



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ**  
**ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΑ**  
**ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

**ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΝΔΑΛΙΔΗΣ**  
**ΑΜ:711161087**

**Επιβλέπων: Μπόγρης Αντώνιος, Καθηγητής**



# **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

## **ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

**Σανδαλίδης Ιωάννης**

**A.M. : 711161087**

**Επιβλέπων:**

**Μπόγρης Αντώνιος, Καθηγητής**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Καντζάβελου Ιωάννα, Επίκουρη Καθηγήτρια**

**Μάμαλης Βασίλειος, Καθηγητής**

**Ημερομηνία εξέτασης 22/03/2024**



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σανδαλίδης Ιωάννης του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 711161087 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Σανδαλίδης Ιωάννης



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, η οποία σηματοδοτεί και το πέρας των σπουδών μου, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, οι οποίοι μου προσέφεραν πληθώρα γνώσεων αναφορικά με το γνωστικό αντικείμενο των σπουδών μου, αλλά και με ενέπνευσαν, ώστε να φέρω αυτές εις πέρας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Αντώνιο Μπόγρη, ο οποίος μου έδωσε τα κίνητρα για να εντρυφήσω, όχι μόνο στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αλλά εν γένει στον κόσμο της πληροφορικής και των συστημάτων της.

Τέλος, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για την υλική αρωγή που μου προσέφεραν, αλλά κυρίως για την ψυχολογική τους στήριξη προς εμένα, και την ενθάρρυνση τους για να προχωρήσω, κνηγώντας τους στόχους μου.





## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι οι νέες τεχνικές μετάδοσης – μεταγωγής πακέτων καθώς, και η ανάγκη υιοθέτησης τους στα κέντρα δεδομένων. Αναλύονται οι υφιστάμενες τεχνολογίες, τα όρια τους, αλλά και η εξέλιξη τους μέχρι και σήμερα. Οι λόγοι που οδήγησαν στην αναζήτηση νέων τεχνικών είναι αρκετοί. Βασικότερος όμως, είναι η συνεχής αύξηση πληροφοριών – δεδομένων του διαδικτύου και των αναγκών των τελικών χρηστών, για περισσότερο εύρος ζώνης, διατηρώντας ή βελτιώνοντας παράλληλα την αξιοπιστία τους. Το πλέον κατάλληλο μέσο, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι οι οπτικές τεχνολογίες και η πλήρη ένταξη τους στον παγκόσμιο ιστό. Ειδικότερα, νέες τεχνολογίες μετάδοσης με την χρήση οπτικών συνδέσεων που μπορούν να προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης με μειωμένες απώλειες και καθυστερήσεις, χωρίς αυτές να επιφέρουν μεγαλύτερες χρηματικές και ενεργειακές δαπάνες.

Λέξεις κλειδιά: Οπτικές τεχνολογίες, Οπτική μεταγωγή, Πακέτα δεδομένων, Κέντρα δεδομένων.

## **Abstract**

The main subject we will deal with in this senior thesis is the new transmission-switching techniques as well as the need to adopt them in data centres. In order to do this, first, we will analyse the existing ways that are used, their limits and their evolution through the years. The reasons that led to the search for new techniques are several, the most basic of which is the continuous increase of internet's data -information and the needs of end users for greater bandwidth while maintaining the existing reliability. So, the most basic tool to achieve the desired result is the optical technologies and their full integration into the world wide web. In particular, new transmission technologies using optical connections that can offer higher transmission rates with reduced losses and delays, without causing greater financial and energy costs.

Keywords: Optical technologies, Optical switching, Data packets, Data centers.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1:Εισαγωγικό Κεφάλαιο .....	19
1.1 Εισαγωγή .....	19
1.2 Σκοπός Εργασίας.....	20
1.3 Δομή εργασίας.....	20
Κεφάλαιο 2 : Κέντρα δεδομένων .....	22
2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	22
2.2 Hardware των Κέντρων Δεδομένων .....	24
2.2.1 Switches .....	24
2.2.2 Servers .....	25
2.2.3 Data Storages .....	26
2.2.4 Καλωδιώσεις.....	26
2.2.5 Racks .....	27
2.3 Τοπολογίες δικτύων στα κέντρων δεδομένων .....	28
2.3.1 Τοπολογία Fat-Tree.....	28
2.3.2 Τοπολογία Spine-leaf .....	29
2.3.3 Τοπολογία Mesh(Πλέγμα) .....	31
2.4 Ασφάλεια στα κέντρα δεδομένων .....	32
2.4.1 Φυσική ασφάλεια .....	32
2.4.2 Ασφάλεια δικτύου και δεδομένων .....	32
2.5 Πράσινα κέντρα δεδομένων .....	33
Κεφάλαιο 3 : Οπτικές τεχνολογίες στα κέντρα δεδομένων .....	34
3.1 Ιστορία των οπτικών επικοινωνιών .....	34
3.2 Τύποι οπτικών ινών .....	35
3.2.1 Μονότροπες οπτικές ίνες .....	35
3.2.2 Πολύτροπες οπτικές ίνες .....	36
3.3 Τύποι Οπτικών Switch.....	38
3.3.1 Μηχανικά οπτικά Switch.....	38
3.3.2 Μικροηλεκτρονικά μηχανικά Switch (MEMS-Switch).....	38
3.3.3 Liquid-Crystal Switch (LC).....	39
3.3.4 Thermo-optical Switch .....	40
3.3.5 Switch οπτικών ενισχυτών ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier switch-SOAs).....	41
3.4 Οπτικές Διατάξεις .....	42
3.4.1 Οπτικοί Πολυπλέκτες-Αποπολυπλέκτες(Mux-Demux) .....	42

3.4.2 Οπτικοί Ενισχυτές (Optical Amplifiers) .....	42
3.4.3 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) .....	43
3.4.3.1 Πολυπλεξία με χονδροειδή διαίρεση μήκους κύματος (CWDM) .....	44
3.4.3.2 Πολυπλεξία με πυκνή διαίρεση μήκους κύματος (DWDM) .....	44
3.5 Οπτικές διατάξεις στα κέντρα δεδομένων .....	45
3.5.1 Υιοθέτηση των οπτικών ινών στα κέντρα δεδομένων .....	45
3.5.2 Οπτικοί Πομποδέκτες (Optical Transceivers).....	46
3.5.3 Προκλήσεις – όρια των οπτικών πομποδεκτών στα κέντρα δεδομένων.....	48
3.6 Οπτική μεταγωγή στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων.....	49
3.6.1 Εισαγωγή στα εσωτερικά δίκτυα κέντρων δεδομένων – Electrical Switches .....	50
3.6.1.1 Folded Clos: κυρίαρχη τοπολογία και προκλήσεις .....	50
3.6.2 Ενσωμάτωση οπτικών switch στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων .....	51
3.6.2.1 Large-Port-Count Optical Switch.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Time-sensitive networking (TSN) και επικοινωνία πραγματικού χρόνου ....	54
4.1 Εισαγωγή στα ντετερμινιστικά δίκτυα και το TSN (Δίκτυα ευαίσθητα στον χρόνο) ....	54
4.1.1 Ντετερμινιστικά δίκτυα .....	54
4.1.2 TSN .....	55
4.2 Πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές κλειδιά για το TSN .....	56
4.2.1 Precision Time Protocol (PTP) – IEEE802.1AS .....	56
4.2.2 Time-Aware Shaper (TAS)-IEEE 802.1Qbv.....	57
4.2.2.1 Asynchronous Time-Aware Shaper (ATAS) .....	58
4.2.3 Frame Preemption - IEEE 802.1Qbu.....	58
4.3 Εφαρμογές του TSN .....	60
4.3.1 Εισαγωγή του TSN στον κόσμο των βιομηχανιών .....	60
4.3.2 Τα οφέλη του TSN στον αυτοματισμό των βιομηχανιών .....	60
4.4 Μελλοντικές προκλήσεις και κατευθύνσεις του TSN .....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μεταφορά των οπτικών τεχνολογιών εσωτερικά και ενίσχυση των κέντρων δεδομένων (Co-packaged optics).....	63
5.1 Εισαγωγή στα ON-BOARD και τα CO-PACKAGED OPTICS .....	64
5.1.1 ON-BOARD OPTICS.....	64
5.1.2 CO-PACKAGED OPTICS .....	65
5.2 Η αρχιτεκτονική των CO-PACKAGED OPTICS .....	65
5.2.1 Διαφορετικές προσεγγίσεις στην αρχιτεκτονική τους.....	66
5.2.1.1 2.5D CPO .....	66
5.2.1.2 3D CPO .....	66
5.2.1.3 Ενσωματωμένο laser .....	67

5.2.1.4 Εξωτερικά laser .....	67
5.3 Επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας και το οικοσύστημα.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα και μελλοντικά ζητήματα .....	69
Βιβλιογραφία.....	71

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τα πρώτα κέντρα δεδομένων.[2].....	23
Εικόνα 2: Cisco Nexus 7000(core Switch), Cisco Nexus 3064(ToR Switch) ,Huawei Cloud Engine 12 8000(core Switch)[3] .....	24
Εικόνα 3: Think Server RD630 (Rack Server), Dell PowerEdge R720 (Rack Server),Dell PowerEdge M820(Blade Server) [3].....	25
Εικόνα 4: EMC Symmetrix VMAX40 K(SAN),Huawei Ocean Store N8500(NAS) [3].....	26
Εικόνα 5 : Racks σε ένα κέντρο δεδομένων . .....	27
Εικόνα 6: Τοπολογία Fat-Tree με αριθμό θυρών ίσο με 4. (Packet Pushers: Demystifying DCN Topologies: Clos/Fat Trees – Part2).....	29
Εικόνα 7: Τοπολογία Spine-Leaf [6] .....	30
Εικόνα 8: Τοπολογία Mesh ( <a href="https://www.theinfozones.com/2015/03/what-is-mesh-topology-and-its.html">https://www.theinfozones.com/2015/03/what-is-mesh-topology-and-its.html</a> ) .....	31
Εικόνα 9: Ετήσια Κατανάλωση ενέργειας κέντρων δεδομένων και πιθανά μελλοντικά σενάρια ανάλογα τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν [12] .....	33
Εικόνα 10 :Περιεχόμενο Οπτικής ίνας. ( <a href="https://www.fastmetrics.com/blog/tech/fiber-optic-cables-how-they-work/">https://www.fastmetrics.com/blog/tech/fiber-optic-cables-how-they-work/</a> ) .....	35
Εικόνα 11: Οπτική διάταξη WDM [21] .....	35
Εικόνα 12 : Μονότροπη οπτική ίνα [42].....	36
Εικόνα 13: Πολύτροπη οπτική ίνα [42] .....	36
Εικόνα 14 : Χαρακτηριστικά των 2 κατηγοριών [42].....	37
Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά οπτικών ινών ανάλογα τον τύπο [42] .....	37
Εικόνα 16: Λειτουργία Μηχανικών οπτικών Switch [16] .....	38
Εικόνα 17: Τρόπος λειτουργίας LC Switch [17].....	39
Εικόνα 18: MMI-MZI Thermo-optic Switch [18] .....	40
Εικόνα 19 : Ενισχυτής οπτικού ημιαγωγού (SOA). [19] .....	41
Εικόνα 20 : Πολυπλέκτης – Αποπολυπλέκτης ( <a href="https://www.chinacablesbuy.com/guide-cwdm-muxdemux-system-installation.html">https://www.chinacablesbuy.com/guide-cwdm-muxdemux-system-installation.html</a> ) .....	42
Εικόνα 21: Διάγραμμα οπτικού ενισχυτή ( <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_amplifier#/media/File:Doped_fibre_amplifier.svg">https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_amplifier#/media/File:Doped_fibre_amplifier.svg</a> )...	43
Εικόνα 22: Ένα σύστημα πολυπλεξίας μήκους κύματος 4 καναλιών με ενισχυτές [22].....	44
Εικόνα 23: Διαφορά CWDM -DWDM στην απόσταση μηκών κύματος ( <a href="https://community.fs.com/blog/what-is-the-difference-between-dwdm-and-cwdm-optical-technologies.html">https://community.fs.com/blog/what-is-the-difference-between-dwdm-and-cwdm-optical-technologies.html</a> ).....	45
Εικόνα 24: Σύγκριση οπτικής ίνας με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιούταν προηγουμένως. ( <a href="https://www.fiber-optical-networking.com/application-fiber-desk-ftd.html/optical-cable-vs-rj45-ethernet-cable">https://www.fiber-optical-networking.com/application-fiber-desk-ftd.html/optical-cable-vs-rj45-ethernet-cable</a> ).....	46

