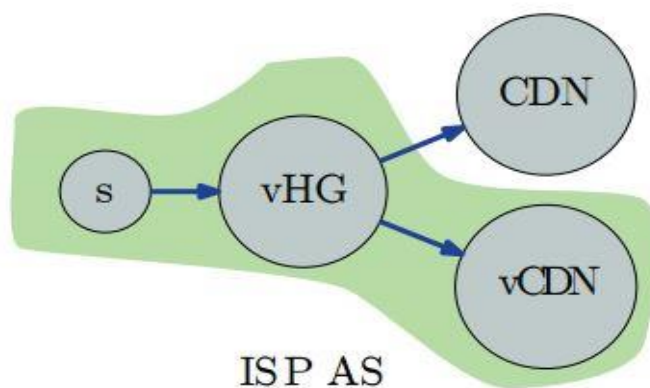
1. Στο πρώτο βήμα πρέπει να δημιουργηθεί το κανονικό μοντέλο που είναι η απλή μετάφραση των CDN απαιτήσεων. Έτσι ορίζεται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 12 η σύνδεση κάποιας ομάδας χρηστών με ένα CDN που βρίσκεται έξω από τις υποδομές του ISP και με ένα vCDN που είναι εικονικά τοποθετημένο μέσα στον ISP. Η ανάκτηση πακέτων από το CDN επιτυγχάνεται μέσω της προσπέλασης πρώτα από τον ISP ενώ το βελτιωμένο μονοπάτι που θα οδηγεί στο vCDN θα υπακούει στις προδιαγραφές του SLA.



Εικόνα 12 Κανονικό Μοντέλο

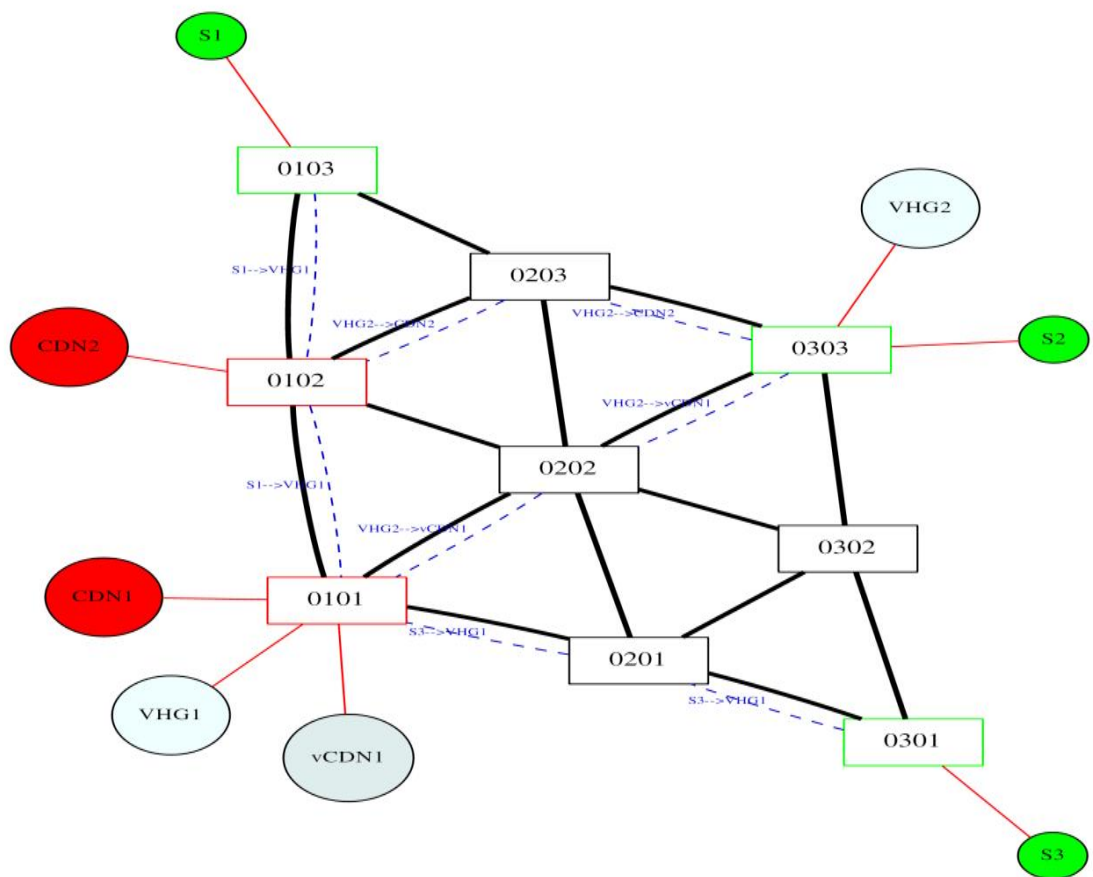
2. Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να υπάρξει κάποιος τρόπος δρομολόγησης της κυκλοφορίας στον επιθυμητό κόμβο. Παρόλο που τα CDNs έχουν δικές τους τεχνικές αναδιανομής (DNS κλπ), όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην περίπτωση του περιεχομένου, και στην περίπτωσή μας στην ανακατεύθυνση πακέτων βίντεο, οι