Εικόνα 25: Εξέλιξη οπτικών πομποδεκτών ( <a href="https://www.prooptix.com/news/transceiver-form-factors/">https://www.prooptix.com/news/transceiver-form-factors/</a> ) .....	47
Εικόνα 26: Lucent Connector (αριστερά) , MPO Connector (δεξιά) [26].....	48
Εικόνα 27, 28: Διαμόρφωση δικτύου ανάλογα της ιδιότητες των Switch, Τελικοί Hosts ανάλογα τον ρυθμό μετάδοσης (link speed) [28].....	51
Εικόνα 29: Παρουσίαση δικτύου πριν και μετά την ένταξη των οπτικών switch [28].....	52
Εικόνα 30 : Αρχιτεκτονικές οπτικού switch [28].....	53
Εικόνα 31: Συγχρονισμός συσκευών του δικτύου μέσω ρολογιών συγχρονισμού ( <a href="https://www.moxa.com/en/spotlight/industrial-ethernet/tsn/index">https://www.moxa.com/en/spotlight/industrial-ethernet/tsn/index</a> ) .....	56
Εικόνα 32: Διαδικασία συγχρονισμού ρολογιών ( <a href="https://www.5gworldpro.com/blog/2023/02/11/what-is-precision-time-protocol-ptp/">https://www.5gworldpro.com/blog/2023/02/11/what-is-precision-time-protocol-ptp/</a> ).....	57
Εικόνα 33: Cycle Data [34].....	59
Εικόνα 34: Acyclic Data [34].....	59
Εικόνα 35: Guard Band [34] .....	59
Εικόνα 36:Frame Preemption in Guard Band [34] .....	60
Εικόνα 37:Εφαρμογή TSN σε δίκτυο ενός οργανισμού [38].....	62
Εικόνα 38:Σταδιακή μεταφορά των οπτικών ολοένα και πιο κοντά στο chip του Switch (CPO) . Στο 3 <sup>ο</sup> στάδιο φαίνεται η τεχνολογία OBO . [40] .....	64
Εικόνα 39: Απεικόνιση των διαφόρων αρχιτεκτονικών CPO(Co-Packaged Optics for our Connected Future(2023) Tony Chan Carusone, Professor of Electrical and Computer Engineering at the University of Toronto).....	67

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Αποδόσεις και χαρακτηριστικά των Switch[3] .....	25
Πίνακας 2:Αποδόσεις και χαρακτηριστικά των Server[3].....	25
Πίνακας 3: Αποδόσεις και χαρακτηριστικά των Data Storages[3].....	26
Πίνακας 4:Διάφορα είδη καλωδίων με βάση διαφορετικά πρότυπα Ethernet. [3] .....	27
Πίνακας 5: Επικοινωνιακές απαιτήσεις ντετερμινιστικών δικτύων[43].....	55
Πίνακας 6: Κατανάλωση ενέργειας ανά μοντέλο FPP [40].....	68



## Πίνακας Συντομεύσεων-Ακρωνυμίων-Αντιστοιχίσεων

Servers		Εξυπηρετητές
Switches		Μεταγωγείς
SDN	Software Defined Networking	Δίκτυο ορισμένο από Λογισμικό
NFV	Network Functions Virtualization	Εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών
QoS	Quality of Service	Ποιότητα υπηρεσίας
Virtualization		Εικονικοποίηση
Scalability		Δυνατότητα κλιμάκωσης
ToR Switch	Top of the Rack Switch	Ο μεταγωγέας που βρίσκεται στο επάνω μέρος του rack
DAS	Direct Attached Storage	Απευθείας συνδεδεμένη μονάδα αποθήκευσης
NAS	Network Attached Storage	Μονάδα αποθήκευσης συνδεδεμένη μέσω δικτύου
SAN	Storage Area Network	Δίκτυο αποθηκευτικών μονάδων
SSL	Secure Sockets Layer	
TLS	Transport Layer Security	
VMs	Virtual Machines	Εικονικές Μηχανές
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος
Mux	Multiplexer	Πολυπλέκτης
Demux	Demultiplexer	Αποπολυπλέκτης
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Πολυπλεξία με πυκνή διαίρεση μήκους κύματος
CWDM	Coarse wavelength division multiplexing	Πολυπλεξία με χονδροειδή διαίρεση μήκους κύματος
MPO	Multi fiber Push On	Πομποδέκτης πολλαπλών ινών
FPP	Faceplate Patch Placement (Faceplate Pluggables)	Οπτικοί πομποδέκτες
Si photonics	Silicon Photonics	

ROADMs	Reconfigurable optical add-drop multiplexer	Διαμορφώσιμος Οπτικός Πολυπλέκτης προσθήκης – εξαγωγής
Multicast		Αποστολή δεδομένων σε πολλούς δέκτες ταυτόχρονα
TSN	Time-sensitive network	Δίκτυο ευαίσθητο στον χρόνο
PTP	Precision time protocol	Πρωτόκολλο ακρίβειας χρόνου
Jitter		Αβεβαιότητα δικτύου
IoT	Internet of Things	Διαδίκτυο των αντικειμένων
PCB	Printed circuit board	Ηλεκτρονική πλακέτα συστήματος
OBO	On-board optics	Οπτικά πάνω στην πλακέτα
CPO	Co-packaged optics	Συνδυασμένος οπτικός-ηλεκτρικός εξοπλισμός
PER	Packet Error Rate	Ποσοστό λανθασμένων πακέτων
HPC	High performance computing	Υπολογιστές υψηλής απόδοσης
OXC	Optical cross connect	Οπτική διασύνδεση

# Κεφάλαιο 1:Εισαγωγικό Κεφάλαιο

## 1.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η όλο και μεγεθυνόμενη ανάγκη για αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των κέντρων δεδομένων, τα οποία αποτελούν βασικό στοιχείο στην υποδομή του διαδικτύου και των υπηρεσιών του. Με την αύξηση της κίνησης των δεδομένων στον κόσμο, η μεταφορά τους από την πηγή στον προορισμό, έχει γίνει πιο σύνθετη και απαιτεί σύγχρονες και αποδοτικές τεχνικές μεταγωγής πακέτων. Αυτή η αύξηση οφείλεται σε πολλούς παράγοντες. Ένας από τους πιο σημαντικούς, είναι η αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών στο Διαδίκτυο και ο πολλαπλασιασμός των υπηρεσιών που προσφέρονται μέσω αυτού, αφού ο άνθρωπος χρησιμοποιεί, πλέον, το Διαδίκτυο σε όλες τις εκφάνσεις της καθημερινότητάς τους, όπως από το να αναζητήσει πληροφορίες και να αγοράσει προϊόντα, μέχρι και να εργαστεί. Επιπλέον, η πρόοδος της τεχνολογίας στους τομείς της ιατρικής, των αισθητήρων και της Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτούν ολοένα και περισσότερη κίνηση δεδομένων.

Η μεταγωγή πακέτων είναι μία από τις κύριες και βασικότερες λειτουργίες στα δίκτυα των υπολογιστών, η οποία περιλαμβάνει την διαίρεση των δεδομένων σε μικρότερα κομμάτια γνωστά και ως πακέτα, τα οποία έχουν ως σκοπό την αποστολή τους στον προορισμό τους. Με την παραλαβή και την μετέπειτα επανένωση των πακέτων από τον δέκτη, δημιουργούνται ξανά τα αρχικά δεδομένα, όπως έφυγαν από τον αποστολέα. Στα κέντρα δεδομένων, αυτή η κυκλοφορία πακέτων είναι απαραίτητη για την ορθή, αξιόπιστη, γρήγορη και ασφαλή επικοινωνία μεταξύ εσωτερικού ή εξωτερικού εξοπλισμού, όπως οι διακομιστές (servers), τα switches ή ακόμα και τα αποθηκευτικά μέσα. Εξίσου απαραίτητη είναι και για την διαχείριση τους καθώς κάνει ευκολότερο τον χειρισμό μεγάλου όγκου δεδομένων, γεγονός το οποίο είναι καθοριστικό για την ταχύτερη και ομαλή λειτουργία των εφαρμογών. Τέτοιου είδους εφαρμογές, είναι οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους, οι αναλύσεις δεδομένων μεγάλης κλίμακας, οι πλατφόρμες μέσων κοινωνικής δικτύωσης, οι εφαρμογές μηχανικής μάθησης, αλλά και οι υπολογιστικές μηχανές υψηλής απόδοσης. Για να επιτευχθούν, λοιπόν, όλα τα παραπάνω, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες εξειδικευμένης μεταφοράς δεδομένων, όπως το SDN και το NFV, καθώς και μηχανισμοί (QoS) για να εξασφαλίσουν την ομαλή λειτουργία και την βέλτιστη απόδοση τους.

Ωστόσο, όλη αυτή η ανάπτυξη, δεν παύει να παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, καθώς και έχει κάποια όρια. Τομείς όπως το περιβάλλον, η ενέργεια και η οικονομία, έχουν αρχίσει να δέχονται αρνητική επίδραση, διότι τα κέντρα δεδομένων εδώ και χρόνια, καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, επιτείνοντας το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Επιπροσθέτως, το περιορισμένο εύρος

ζώνης, η απώλεια πακέτων, αλλά και πιθανές καθυστερήσεις, επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου και φέρνουν στην επιφάνεια ανάγκες για νέους τρόπους μεταγωγής.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων και σύμφωνα με διάφορες μελέτες, το «cloud computing» αποτελεί μία από τις ιδανικότερες λύσεις, όσον αφορά τον ενεργειακό, περιβαλλοντικό αλλά και τον οικονομικό τομέα. Ειδικότερα, μέσω αυτού, μειώνεται σημαντικά το κόστος του υπολογιστικού εξοπλισμού μέσω του virtualization, του scalability, αλλά και την κοινή του χρήση από πολλούς τελικούς χρήστες. Από την άλλη πλευρά, όμως, για την αντιμετώπιση των θεμάτων μεταγωγής, φαίνεται πως η λύση βρίσκεται στα «co-packaged optics» και την οπτική μεταγωγή, καθώς με την ένταξη τους στα εσωτερικά δίκτυα των κέντρων δεδομένων, μπορούν να αντιμετωπίσουν καθυστερήσεις, απώλειες, αλλά και να δώσουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

## **1.2 Σκοπός Εργασίας**

Η εκπόνηση της εργασίας επικεντρώνεται στην ανάλυση των ήδη υπάρχουσών τεχνικών μεταγωγής και εξοπλισμού, που χρησιμοποιούνται σε κέντρα δεδομένων και στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό. Σκοπός της παρούσας ανάλυσης, είναι η σύγκριση τους με νέες τεχνικές μεταγωγής και ένα σύνολο νέου εξοπλισμού, που απαρτίζεται από οπτική και ηλεκτρονική τεχνολογία για την αντιμετώπιση των μελλοντικών προκλήσεων και περιορισμών μεταγωγής πακέτων στα κέντρα δεδομένων.

## **1.3 Δομή εργασίας**

Η παρούσα εργασία, διαχωρίζεται στα κάτωθι κεφάλαια:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΑ ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: TIME SENSITIVE ETHERNET

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ (CO-PACKAGED OPTICS)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ

Στη συνέχεια της εργασίας, θα αναφερθούμε στα βασικά στοιχεία των κέντρων δεδομένων. Ξεκινώντας με την ιστορική αναδρομή και μετέπειτα με την ανάλυση του εσωτερικού εξοπλισμού τους, θα φτάσουμε στα όρια και τις μελλοντικές προκλήσεις τους. Συνεχίζοντας, θα αναλύσουμε τις οπτικές τεχνολογίες και την ένταξη τους στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, πέραν του οπτικού εξοπλισμού και των οπτικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται σήμερα, θα εξετάσουμε την οπτική μεταγωγή των δεδομένων και τι μπορεί αυτή να προσφέρει στη νέα γενιά των κέντρων δεδομένων. Εν συνεχεία, αναλύονται τα ντετερμινιστικά δίκτυα, το Time Sensitive Network καθώς και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί, καταλήγοντας στα οφέλη που μπορεί να προσφέρει με την εφαρμογή του πάνω στα υπάρχοντα δίκτυα και την αυτοματοποιημένη βιομηχανία. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα Co-packaged optics και την άμεση βελτίωση που μπορούν να προσφέρουν στην κατανάλωση ενέργειας, αλλά και σε κάποιες από τις καθυστερήσεις μεταφοράς πακέτων.

## Κεφάλαιο 2 : Κέντρα δεδομένων

### 2.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα κέντρα δεδομένων είναι κτίρια ή εγκαταστάσεις που φιλοξενούν τους υπολογιστικούς πόρους ενός οργανισμού, όπως οι διακομιστές, οι αποθηκευτικοί χώροι και οι δικτυακοί εξοπλισμοί. Συνήθως σχεδιάζονται για να είναι αξιόπιστα, ασφαλή και να εξυπηρετούν ανάγκες υπολογιστικής ισχύος και δικτυακών συνδέσεων μεγάλων επιχειρήσεων, οργανισμών και κυβερνητικών φορέων. Η ύπαρξη τους είναι σημαντική για τη λειτουργία του Διαδικτύου και των υπηρεσιών που προσφέρονται μέσω αυτού, όπως η αποθήκευση δεδομένων στον νέφος, η αναζήτηση, η αγορά και πώληση αγαθών – υπηρεσιών, η κοινωνική δικτύωση και σε άλλες εφαρμογές του Διαδικτύου.

Η ιστορία τους εκκινεί κάπου ανάμεσα στις δεκαετίες του 1940 και του 1950, μαζί με την δημιουργία των πρώτων υπολογιστών. Σκοπός τους ήταν η φιλοξενία των υπολογιστών της εποχής, καθώς αυτοί είχαν μέγεθος δωματίου. Ο ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) λέγεται πως ήταν το πρώτο υπολογιστικό σύστημα, και η αφορμή για την οποία κατασκευάστηκε ήταν ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκε και για επιστημονικούς λόγους. Η δομή των πρώτων κέντρων δεδομένων ήταν αρκετά περίπλοκη, αφού υπήρχαν πολλές και τεραστίου μεγέθους συσκευές, με ακόμα περισσότερα καλώδια για την επικοινωνία τους. Το πρόβλημα που υπήρχε εξ αρχής, ήταν αυτό των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονταν και για να το αντιμετωπίσουν, χρησιμοποιούνταν μεγάλοι ανεμιστήρες και αεραγωγοί καθώς οι κίνδυνοι υπερθέρμανσης, κάποιες φορές μπορεί να οδηγούσαν στην εκδήλωση φωτιάς. [1][2]

Με την ανάγκη του συγκεκριμένου εξοπλισμού, τα κόστη ήταν αρκετά υψηλά, και μόνο μεγάλες εταιρείες μπορούσαν να ανταποκριθούν σε αυτά και να προχωρήσουν στην προσθήκη κέντρων δεδομένων και υπολογιστικών συστημάτων στις εγκαταστάσεις τους. Αργότερα, περί τα έτη 1960 και 1970, υπήρξε μεγάλη πρόοδος από εταιρείες πληροφορικής και πληροφοριακών συστημάτων, όπως η Intel και η Xero, οι οποίες συνέβαλλαν στην δημιουργία μικρότερου μεγέθους ηλεκτρονικών υπολογιστών προσωπικής χρήσης το έτος 1980. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για την πλήρη ένταξη των υπολογιστών στην ανθρώπινη καθημερινότητα και την δημιουργία του διαδικτύου. [1][2]

Η εμφάνιση του διαδικτύου και οι ολοένα περισσότεροι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, δημιούργησαν ανάγκες στην επικοινωνία, που είχαν ως αποτέλεσμα την εξέλιξη του

παγκόσμιου δικτύου, το οποίο είχε ως βάση του τα κέντρα δεδομένων. Η επικοινωνία που αναπτύχθηκε μέσω του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (email) και η δυνατότητα κοινοποίησης πληροφοριών σε όλο τον κόσμο, ήταν πρωτοφανή για την εποχή, και αύξησε δραματικά την κίνηση στα κέντρα. Καθώς οι δυνατότητες της τεχνολογίας άλλαξαν, άλλαξαν και οι δυνατότητες του διαδικτύου. Έτσι, το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, επαναλαμβάνοντας τις προκλήσεις που τίθενται ως προς τον ρυθμό μετάδοσης, την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την ακεραιότητα της κίνησης μεταξύ των κόμβων που ονομάζονται κέντρα δεδομένων.



Εικόνα 1: Τα πρώτα κέντρα δεδομένων.[2]

## 2.2 Hardware των Κέντρων Δεδομένων

Στο εσωτερικό κάθε κέντρου δεδομένων, υπάρχει εξοπλισμός τελευταίας τεχνολογίας, ο οποίος επιλέγεται με βάση τις επιδόσεις και την αξιοπιστία του. Αυτό συμβαίνει, γιατί η ανάγκη για την άμεση ανταπόκριση τους είναι από τα βασικά ζητήματα για κάθε λειτουργία τους. Παρακάτω παρατίθεται η κατηγοριοποίηση τους, ανάλογα με το είδος των συσκευών που χρησιμοποιούνται, όπως είναι τα switches (μεταγωγείς), οι servers (εξυπηρετητές), τα data storages (μονάδες αποθήκευσης), οι καλωδιώσεις και τα racks.

### 2.2.1 Switches

Switches ονομάζονται τα μηχανήματα που είναι υπεύθυνα για την δρομολόγηση των πακέτων εντός και εκτός ενός τοπικού δικτύου των κέντρων δεδομένων. Είναι συσκευές με θύρες ανάλογες του μεγέθους τους. Ανάλογα τον προορισμό ενός πακέτου, επιλέγεται αντίστοιχα και η θύρα εξόδου του από το switch. Αυτή η επιλογή γίνεται ανάλογα το λογισμικό και το πρωτόκολλο δρομολόγησης της πληροφορίας, που έχει οριστεί για κάθε μηχανήμα. Τα switches χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την τεχνολογία και την χρήση τους. Όσον αφορά το κομμάτι της τεχνολογίας τους, υπάρχουν τα οπτικά και τα ηλεκτρικά switches. Μερικές από τις διαφορές τους είναι ο τρόπος λήψης και αποστολής των δεδομένων, ο ρυθμός μετάδοσής τους, το κόστος τους αλλά και η κατανάλωση ενέργειας τους. Για το κομμάτι της χρήσης υπάρχουν τα switches κορμού (core switches) και τα ToR (top of the rack), με κύριες διαφορές την θέση τους στο δίκτυο, τον αριθμό θυρών και την ταχύτητάς τους. [3]



Εικόνα 2: Cisco Nexus 7000(core Switch), Cisco Nexus 3064(ToR Switch) ,Huawei Cloud Engine 12 8000(core Switch)[3]



Name	Switching Capacity (Tbps)	Forwarding performance	Number of line-speed ports
Cisco Nexus 7000	17.6	1.44-11.5 bpps	32 100 Gbe, 192 40 GbE or 768 10 GbE
Cisco Nexus 3064	1.28	950 mpps	48 10 GbE or 8 40 GbE
Huawei Cloud Engine 12 800	16-64	4.8-19.2 bpps	96 100 GbE, 288 40 GbE or 1152 10 GbE

Πίνακας 1: Αποδόσεις και χαρακτηριστικά των Switch[3]

Tbps = Terabits per second.

bpps = billion packets per second.

GbE = Gigabit Ethernet.

## 2.2.2 Servers

Server ονομάζονται τα μηχανήματα που είναι υπεύθυνα για την πλήρη διαχείριση των κέντρων δεδομένων. Επεξεργάζονται με κάθε τρόπο τα δεδομένα τους, ενώ ταυτοχρόνως μπορούν να αποφασίσουν και την λειτουργική τους επίδοση, ανάλογα με την ανάγκη της εκάστοτε κατάστασης. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τους Tower servers, τους Rack Servers και τους Blade Servers. Τέλος, διαφοροποιούνται μεταξύ τους από το μέγεθος και την χρήση τους. [3]



Εικόνα 3: Think Server RD630 (Rack Server), Dell PowerEdge R720 (Rack Server), Dell PowerEdge M820 (Blade Server) [3]

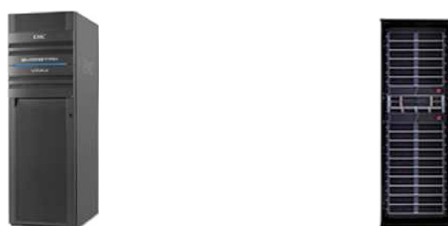
Name	Type	Processor	Mem.	IS	Network interface
RD630	2U	E5-2600	320GB	24TB	3 1GE
R720	2U	E5-2600 or 2600v2	768GB	32TB	1 10GE & 2 1GE
M820	Blade	E5-4600 or 4600v2	3TB	4.8TB	2 10GE & 4 1GE

Πίνακας 2: Αποδόσεις και χαρακτηριστικά των Server [3]

2U, 4U are the heights of rack servers. Mem. = Memory. IS = Internal storage.

### 2.2.3 Data Storages

Data Storages είναι οι συσκευές που χρησιμεύουν στην αποθήκευση δεδομένων. Είναι από τα βασικά εργαλεία των κέντρων δεδομένων, καθώς κατέχουν όλες τις πληροφορίες που εισέρχονται ή εξέρχονται στο δίκτυο των κέντρων. Με την ανάπτυξη των cloud υπηρεσιών, η ανάγκη για γρηγορότερη απόκριση και μεγαλύτερη ασφάλεια στον τομέα της μνήμη, είναι πλέον απαραίτητη. Σε αυτή την κατηγορία εξοπλισμού, οι κατηγορίες που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής: το DAS(Direct Attached Storage), το NAS(Network Attached Storage) και το SAN(Storage Area Network). [3]



Εικόνα 4:EMC Symmetrix VMAX40 K(SAN),Huawei Ocean Store N8500(NAS) [3]

Name	Storage type	Storage Capacity (PB)	Cache Capacity
EMC Symmetrix VMAX40 K	SAN	4	2 TB
Huawei Ocean Store N8500	NAS	15	192GB

Πίνακας 3: Αποδόσεις και χαρακτηριστικά των Data Storages[3]

### 2.2.4 Καλωδιώσεις

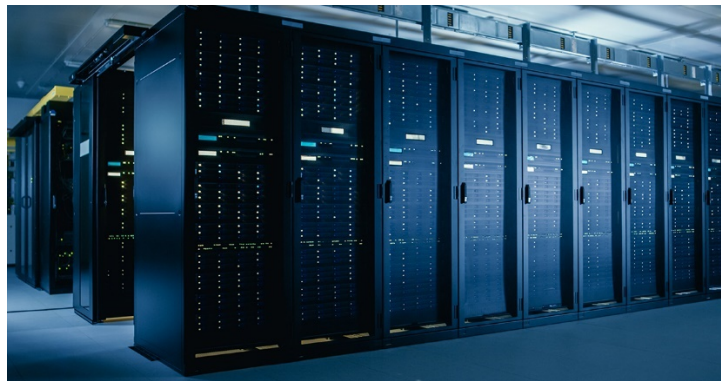
Για την σύνδεση όλων των προαναφερθέντων συστημάτων, είναι απαραίτητη η χρήση των γνωστών σε όλους μας καλωδίων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία με το εσωτερικό και το εξωτερικό των κέντρων δεδομένων. Τα καλώδια κατηγοριοποιούνται, ανάλογα με τον ρυθμό μετάδοσης που μπορούν να υποστηρίξουν, την απόσταση, αλλά και με τον τύπο καλωδίου (οπτικά ή ηλεκτρικά).