τεχνικές τους μπορούν να είναι άκομψες δημιουργώντας επιπλέον φόρτο στο δίκτυο. Για αυτό τον λόγο προτείνεται η χρήση Virtual Media Gateways (VMGs) που πέρα από τις υπόλοιπες υπηρεσίες που προσφέρουν μπορούν να διαχωρίζουν την κυκλοφορία σε αυτή που προορίζεται για το CDN και εκείνη που προορίζεται για το vCDN. Το βασικό πλεονέκτημα των VMGs είναι πως μπορούν εναλλάσσουν την κυκλοφορία σύμφωνα με τα 5 -7 επίπεδα OSI, δηλαδή μέσω των HTTP αιτημάτων, και έτσι μπορεί να υπάρχει η δυνατότητα να διαχειρίζονται τα αιτήματα των χρηστών στο επίπεδο εφαρμογής και στη συνέχεια οι ροές δεδομένων να ακολουθούν SDN virtual δρόμους που περιορίζονται στα χαμηλότερα επίπεδα OSI και που θα καλύπτουν τις υψηλές απαιτήσεις.



Εικόνα 13 Διαχώριση κυκλοφορίας μέσω vHG

3. Τέλος, πρέπει οι ISPs να ενσωματώσουν τις απαιτούμενες υπηρεσίες από το SLA πάνω στις υποδομές τους. Αυτό το πρόβλημα ονομάζεται Service Function Chain Embedding και περιγράφεται ως η χαρτογράφηση ενός VNF γραφήματος πάνω σε μία φυσική τοπολογία. Όπως στην παρακάτω εικόνα όπου οι κάθε φυσικός κόμβος αντιστοιχίζεται με ένα εικονικό όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις ακμές του γραφήματος.



Εικόνα 14 Ενσωμάτωση vCDN υπηρεσιών στο δίκτυο

6.4 Αλγόριθμος ενσωμάτωσης

Ένα πολύ σημαντικό βήμα που πρέπει να κάνουν οι ISPs είναι να ενσωματώσουν τις ζητούμενες υπηρεσίες με τον πιο αποδοτικό και λιγότερο δαπανηρό τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε ο Αλγόριθμος I και για τις εξής περιπτώσεις:

- Περίπτωση 1^η : εισαγωγή VMGs και διαχωρισμός σε ίσα τμήματα της κυκλοφορίας που εισέρχεται.
- Περίπτωση 2^η: εισαγωγή vCDNs και διαχωρισμός σε ίσα τμήματα της κυκλοφορίας που προέρχεται από τα VMGs.
- Περίπτωση 3^η : εισαγωγή vCDNs και VMGs στη σειρά.

```

Data: CDN's provided SLA
Result: A Service Mapping  $\mathcal{M}$  for SLA or rejection
 $s \leftarrow \text{canonical\_service}(\text{SLA});$ 
do
     $\mathcal{M} \leftarrow \text{solve}(s);$ 
    if  $\mathcal{M} = \emptyset$  then
         $s \leftarrow \text{transform}(s);$ 
        if  $s = \emptyset$  then
            throw rejection;
        else
            return  $\mathcal{M}$  ;
while true;

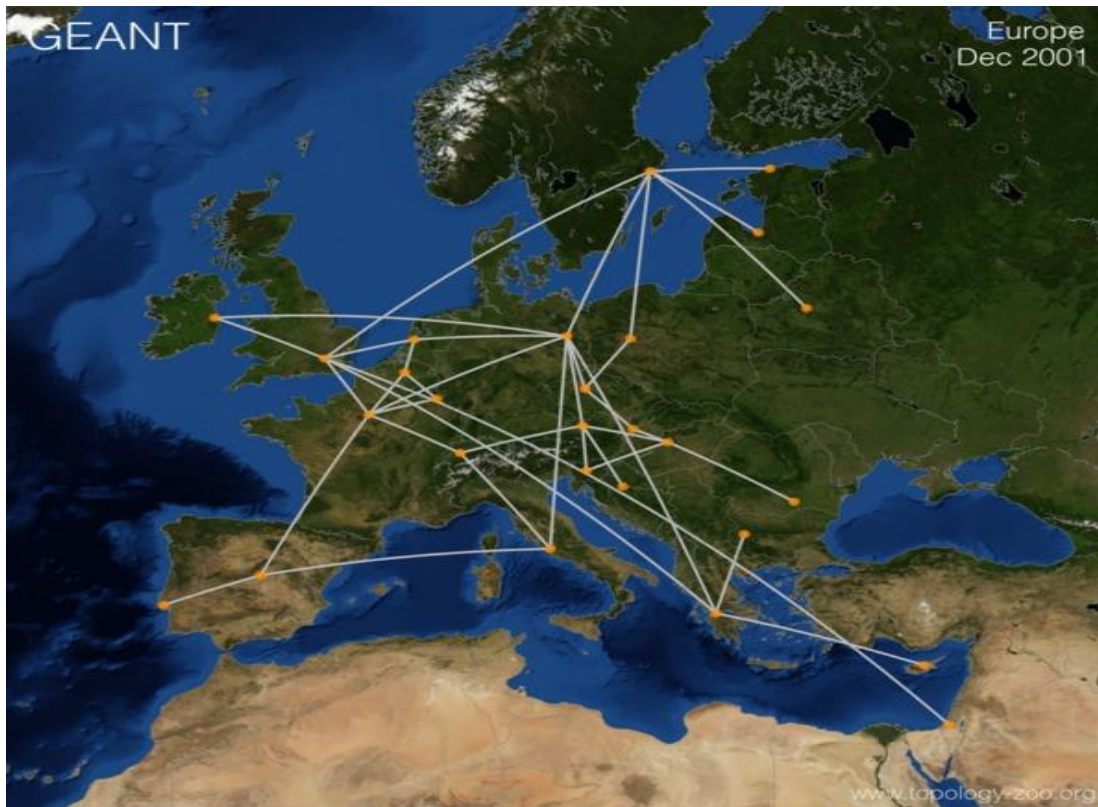
```

Algorithm 1: Service Mapping algorithm

Στον παραπάνω αλγόριθμο η συνάρτηση `canonical_service` υπολογίζει την πιο απλή αλυσίδα υπηρεσιών από το SLA και στη συνέχεια η συνάρτηση `solve` ελέγχει εάν υπάρχει κάποιος εφικτός τρόπος δημιουργίας τοπολογίας που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις. Στην περίπτωση που είναι δυνατόν να υπάρξει η κατάλληλη τοπολογία επιστρέφεται η χαρτογράφησης της $\mathcal{M}$. Ενώ στην περίπτωση που αυτό είναι αδύνατον ελέγχονται οι προηγούμενες περιπτώσεις με την συνάρτηση `transform` και αν αποτύχει να λυθεί το πρόβλημα η ενσωμάτωση των υπηρεσιών στην τοπολογία αποτυγχάνει και το αντίστοιχο SLA απορρίπτεται.

6.5 Αξιολόγηση

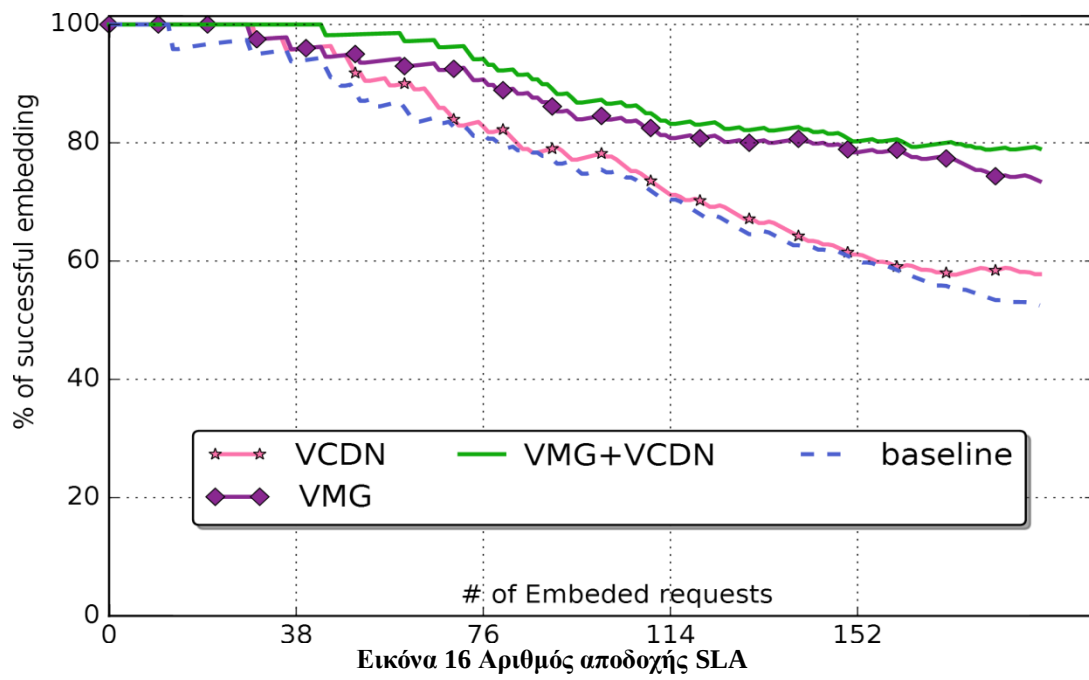
Για την αξιολόγηση του τρόπου ενσωμάτωσης της αλυσίδας υπηρεσιών πάνω στο δίκτυο έγινε προσομοίωση σε μία πραγματική τοπολογία την Geant τα δεδομένα της οποίας βρέθηκαν από μία ανοιχτή βάση που παρέχεται από το University of Adelaide [\[26\]](#) . Η τοπολογία Geant αποτελείται από 28 κόμβος και 35 ακμές και διαθέτοντας τα πλήρη δεδομένα της (GPS συντεταγμένες, bandwidth κλπ) χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό bandwidth για να υπολογιστούν οι καθυστερήσεις.



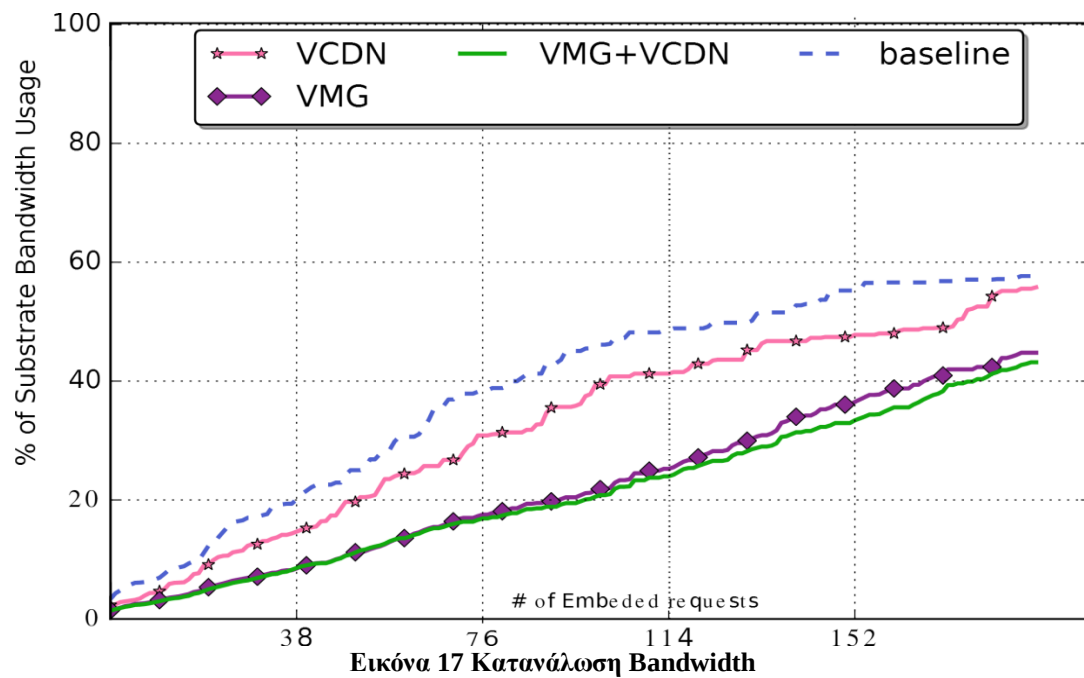
Εικόνα 15 Geant τοπολογία [26]

Για καθεμία από τις προαναφερόμενες περιπτώσεις έτρεξε η προσομοίωση λαμβάνοντας κάθε φορά ένα SLA και προσπαθώντας να το ενσωματώσει πάνω στην ISP υποδομή. Μόλις ο αλγόριθμος φτάσει το όριο απόρριψης του SLA σταματάει και αναφέρει τα αποτελέσματα.