Standard	Medium	Distance	Wavelength
10GBASE-CX4	Twinaxial	25 m	N/A
10GBASE-S	MMF	300 m	850 nm
40GBASE-KR4	Backplane	1 m	N/A
40GBASE-LR4	SMF	10 km	1310 nm
100GBASE-CR10	STP	7 m	N/A
100GBASE-ER10	SMF	40 km	1310 nm

Πίνακας 4: Διάφορα είδη καλωδίων με βάση διαφορετικά πρότυπα Ethernet. [3]

### 2.2.5 Racks

Racks ονομάζεται ο εξοπλισμός που φιλοξενεί όλα τα παραπάνω συστήματα, με τέτοιο τρόπο, όπου υπάρχει εύκολη πρόσβαση και διαχείριση σε όλα. Είναι μεταλλικά κουτιά με αντίστοιχες θέσεις – ράφια για την τοποθέτηση του εξοπλισμού, θέσεις τοποθέτησης των καλωδίων και σημεία ψύξης για την διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα.



Εικόνα 5 : Racks σε ένα κέντρο δεδομένων .

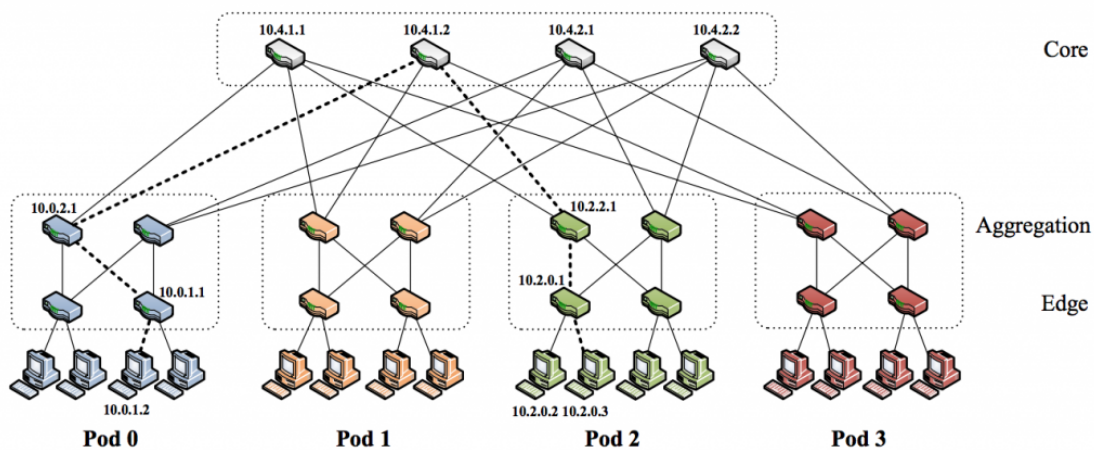
## 2.3 Τοπολογίες δικτύων στα κέντρων δεδομένων

Η τοπολογία ενός δικτύου περιγράφει την φυσική διάταξη του εξοπλισμού του, δηλαδή τον τρόπο διασύνδεσης των συσκευών που το απαρτίζουν, αλλά και τον τρόπο μεταγωγής της πληροφορίας μέσα από αυτές. Υπάρχουν πολλές τοπολογίες, η κάθε μία με τα θετικά και τα αρνητικά της χαρακτηριστικά, καθώς καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφέρουμε κάποιες από αυτές και την χρήση τους στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων.

### 2.3.1 Τοπολογία Fat-Tree

Σύμφωνα με μελέτες , η τοπολογία Fat-Tree είναι μία από τις βασικές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια. Είναι σχεδιασμένη να προσφέρει υψηλό εύρος ζώνης (bandwidth), καθώς και χαμηλές καθυστερήσεις στις επικοινωνίες μεταξύ των συσκευών δικτύου. Η ονομασία της προέρχεται από την ομοιότητα της με τις ρίζες ενός δένδρου σε κάθε ένα από τα επίπεδά της, καθώς επίσης είναι μία εξέλιξη της τοπολογίας tree. [41]

Τα επίπεδα ενός fat-tree δικτύου είναι τρία (3), ξεκινώντας την αρίθμηση από το μηδέν (0) και την δομή του από πάνω προς τα κάτω. Έχουμε το επίπεδο μηδέν (0) το οποίο είναι το επίπεδο κορμού (core layer), το επίπεδο ένα (1), όπου είναι το aggregation layer και το επίπεδο δύο (2) με την ονομασία edge layer. Τα τρία αυτά επίπεδα εμπεριέχουν switches, των οποίων ο αριθμός αποφασίζεται από τον αριθμό θυρών των core switch, τα οποία με την σειρά τους έχουν ίδιο αριθμό θυρών, ενώ το επίπεδο 2 είναι αυτό που κάνει και την σύνδεση με τους Servers του κέντρου. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα δίκτυο με αριθμό θυρών ίσο με τέσσερα (4). [4][5]



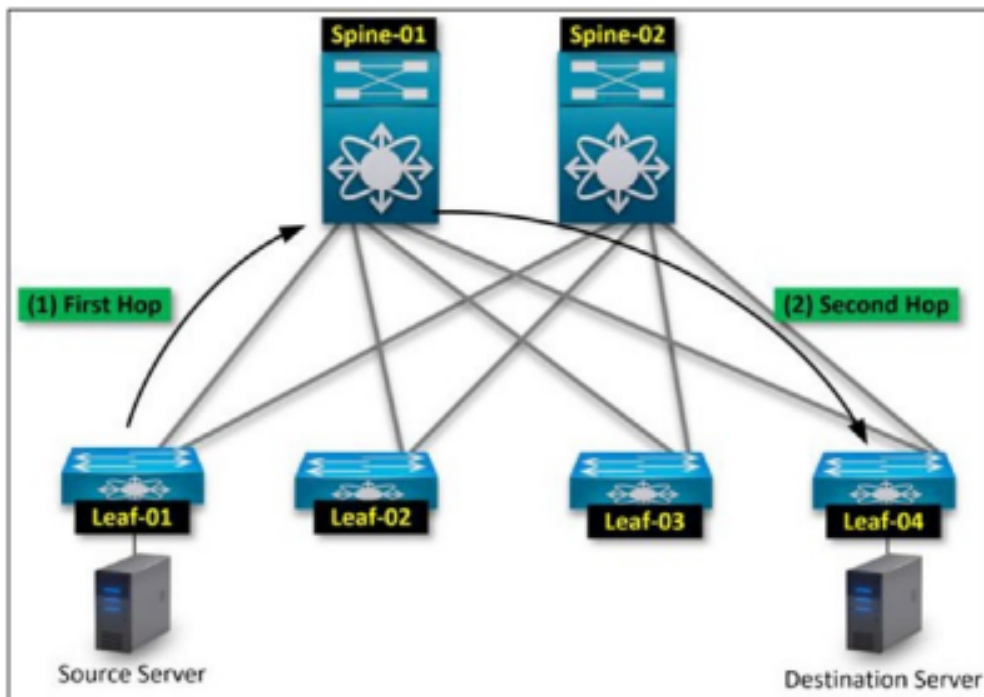
Εικόνα 6: Τοπολογία Fat-Tree με αριθμό θυρών ίσο με 4. (Packet Pushers: Demystifying DCN Topologies: Clos/Fat Trees – Part2)

Για τον υπολογισμό των aggregation και των edge switch χρησιμοποιείται ο τύπος  $k/2$  και για τα δύο αντίστοιχα, όπου  $k$  είναι ο αριθμός των θυρών. Από την άλλη, όσον αφορά τον υπολογισμό των server που μπορεί να υποστηρίξει η συγκεκριμένη τοπολογία, υπολογίζεται με τον τύπο  $(k/2)^2$  όπου  $k$  συνεχίζει να είναι ο αριθμός θυρών. [4][5]

### 2.3.2 Τοπολογία Spine-leaf

Μία από τις πιο γνωστές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κέντρα δεδομένων είναι η Spine-leaf. Η ελαστικότητα, οι υψηλές αποδόσεις, καθώς και οι λύσεις που προσφέρει σε ένα δίκτυο, την έχουν αναγάγει σε μία από τις καλύτερες επιλογές για τις σημερινές και ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις.

Είναι μια τοπολογία 2 επιπέδων, όπου χωρίζεται στον κορμό (spine) και τα φύλλα (leaf). Στο πρώτο επίπεδο βρίσκεται ο κορμός του δικτύου (Spine Switches) και στο δεύτερο τα φύλλα του (Leaf Switches), στα οποία συνδέονται και οι servers. Κάθε Switch του δεύτερου επιπέδου, είναι συνδεδεμένο με όλα τα Switch του πρώτου, πράγμα το οποίο διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών του δικτύου και ελαττώνει την άσκοπη αύξηση κίνησης σε αυτό. [7]

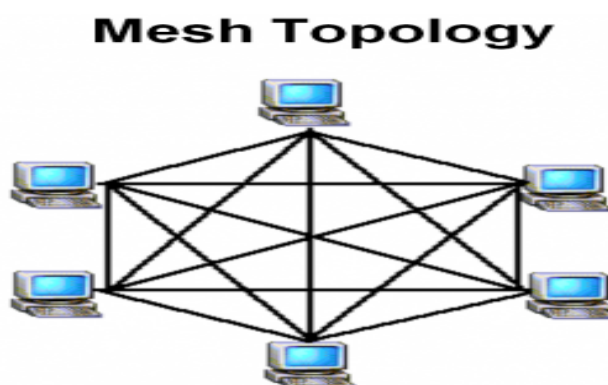


Εικόνα 7: Τοπολογία Spine-Leaf [6]

Συνοψίζοντας, κάποια από τα θετικά της τοπολογίας Spine-Leaf είναι αρχικά, η συνδεσμολογία της, όπου επιτρέπει στο δίκτυο να συνεχίσει να λειτουργεί ομαλά, ακόμα και αν παρουσιαστεί οποιαδήποτε αποτυχία, σε κάποιο από τα μηχανήματα. Αυτό συμβαίνει, διότι η επικοινωνία συνεχίζει να υπάρχει μέσω των υπολοίπων μηχανών. Ακόμα ένα πλεονέκτημά της είναι η χαμηλή καθυστέρηση της (latency), καθώς για την μεταφορά οποιουδήποτε πακέτου από έναν server σε έναν άλλον χρειάζονται μόνο 2 εναλλαγές εξοπλισμού (hops). Τέλος, στα θετικά της συγκαταλέγεται και η ικανότητα της να εκμεταλλευτεί στο μέγιστο όλες τις θύρες ενός Switch, βοηθώντας έτσι στην μείωση του εξοπλισμού σε ένα κέντρο δεδομένων. [7]

### 2.3.3 Τοπολογία Mesh(Πλέγμα)

Η τοπολογία mesh ξεχωρίζει από το πλήθος των συνδέσεων της, αφού κάθε μηχανήμα του δικτύου συνδέεται κατευθείαν με όλα τα υπόλοιπα, δημιουργώντας ένα πλήρες συνδεδεμένο δίκτυο χωρίς επίπεδα.