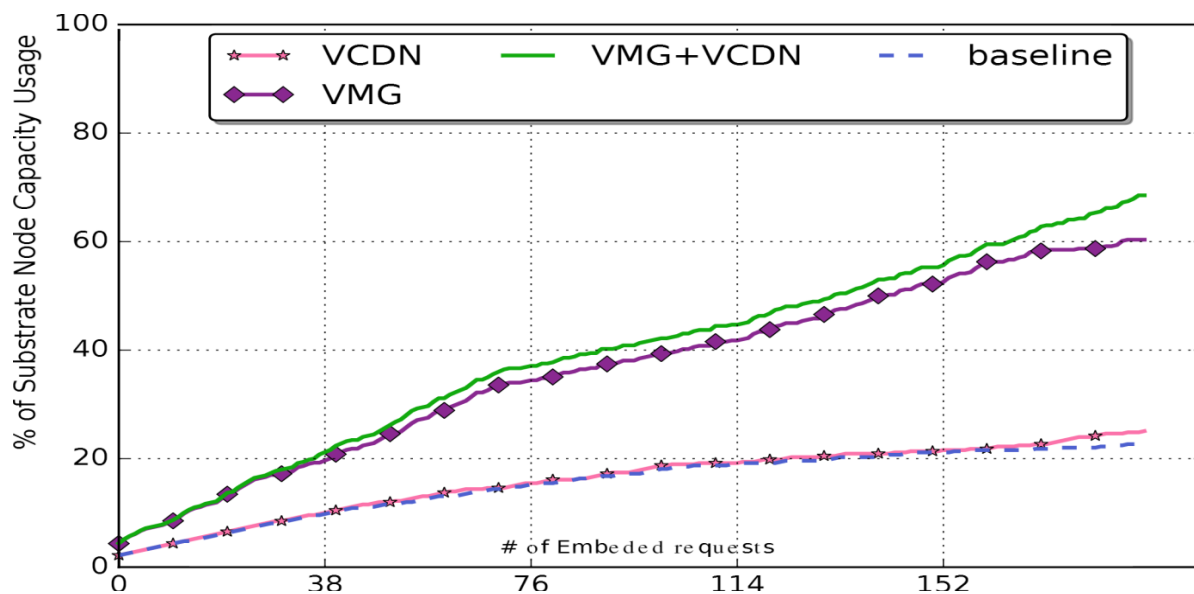
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μετά από 200 επαναλήψεις η 3^η περίπτωση έχει 79% επιτυχία στην ενσωμάτωση των υπηρεσιών στο δίκτυο ενώ για τις ίδιες ακριβώς επαναλήψεις στην βασική κανονικό μοντέλο-baseline το ποσοστό είναι 52%(Εικόνα 16).



Την ίδια στιγμή οι περιπτώσεις 2 και 3 εξοικονομούν 10% του συνολικού bandwidth (Εικόνα 17).



Παράλληλα στις ίδιες περιπτώσεις (Εικόνα 18) και με την αύξηση του αριθμού των VNF η κατανάλωση υπολογιστικής ισχύος τριπλασιάζεται