Εικόνα 8: Τοπολογία Mesh (<https://www.theinfozones.com/2015/03/what-is-mesh-topology-and-its.html>)

Η χρήση της προσφέρει ασφάλεια, λόγω των μοναδικών συνδέσεων, τις υψηλές αποδόσεις και ταχύτητες, διότι δεν υπάρχει διαμοιρασμός κάποιας σύνδεσης, αλλά και ανεκτικότητα σε λάθη, καθώς υπάρχουν περισσότερες από μία διαδρομές από κάθε συσκευή προς τις υπόλοιπες. Από την άλλη πλευρά όμως, εάν χρησιμοποιηθεί σε ένα αρκετά μεγάλο δίκτυο, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κόστους, υποδομών και πολυπλοκότητας στην διαχείριση της. Ένας τόσο μεγάλος αριθμός καλωδίων, χρειάζεται και τον κατάλληλο χώρο για να εγκατασταθεί, αλλά και την αντίστοιχη διαχείριση. Τέλος, μπορεί να δυσκολέψει κατά ένα ποσοστό στον εντοπισμό κάποιου λάθους, μιας και έχει τόσες πολλές συνδέσεις και όχι κάποια κομβικά σημεία διασύνδεσης.

## **2.4 Ασφάλεια στα κέντρα δεδομένων**

Η ασφάλεια των κέντρων δεδομένων αναφέρεται σε πρωτόκολλα και μέτρα ασφαλείας που εφαρμόζονται, τόσο για την φυσική όσο και την ψηφιακή προστασία εξοπλισμού και δεδομένων αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα ,έχοντας πλέον, έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στην διαχείριση και φιλοξενία δεδομένων, τα κάνει στόχο πολλών δικτυακών επιθέσεων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάγκη μεγαλύτερης ασφάλειας για την αντιμετώπιση και πρόληψη των προβλημάτων.

### **2.4.1 Φυσική ασφάλεια**

Η φυσική ασφάλεια ενός κέντρου δεδομένων εστιάζει στην προστασία εγκαταστάσεων και εξοπλισμού από φυσικής άποψης, εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την ομαλή λειτουργία του. Ξεκινώντας εξωτερικά, υπάρχουν συστήματα παρακολούθησης και ελεγχόμενοι είσοδοι από φυσικά πρόσωπα (φύλακες). Συνεχίζοντας εσωτερικά, υπάρχουν κάμερες ασφαλείας, αισθητήρες κίνησης, αισθητήρες θερμοκρασίας, συστήματα πυρασφάλειας καθώς και εξαερισμοί. Τέλος, ο περισσότερος εξοπλισμός, όπως οι server και τα switch, είναι κλειδωμένοι μέσα στα rack, χρησιμοποιώντας από τα πιο απλά μέχρι και τα πιο περίπλοκα μέσα. [9]

### **2.4.2 Ασφάλεια δικτύου και δεδομένων**

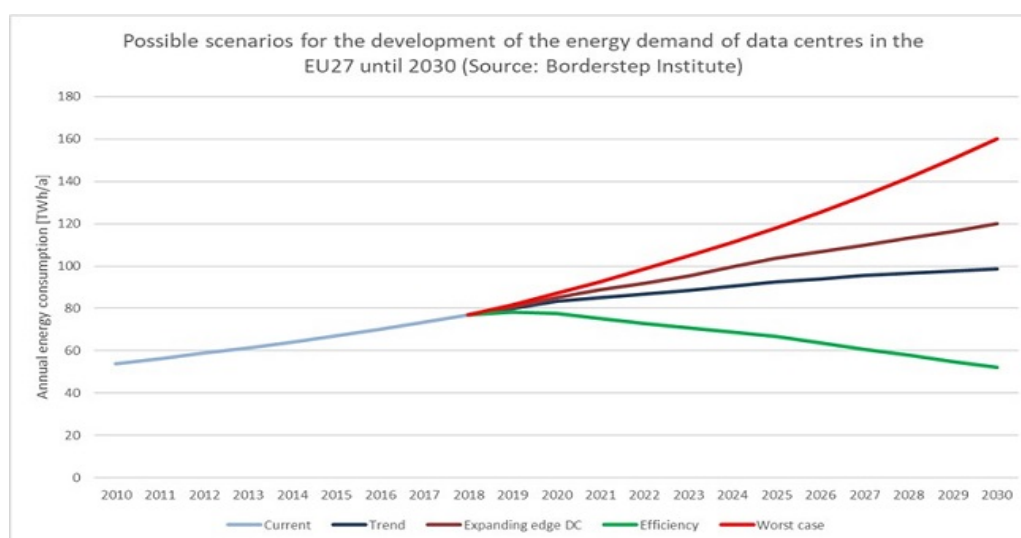
Πέραν από την φυσική ασφάλεια ενός κέντρου, υπάρχει η ανάγκη για παρουσία ασφαλείας στο γενικότερο δίκτυο και τις επικοινωνίες του. Αρχικά, μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται, είναι η τμηματοποίηση του δικτύου (network segmentation), όπου το δίκτυο χωρίζεται σε διαφορετικές ζώνες, από τις οποίες η κάθε μία έχει δικά της πρωτόκολλα ασφαλείας και σημεία πρόσβασης, κάτι το οποίο βοηθάει στον περιορισμό κάποιας πιθανής εισβολής στο σύστημα ενός κέντρου. Έπειτα, μία αρκετά διαδεδομένη τεχνική ασφαλείας, είναι το VPN (Virtual Private Network) το οποίο, σε συνδυασμό με τα Firewall, τα οποία εγκαθίστανται με σκοπό τον έλεγχο όλης της εσωτερικής ή εξωτερικής κίνησης και την ανίχνευση κάποιας μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης, επιτυγχάνεται η ασφαλή, απομακρυσμένη σύνδεση στο δίκτυο του κέντρου. Συνοψίζοντας, για την επίτευξη της ασφαλούς επικοινωνίας όλου του εξοπλισμού, χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα κρυπτογράφησης, όπως είναι το SSL (Secure Sockets Layer) και το TLS (Transport Layer Security). [8]



## 2.5 Πράσινα κέντρα δεδομένων

Ταυτόχρονα με την αύξηση χρήσης του διαδικτύου και την ανάγκη για περισσότερους πόρους, αυξήθηκε και η περιβαλλοντική επιβάρυνση του πλανήτη. Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν, τα κέντρα δεδομένων χρησιμοποιούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας, πολλούς υπολογιστικούς πόρους – εξοπλισμό, καθώς και μεγάλες ποσότητες νερού για την διατήρηση της θερμοκρασίας τους σε χαμηλά επίπεδα (τεχνικές ψύξης). Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα, να τείνουν να «βοηθούν» στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, στην υπερθέρμανση του πλανήτη αλλά και την απώλεια νερού τοπικών κοινοτήτων. Το 2014 στις ΗΠΑ, τα κέντρα δεδομένων κατανάλωσαν σχεδόν το 2% της συνολικής ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, κατανάλωση η οποία ισοδυναμεί με περίπου 6,4 εκατομμύρια νοικοκυριά. [10][11]

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, τα τελευταία χρόνια τα κέντρα δεδομένων έχουν ξεκινήσει να γίνονται «πράσινα», αφού με την έννοια «πράσινα» εννοείται η φιλικότερη σχέση τους με το περιβάλλον. Τα πράσινα κέντρα δεδομένων, λοιπόν, με την υπευθυνότητα τους απέναντι στο περιβάλλον, έχουν μία μεγάλη επίδραση στον τομέα, αφού χρησιμοποιώντας ολοένα και μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, αλλά και καινοτόμες τεχνικές ψύξης, ελαχιστοποιούν το διοξειδίου του άνθρακα που παράγουν. Επιπλέον, με την κατάλληλη επιλογή μηχανημάτων που είναι σχεδιασμένα να παράγουν μικρότερη κατανάλωση και με περισσότερους εικονικούς σταθμούς (VMs), καταφέρνουν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας τους. Με αυτές τις αλλαγές, μπορούμε να πούμε πως τα πράσινα κέντρα δεδομένων, προσπαθούν να συμβάλουν στην βελτίωση του περιβάλλοντος και στην ομαλή συνύπαρξη τους με αυτό. [10][11]



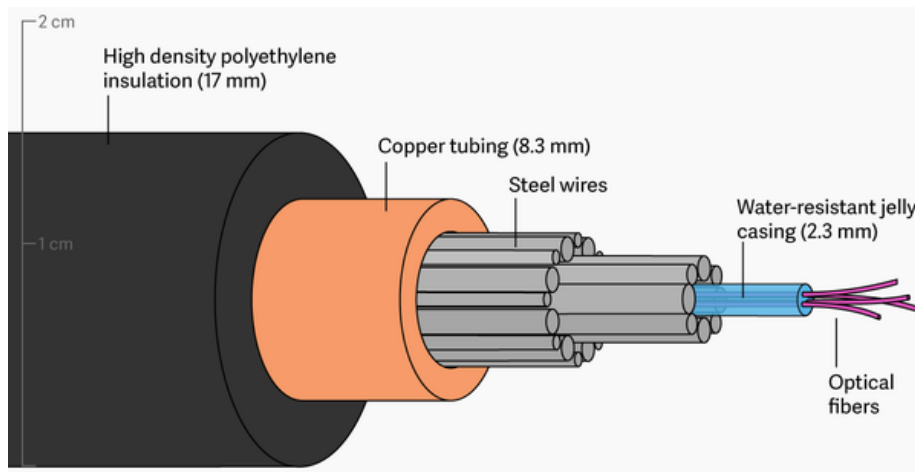
Εικόνα 9: Ετήσια Κατανάλωση ενέργειας κέντρων δεδομένων και πιθανά μελλοντικά σενάρια ανάλογα τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν [12]

## Κεφάλαιο 3 : Οπτικές τεχνολογίες στα κέντρα δεδομένων

### 3.1 Ιστορία των οπτικών επικοινωνιών

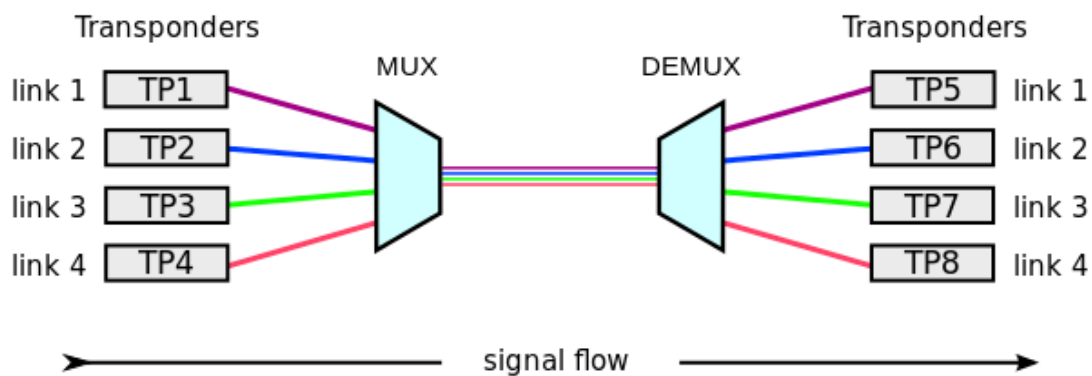
Το έτος 1960, η εφεύρεση των οπτικών ινών, σήμανε την έναρξη μίας νέας εποχής στις επικοινωνίες και τα δίκτυα, καθώς πλέον ήταν εφικτό να επιτευχθεί επικοινωνία μέσω σημάτων φωτός, εντός καλωδίων σε μεγάλες αποστάσεις, με τους Charles K. Kao και George A. Hockham's να ήταν τα δύο πρόσωπα που έβαλαν τις βάσεις για την δημιουργία αυτών των καλωδίων (οπτικές ίνες). Στις επόμενες δεκαετίες, διάφοροι ερευνητές σημείωσαν μεγάλη πρόοδο στην βελτίωση αυτής της τεχνολογίας, η οποία οδήγησε στην δημιουργία οπτικών πομπών και δεκτών, ικανών να μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα, σε οπτικά και το αντίστροφο. Κάποια χρόνια αργότερα, κατά την δεκαετία του 1990, υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα των οπτικών διασυνδέσεων και επικοινωνιών με την χρήση του Wavelength Division Multiplexing (WDM). Η τεχνολογία αυτή, βοήθησε στην αύξηση της χωρητικότητας και την καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου, διότι πλέον μπορούσε να γίνει συγχώνευση και αποστολή πολλών σημάτων, σε μία γραμμή από την μία μεριά (πολυπλέκτες) και αντίστοιχος διαχωρισμός από την άλλη (αποπολυπλέκτες), ώστε το κάθε σήμα να κατευθυνθεί στον προορισμό του. Αυτή η τεχνική, είχε ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη χρήση του δικτύου, λόγω της καλύτερης εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων του. Επιπροσθέτως, η εμφάνιση του Gigabit Ethernet, σε συνδυασμό με τα προηγούμενα, επιτάχυνε την εγκαθίδρυση των οπτικών ινών στα κέντρα δεδομένων, καθώς και στα τοπικά δίκτυα. Με τις ανάγκες να συνεχίζουν να αυξάνονται, ο οπτικός εξοπλισμός συνέχισε να εξελίσσεται, για να μπορέσει να υποστηρίξει αυτές τις ανάγκες για γρηγορότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη χωρητικότητα. [13]

Όπως θα δούμε παρακάτω, σήμερα τα οπτικά έχουν φτάσει σε ακόμα αποδοτικότερες τεχνολογίες και ταχύτητες, όπως τα 100 Gigabit και τα 400 Gigabit. Έχουν πλέον, μικρότερο μέγεθος, καταναλώνουν μικρότερες ποσότητες ενέργειας, αλλά και την ικανότητα να διαχειριστούν κάθε δικτυακό περιβάλλον, όπως κέντρα δεδομένων, δίκτυα δεδομένων μεγάλης κλίμακας, δίκτυα υψηλών αποδόσεων (high-performance computing environments) και cloud τεχνολογίες. Ωστόσο, η αναζήτηση για την βελτίωση τους, δεν έχει σταματήσει, καθώς νέες τεχνολογίες, όπως τα co-packaged optics και οι ταχύτητες Terabit Ethernet μελετώνται. Με λίγα λόγια, η ιστορία των οπτικών εξοπλισμών αναφέρεται στην επανάσταση που επέφερε στον τομέα των επικοινωνιών, δημιουργώντας ένα αποδοτικότερο και πιο αξιόπιστο δίκτυο μεγαλύτερων ταχυτήτων που εξελίσσεται συνεχώς.



Εικόνα 10 :Περιεχόμενο Οπτικής ίνας. (<https://www.fastmetrics.com/blog/tech/fiber-optic-cables-how-they-work/>)

## wavelength-division multiplexing (WDM)



Εικόνα 11: Οπτική διάταξη WDM [21]

### 3.2 Τύποι οπτικών ινών

#### 3.2.1 Μονότροπες οπτικές ίνες

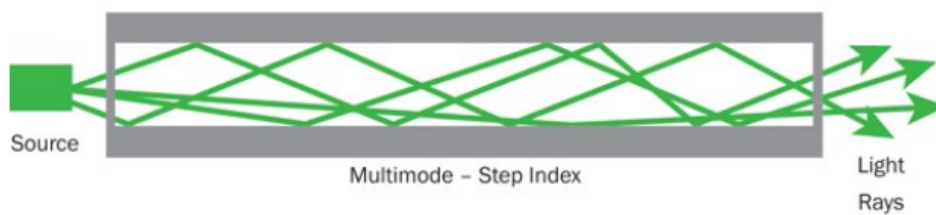
Μονότροπες οπτικές ίνες, είναι ένας τύπος οπτικής ίνας, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για να μεταφέρει μία μόνο ακτίνα φωτός. Χρησιμοποιείται ευρέως στους τομείς της τηλεπικοινωνίας και των εφαρμογών δικτύου, για την μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, με ελάχιστες απώλειες και υψηλό εύρος ζώνης. [42]



Εικόνα 12 : Μονότροπη οπτική ίνα [42]

### 3.2.2 Πολύτροπες οπτικές ίνες

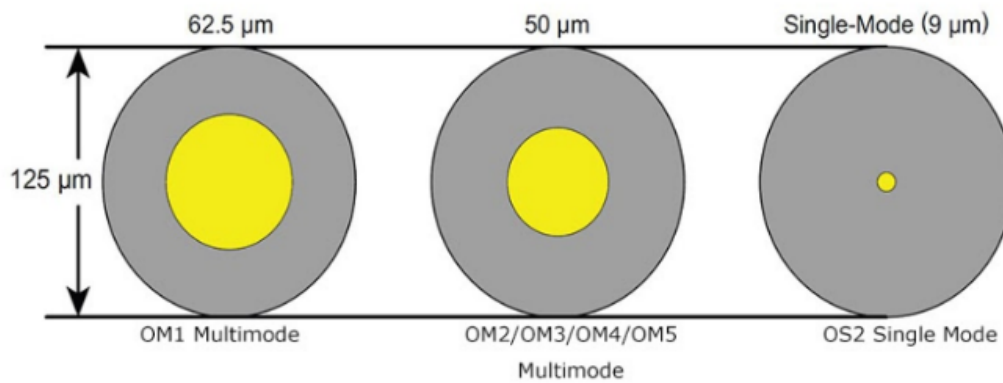
Πολύτροπες οπτικές ίνες, ονομάζονται αυτές οι οποίες, αντίθετα από τις μονότροπες, επιτρέπουν την είσοδο πολλών σημάτων φωτός ταυτόχρονα και ασύμμετρα. Χρησιμοποιούνται εξίσου σε όλους τους τομείς, με την κύρια διαφορά τους να εντοπίζεται στο ότι είναι κατάλληλες για μικρότερες αποστάσεις, λόγω του χαμηλότερου εύρους ζώνης και της μικρότερης χωρητικότητας. Ο κύριος λόγος που συμβαίνουν αυτά, είναι ότι κάθε ακτίνα φωτός εισέρχεται στην οπτική ίνα από διαφορετική γωνία, με αποτέλεσμα να ακολουθεί διαφορετική διαδρομή και να υπάρχουν καθυστερήσεις. [42]



Εικόνα 13: Πολύτροπη οπτική ίνα [42]

9/125 Single Mode Fiber Simplex		50/125 OM3 Multimode Fiber	
Attenuation at 1310nm	0.36 dB/km	Attenuation at 850 nm	3.0 dB/km
Attenuation at 1550nm	0.22 dB/km	Attenuation at 1300 nm	1.0 dB/km

Εικόνα 14 : Χαρακτηριστικά των 2 κατηγοριών [42]

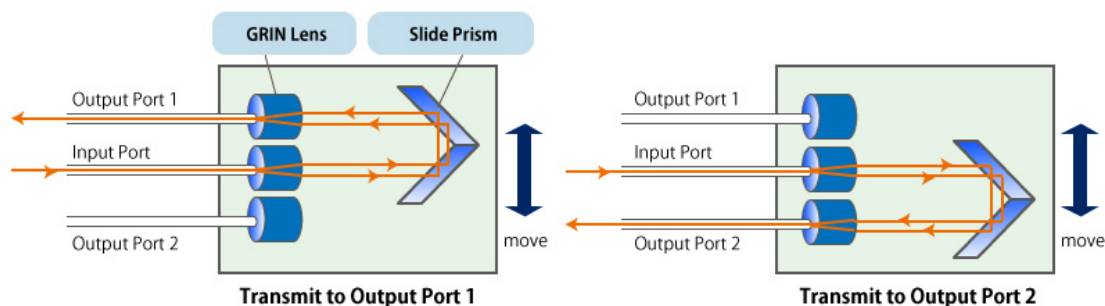


Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά οπτικών ινών ανάλογα τον τύπο [42]

### 3.3 Τύποι Οπτικών Switch

#### 3.3.1 Μηχανικά οπτικά Switch

Μηχανικά οπτικά Switch (Mechanical optical switches) ονομάζονται αυτά που χρησιμοποιούν μηχανικά εξαρτήματα, για την αναμετάδοση και αναδιανομή του σήματος. Με την κίνηση αυτών των εξαρτημάτων, ελέγχουν την κίνηση του δικτύου, καθώς έτσι έχουν την δυνατότητα να αλλάξουν την πορεία του σήματος και να το στείλουν στην ανάλογη πόρτα εξόδου. Κάποια από τα πλεονεκτήματά τους είναι, ότι προσφέρουν χαμηλή απώλεια σήματος κατά την εισαγωγή του στο καλώδιο (insertion loss), μεγάλη αξιοπιστία και συμβατότητα με ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. [14][16]



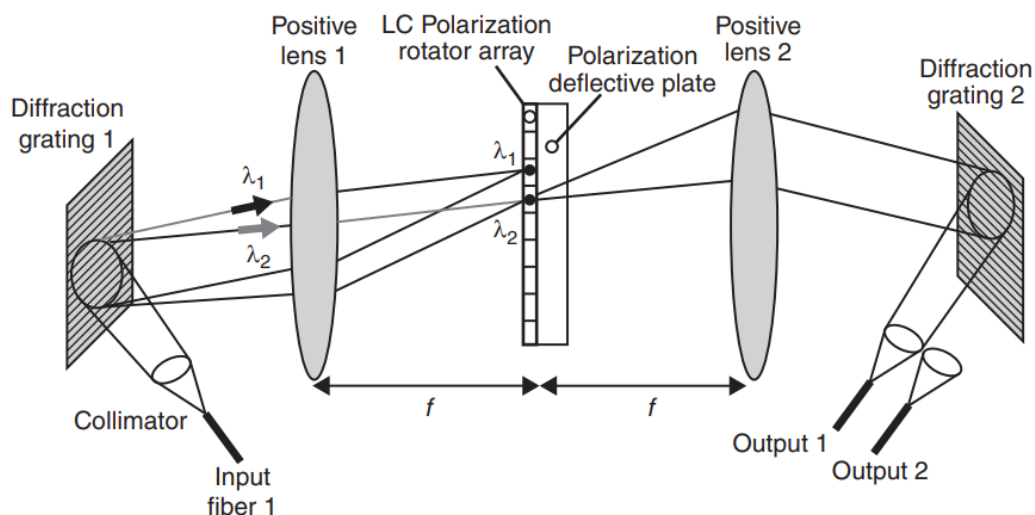
Εικόνα 16: Λειτουργία Μηχανικών οπτικών Switch [16]