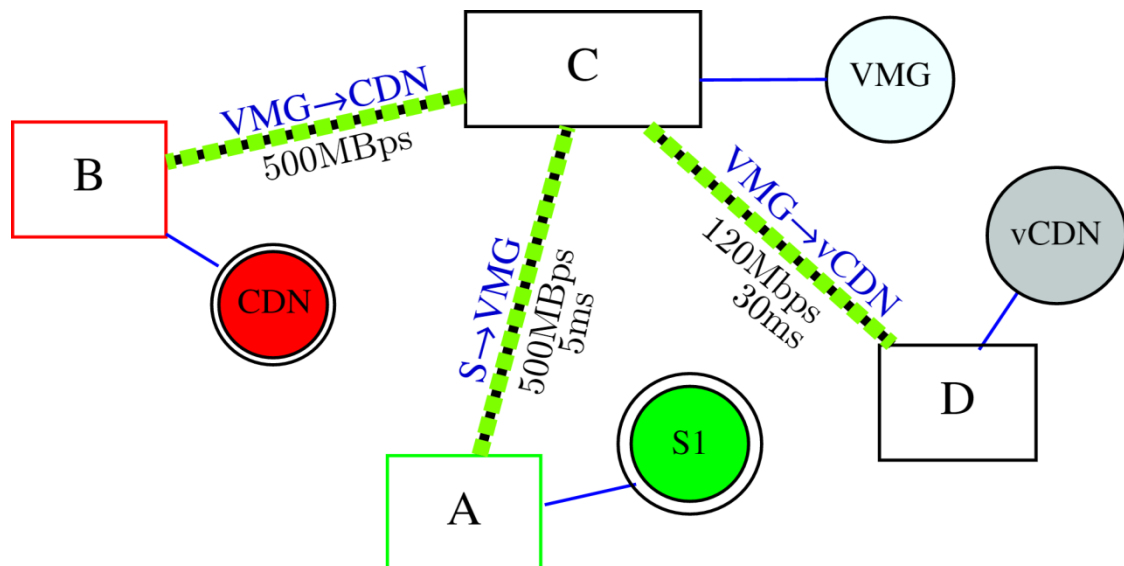


Εικόνα 18 Κατανάλωση υπολογιστικών πόρων

Η επιλογή της επιθυμητής τοπολογίας και στρατηγικής που θα ακολουθηθεί εξαρτάται από τον εκάστοτε πάροχο υπηρεσιών και ποικίλει ανάλογα με τις προσκείμενες ανάγκες και το κόστος. Οι ISPs μπορούν να εκμεταλλεύονται τους υπολογιστικούς τους πόρους για την απόκτηση πόρων δικτύων και έτσι να περιορίσουν το συνολικό τους κόστος.

6.6 Online vCDN διαχείριση

Για να μελετηθεί το όφελος των CDN από μία τέτοια αρχιτεκτονική δημιουργήθηκε ένα testbed που αποτελείται από 1 group χρηστών, 1 VMG, 1 CDN και 1 vCDN όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.

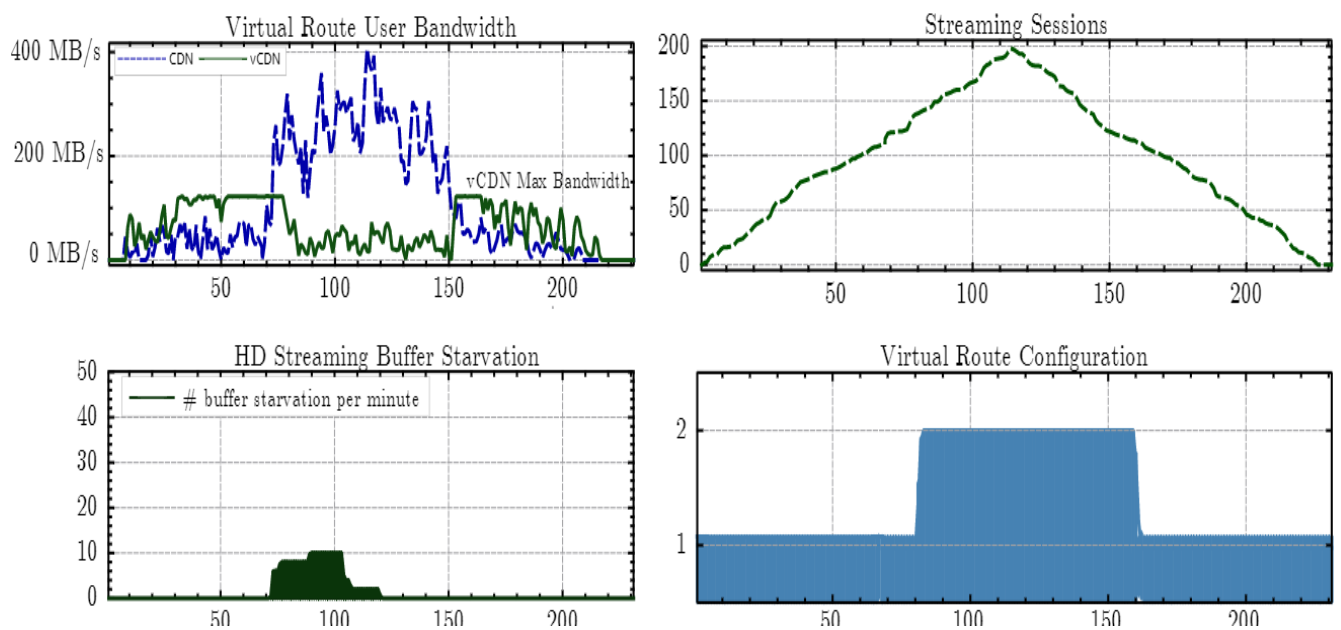


Εικόνα 19 Testbed ελέγχου CDN διαχείρισης

Για τον έλεγχο λειτουργίας του testbed χρησιμοποιήθηκε το εξής σενάριο. Αρχικά, οι χρήστες διαχωρίστηκαν σε 2 κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι Standard Definition (SD) χρήστες που αποτελούν το 50% των χρηστών και έχουν ως target rate 100KBps και στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι High Definition (HD) χρήστες με target rate 200KBps και οποίοι χωρίζονται στους μισούς που έχουν πρόσβαση σε επί πληρωμή περιεχόμενο και τους άλλους μισούς που έχουν πρόσβαση στο δωρεάν περιεχόμενο.