#### 3.3.2 Μικροηλεκτρονικά μηχανικά Switch (MEMS-Switch)

Στην κατηγορία αυτή, εντάσσονται τα Switch, τα οποία είναι βασισμένα σε μικροηλεκτρονικά μηχανικά συστήματα, τα οποία διαχειρίζονται τα εξαρτήματα που είναι υπεύθυνα για την ανακατεύθυνση του σήματος, στην αντίστοιχη έξοδο. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιούνται καθρέπτες πολύ μικρού μεγέθους, οι οποίοι μετακινούνται με μαγνητική ή ηλεκτρική ενέργεια, για να δημιουργήσουν τις κατάλληλες οπτικές συνδέσεις εισόδου – εξόδου. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους, είναι το ότι είναι εύκολα επεκτάσιμα, έχουν χαμηλή απώλεια σήματος, δεν είναι ογκώδη και έχουν υψηλές ταχύτητες εναλλαγής. Βέβαια, παρόλα τα θετικά τους χαρακτηριστικά, έχουν σημαντικά υψηλό κόστος παραγωγής. Τέλος, η χρήση τους μπορεί να γίνει σε συστήματα OXC (Optical Cross Connect). [15][16]

### 3.3.3 Liquid-Crystal Switch (LC)

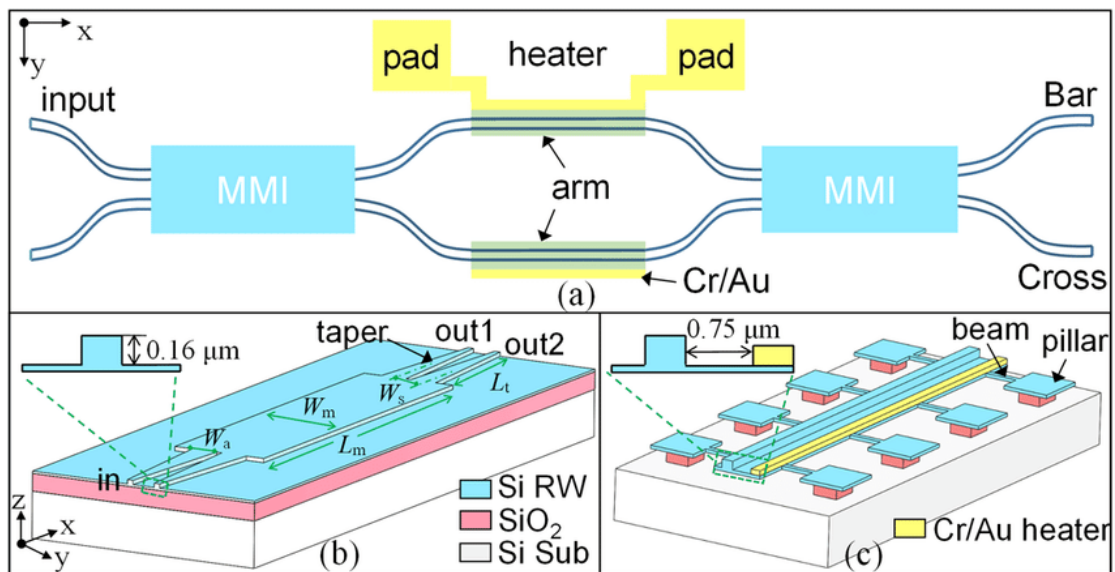
Τα Switch υγρών κρυστάλλων, χρησιμοποιούν τις ιδιότητες των υγρών κρυστάλλων, για να ελέγξουν τις ανακλάσεις του φωτός, ενώ βασίζονται στην αντίδραση των κρυστάλλων στα ηλεκτρικά πεδία. Έτσι, μπορούν να χειριστούν τις ιδιότητες του φωτός (πόλωση, δείκτης διάθλασης). Προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως οι υψηλοί ρυθμοί απόκρισης, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το συμπακνωμένο μέγεθός τους. Τέλος, προτιμώνται στις οπτικές τηλεπικοινωνίες, στην επεξεργασία οπτικού σήματος και σε τεχνολογίες προβολής (display technologies), επιτρέποντας αποτελεσματική δρομολόγηση, διαμόρφωση και τον έλεγχο του σήματος. [17]



Εικόνα 17: Τρόπος λειτουργίας LC Switch [17]

### 3.3.4 Thermo-optical Switch

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες κατηγορίες οπτικών Switch, έτσι και σε αυτήν εξετάζεται ο τρόπος επεξεργασίας και δρομολόγησης του οπτικού σήματος. Τα οπτικά αυτά switch, εκμεταλλεύονται την επίδραση που μπορεί να έχει η αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα υλικά, τα οποία θα βοηθούν στην εναλλαγή εκπομπής και αντανάκλασης των σημάτων φωτός που λαμβάνονται. Ένας από τους γνωστότερους τύπους αυτού του είδους, είναι τα Mach-Zehnder Thermo-optic Switches (MZI), τα οποία χρησιμοποιούν την θερμοκρασία, για να αλλάξουν την συχνότητα του σήματος, ανάλογα με το ποια πόρτα εξόδου πρέπει να επιλέξει. Τέλος, αυτή η κατηγορία εφαρμόζεται σε αρκετούς τομείς, όπως στην δρομολόγηση, στην πολυπλεξία και την μεταγωγή στα οπτικά δίκτυα. [18]

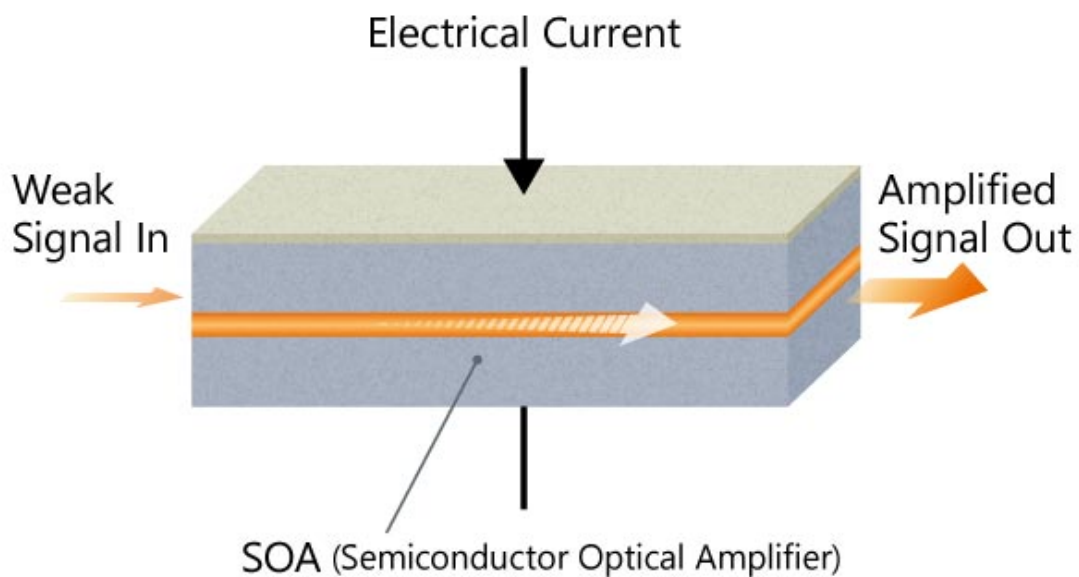


Εικόνα 18: MMI-MZI Thermo-optic Switch [18]



### 3.3.5 Switch οπτικών ενισχυτών ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier switch-SOAs)

Σε αυτή την κατηγορία των Switch, πρωταγωνιστικό ρόλο έχουν οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την δρομολόγηση του σήματος, γεγονός που επιτυγχάνεται με την ρύθμιση του ηλεκτρικού ρεύματος, που παρέχεται στον ενισχυτή, για την ευκολότερη διαχείριση των επιπέδων ενίσχυσης του. Τα SOA Switch έχουν δύο λειτουργίες, η πρώτη (transparent mode) είναι πιο παθητική, καθώς η μοναδική της ιδιότητα είναι να ενισχύει απλά το σήμα μέσω του ενισχυτή. Η δεύτερη λειτουργία (gate mode) χρησιμοποιεί περισσότερες δυνατότητες του ενισχυτή, καθώς ενισχύοντας ή αποδυναμώνοντας το σήμα, επιτρέπει ή αποτρέπει αντίστοιχα την διόδο του σήματος. Τα πλεονεκτήματά τους είναι το συμπαγές τους μέγεθος, οι γρήγορες εναλλαγές ταχυτήτων και η ευρυζωνικότητά τους. Καταλήγοντας, η χρήση τους γίνεται σε οπτικά δίκτυα. [19]

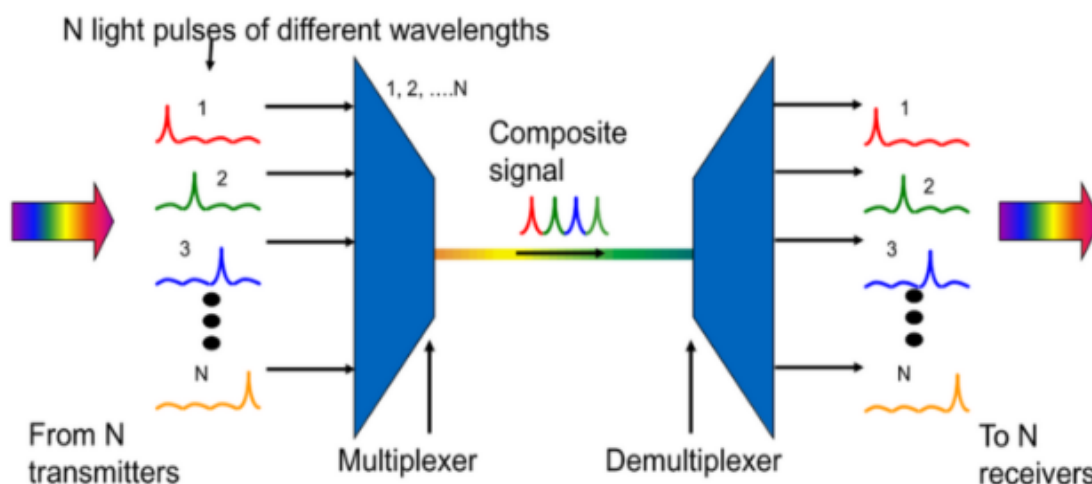


Εικόνα 19 : Ενισχυτής οπτικού ημιαγωγού (SOA). [19]

### 3.4 Οπτικές Διατάξεις

#### 3.4.1 Οπτικοί Πολυπλέκτες-Αποπολυπλέκτες(Mux-Demux)

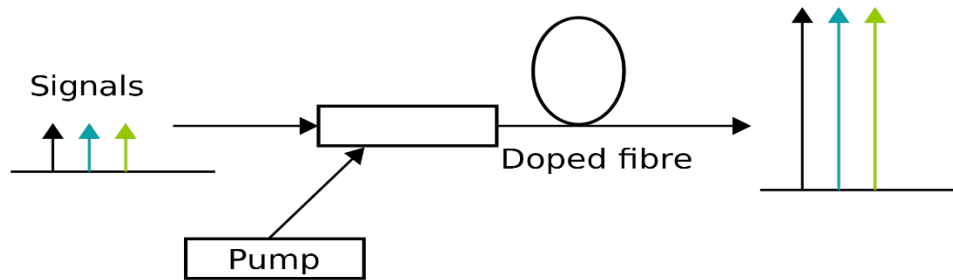
Οι οπτικοί πολυπλέκτες είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, για να μετατρέπουν πολλά κανάλια οπτικού σήματος σε ένα και το αντίθετο. Είναι πλέον, αναπόσπαστο κομμάτι στα δίκτυα οπτικών ινών καθώς χάρη σε αυτούς έχουν αυξηθεί η χωρητικότητα και η αποδοτικότητα των δικτύων.