Η κυκλοφορία στο δίκτυο δημιουργήθηκε από 200 Video On Demand HTTP αιτήματα με ρυθμό άφιξης 2/s και διαχειρίστηκε από το CDN χρησιμοποιώντας δύο καταστάσεις. Στην πρώτη κατάσταση όλοι οι HD χρήστες λαμβάνουν το περιεχόμενό τους από το vCDN καθώς παρέχει καλύτερες υπηρεσίες και οι SD χρήστες λαμβάνουν το περιεχόμενό τους από το CDN. Κατά την δεύτερη κατάσταση μόνο οι επί πληρωμή HD χρήστες λαμβάνουν το περιεχόμενό τους από το vCDN. Η δεύτερη κατάσταση ενεργοποιείται αυτόματα όταν η χρήση του bandwidth έχει ξεπεράσει το 80% του διαθέσιμου bandwidth στο virtual κανάλι και απενεργοποιείται πάλι αυτόματα όταν το ποσοστό πέσει σε λιγότερο από 50 %.

6.7 Αποτελέσματα



Εικόνα 20 Αποτελέσματα testbed

Τα αποτελέσματα και τα γραφήματα αυτής της εναλλαγής καταστάσεων φαίνονται στην Εικόνα 20. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι μόλις υπάρξει κορεσμός στο vCDN κατευθείαν μέρος της κυκλοφορίας ανακατευθύνεται στο CDN από όπου και εξυπηρετείται έως το διαθέσιμο bandwidth να φτάσει τα επιτρεπτά ποσοστά πάντα σύμφωνα με το SLA. Χάρη στην προσαρμοστικότητα του δικτύου υπάρχει πολύ μικρός buffer κορεσμός γεγονός που σημαίνει ότι δεν θα «κολλάει» η εικόνα των χρηστών.

6.8 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Η δημιουργία του testbed ήταν αρκετά σημαντικό να χτιστεί ένα softwarised δίκτυο και να όχι ένα δίκτυο βασισμένο στο hardware επίπεδο. Αυτή η δυνατότητα προσφέρει μικρότερο κόστος σε χρόνο και χρήματα. Παράλληλα, πρέπει να υπάρχει ένας μοναδικός σταθμός που θα

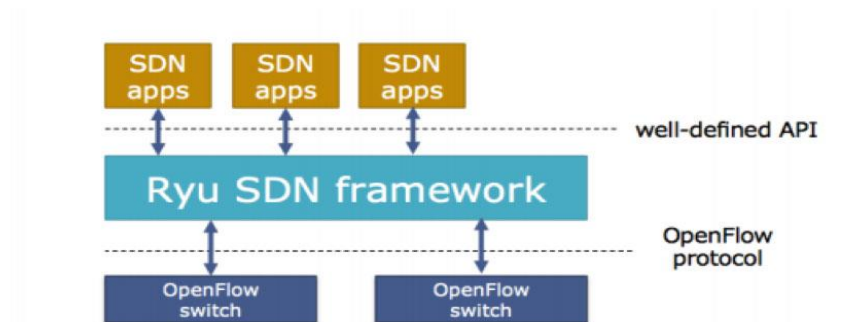
προσομοιώνει όλο το δίκτυο και θα είναι εύκολα διαχωρίσιμος από όλης την ομάδα χωρίς επιπλέον setups και επαναδιαμορφώσεις.

Το **Mininet** ήταν η λύση σε όλα τα προηγούμενα προβλήματα καθώς προσφέρει ένα σύνολο λειτουργιών που επιτρέπει την δημιουργία ρεαλιστικών εικονικών τοπολογιών στιγμιαία δημιουργώντας διαφορετικούς πυρήνες που ενώνονται μεταξύ τους μέσω εικονικών ακμών. Το Mininet αποτελείται από τρία στοιχεία:

- Virtual hosts,
- Virtual switches και
- Συνδέσεις μεταξύ των παραπάνω

και λειτουργεί στον Linux πυρήνα απομονώνοντας CPU bandwidth και άλλα στοιχεία απαραίτητα για την δημιουργία του εικονικού δικτύου.

Το δίκτυο που δημιουργήθηκε αποτελείται από έναν OpenFlow ελεγκτή, πολλαπλά switches που επιτρέπουν τη λειτουργία του ελεγκτή (vSwitches) και hosts συνδεδεμένους στα switches. Ο προγραμματισμός έγινε με τη χρήση του Mininet Python API.



Εικόνα 21Ryu Controller

Τα γραφήματα και η απεικόνιση των διαφορετικών στοιχείων της κυκλοφορίας έγιναν μέσω του RYU Controller [\[27\]](#) που είναι ένα Framework για Software Defined Network. Ο Ryu είναι ένας SDN ελεγκτής που έχει σχεδιαστεί για να αυξήσει την ευελιξία του δικτύου διευκολύνοντας τη διαχείριση και την προσαρμογή του χειρισμού της κυκλοφορίας. Έχει τη δυνατότητα αν συνεργάζεται με άλλο πρωτόκολλα όπως το OpenFlow με σκοπό να αλληλεπιδρά με το forward plane (switches και routers) για να επεξεργάζεται πως το δίκτυο χειρίζεται την κυκλοφορία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Großmann M., Schuberth St., „Auto-Mininet: Assessing the Internet Topology Zoo in a Software-Defined Network Emulator“
- [2] Open Networking Foundation, \Software-Defined Networking: The New Norm for Networks", April 2012
- [3]<http://opennetworking.org>
- [4]McKeown,N. ,How SDN will Shape Networking". URL:http://www.youtube.com/watch?v=c9-K5O_qYgA, 04. November 2013
- [5] Astuto Br., Mendonc M., Nguyen X., Obraczka K., Turletti T.,Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks,January 2014
- [6] B. Boiko, Content Management Bible (2nd Edition), Indianapolis: Wiley Publishing Inc., 2005.
- [7] Ιωάννης Π. Παπάνης, Προστασία Πολυμεσικού Περιεχομένου σε Δίκτυα με Επίκεντρο την Πληροφορία, Διδακτορική Διατριβή,Ιανουάριος 2014
- [8] Pathan, Buyya, A Taxonomy and Survey of Content Delivery Networks
- [9] <https://howtogetonline.com/a-guide-to-content-delivery-networks.php>
- [10] Βαλογιάννης Θ., Δίκτυα Διανομής Υπηρεσιών Περιεχομένου (CDN – Content Delivery Networks), Πτυχιακή Εργασία, Άρτα 2006
- [11] Mulerikkal J., An Architecture for Distributed Content Delivery Network, July 2007,Melbourne
- [12] Hawilo1 H:, Abdallah Sh., Mirahmadi1 M., and Rasool Asal, NFV: State of the Art, Challenges and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC), IEEE Network Mag., November 2014
- [13] <https://www.britannica.com/topic/Internet-service-provider>
- [14]https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst3850/software/release/16-5/configuration_guide/ip_mcast_rtng/b_165_ip_mcast_rtng_3850_cg/b_165_ip_mcast_rtng_3850_cg_chapter_00.html
- [15]Μακρή Στ. , Μετάδοση Ψηφιακού Βίντεο Στο Διαδίκτυο, Πτυχιακή Εργασία, Καβάλα,2008
- [16]Δημητριάδης Σ.Ν. , Πομπόρτης Α.Σ. και Τριανταφύλλου Ε.Γ., “Τεχνολογία Πολυμέσων Θεωρία και Πράξη”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004, ISBN: 960-418-025-8
- [17]Plagemann T, Goebel V, Mauthe A, Mathy L, Turletti T, Urvoy-Keller G (2006) From content distribution to content networks – issues and challenges. Comput Commun, Elsevier
- [18] Cerqueira E., Zeadally Sh., Leszczuk M., Curado M., Mauthe A., Recent advances in multimedia networking , Multimed Tools Appl (2011), August 2010
- [19] Nygren E., Sitaraman R., Sun J., The Akamai Network: A Platform for High-Performance Internet Applications
- [20] JHerbaut, N., D. Négru, Y. Chen, P. A. Frangoudis, and A. Ksentini, "Content Delivery Networks as a Virtual Network Function: a Win-win ISP-CDN Collaboration", IEEE Global Communications Conference, 12/2016
- [21] Nooren P., Leurdijk An., Eijk N.,"Net neutrality and the value chain for video",2012, info, Vol. 14 Iss: 6, pp.45 – 58
- [22] Poesse I., Frank B., Ager B., Smaragdakis G., Feldmann A., “Improving Content Delivery Using Provider-Aided Distance Information,” ACM IMC, 2010.
- [23]Poesse I., Frank B., Smaragdakis G., Uhlig S., Feldmann A., Maggs B., “Enabling Content-Aware Traffic Engineering,” ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 42, no. 5, pp. 21–28, 2012.

- [24] Wichtlhuber M. , Reinecke R. ,Hausheer D., An SDN based CDN/ISP Collaboration Architecture for Managing High-Volume Flows, Darmstadt, Germany
- [25] Herbaut, N., D. Négru, D. Magoni, and P. A. Frangoudis, "Deploying a Content Delivery Service Function Chain on an SDN-NFV Operator Infrastructure", 2016 International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU) , Heraklion, IEEE, 07/2016
- [26] <http://www.topology-zoo.org>
- [27] <https://www.sdxcentral.com>