Εικόνα 20 : Πολυπλέκτης – Αποπολυπλέκτης (<https://www.chinacablesbuy.com/guide-cwdm-muxdemux-system-installation.html>)

#### 3.4.2 Οπτικοί Ενισχυτές (Optical Amplifiers)

Ένα άλλο πολύ σημαντικό εργαλείο των οπτικών δικτύων, είναι οι οπτικοί ενισχυτές. Η κύρια λειτουργία τους είναι η ενίσχυση των σημάτων φωτός που ταξιδεύουν στην οπτική ίνα, με το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους να είναι η μη αναγκαία μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό. Ο λόγος χρήσης τους είναι η αντιμετώπιση του φαινομένου εξασθένησης των οπτικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται αμέσως μετά την εκκίνηση του σήματος από τον πομπό, αλλά πολλές φορές είναι αναγκαία η χρήση τους και σε ενδιάμεσα σημεία της οπτικής.



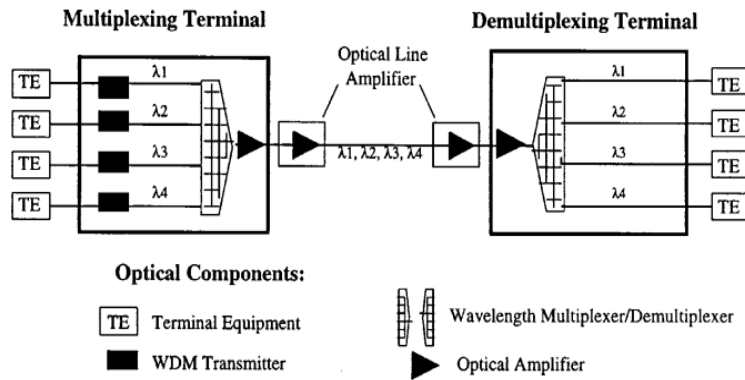
Εικόνα 21: Διάγραμμα οπτικού ενισχυτή

([https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_amplifier#/media/File:Doped\\_fibre\\_amplifier.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_amplifier#/media/File:Doped_fibre_amplifier.svg))

### 3.4.3 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM)

Η Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος είναι μία δικτυακή οπτική τεχνολογία η οποία έφερε την επανάσταση στην μεταφορά δεδομένων μέσω των οπτικών ινών. Με την εκμετάλλευση των διαφόρων μηκών κύματος φωτός, επιτρέπεται η αποστολή πολλών σημάτων, μέσω της ίδιας οπτικής ίνας. Κάθε σήμα είναι ξεχωριστό και τελείως διαφορετικό με τα υπόλοιπα, έτσι επιτρέπεται η παράλληλη μετάδοση σήματος, γεγονός που βοηθάει στην αύξηση της χωρητικότητας και του εύρους ζώνης του δικτύου.

Ένα άλλο κομμάτι το οποίο δέχεται θετική επιρροή από την συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η απόσταση. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος για κάθε σήμα, βοηθάει στην σημαντική μείωση της εξασθένισης τους σήματος, αλλά και στην αντιμετώπιση του φαινομένου της διασποράς του. Επιπροσθέτως, έχοντας την δυνατότητα να προσθέσει ή να αφαιρέσει ανά πάσα στιγμή ένα «κανάλι» επικοινωνίας, βοηθάει στην ευκολότερη διαχείριση και αναπροσαρμογή ενός δικτύου ανάλογα με τις απαιτήσεις του. [21][22][23]



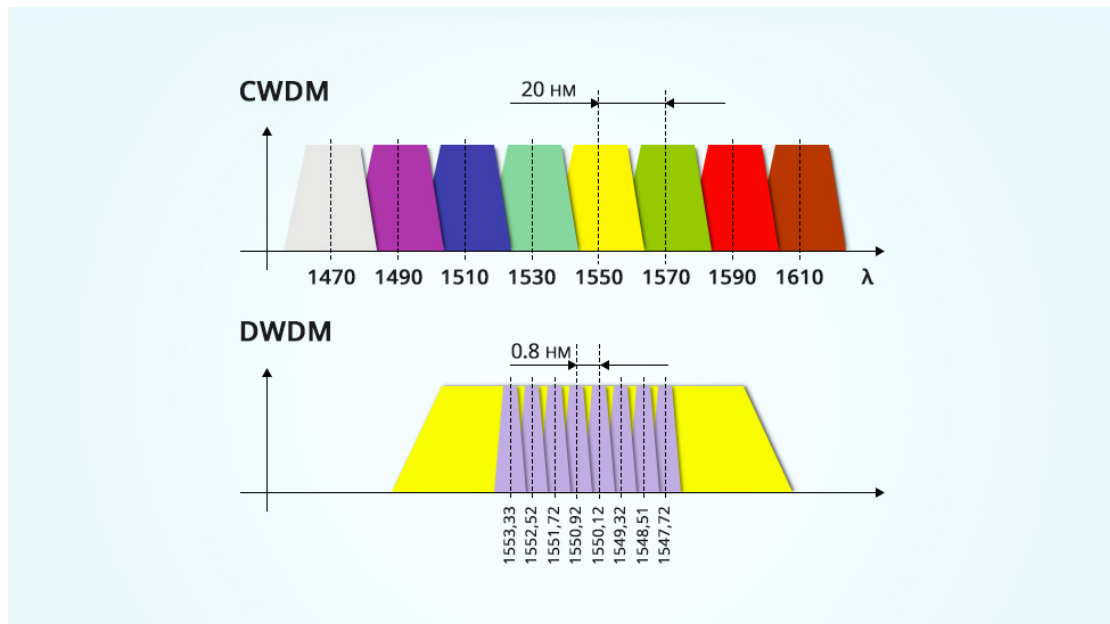
Εικόνα 22: Ένα σύστημα πολυπλεξίας μήκους κύματος 4 καναλιών με ενισχυτές [22]

### 3.4.3.1 Πολυπλεξία με χονδροειδή διαίρεση μήκους κύματος (CWDM)

Η συγκεκριμένη διαδικασία πολυπλεξίας έχει, επίσης, ως αποτέλεσμα την χρήση της οπτικής ίνας από πολλαπλά σήματα φωτός ταυτόχρονα. Βέβαια, αυτό συμβαίνει με κάποιες παραλλαγές σε σχέση με το WDM. Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται είναι μεγαλύτερα (από 20 μέχρι 18 nm), προσφέροντας έτσι, περισσότερη απλότητα και χαμηλότερα κόστη (εξοπλισμός κλπ.), κάνοντας τα CWDM συστήματα ιδανικά για δίκτυα και εφαρμογές μικρότερου βεληνεκούς. Τέλος, στα αρνητικά θα μπορούσαμε να κατατάξουμε, ότι σε σχέση με το WDM δεν μπορεί να καλύψει μεγάλες αποστάσεις.

### 3.4.3.2 Πολυπλεξία με πυκνή διαίρεση μήκους κύματος (DWDM)

Η τεχνολογία DWDM είναι η εξέλιξη του WDM, η οποία συνέβη για τις ανάγκες των σημερινών δικτύων (ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χωρητικότητα). Η εξέλιξη έλαβε χώρα αφού χρησιμοποιώντας μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των κυμάτων (κοντά στα 0.8 nm), εκμεταλλεύεται στο έπακρο την οπτική ίνα για την μεταφορά κάθε είδους σήματος, από το πιο απλό μέχρι και το πιο απαιτητικό, ακόμα και σε αποστάσεις >500km. Ωστόσο, λόγω του αυξημένου κόστους τους, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας και ζεύξεις αστικών κέντρων.



Εικόνα 23: Διαφορά CWDM -DWDM στην απόσταση μηκών κύματος (<https://community.fs.com/blog/what-is-the-difference-between-dwdm-and-cwdm-optical-technologies.html>)

### 3.5 Οπτικές διατάξεις στα κέντρα δεδομένων

#### 3.5.1 Υιοθέτηση των οπτικών ινών στα κέντρα δεδομένων

Η χρήση των οπτικών ινών στα κέντρα δεδομένων, ξεκίνησε γύρω στο 1980, αντικαθιστώντας, μερικώς, αρχικά τον εξοπλισμό της εποχής (καλώδια χαλκού), αφού ο τελευταίος είχε αρχίσει να φτάνει τα όρια του σε θέματα απόδοσης. Στην αρχή, η χρήση τους έγινε σε μεγαλύτερα και πιο απαιτητικά κέντρα, όπου υπήρχε η αντίστοιχη ανάγκη. Αργότερα όμως, και καθώς η τεχνολογία αυτή γινόταν πιο ώριμη και προσιτή από οικονομικής άποψης, ξεκίνησε να εξαπλώνεται στον τομέα των δικτύων. Προσφέροντας τεράστιες αλλαγές και πλεονεκτήματα, δεν άργησαν να αποτελούν την καλύτερη επιλογή για κάθε δίκτυο. Πλέον, είναι ένα από τα βασικά κομμάτια εξοπλισμού για τα σημερινά κέντρα δεδομένων.

## Fiber vs. Copper

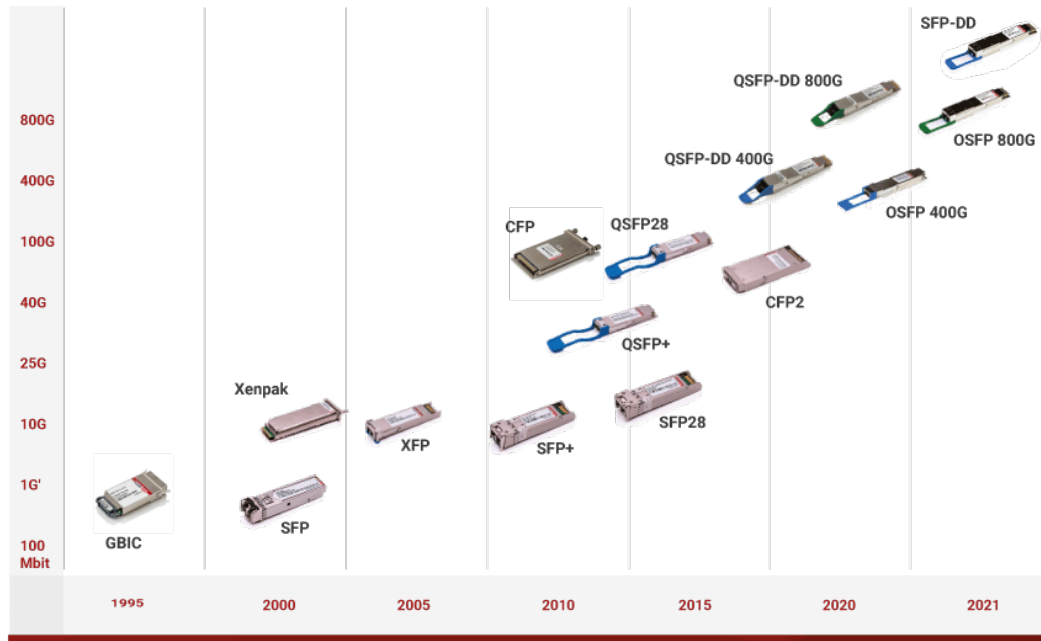
	Fiber	Copper
<b>Bandwidth</b>	10-Gigabit and beyond	Gigabit
<b>Future-proof</b>	Evolving towards the desktop	CAT7 under development
<b>Distance</b>	40 km+ @ 10,000 Mbps	100 m @ 1000 Mbps
<b>Noise</b>	Immune	Susceptible to EMI/RFI interference crosstalk, and voltage surges
<b>Security</b>	Almost impossible to tap	Susceptible to tapping
<b>Handling</b>	Lightweight, thin diameter Strong pulling strength	Heavy, thicker diameter Strict pulling specifications

Εικόνα 24: Σύγκριση οπτικής ίνας με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιούταν προηγουμένως. (<https://www.fiber-optical-networking.com/application-fiber-desk-fttd.html/optical-cable-vs-rj45-ethernet-cable>)

### 3.5.2 Οπτικοί Πομποδέκτες (Optical Transceivers)

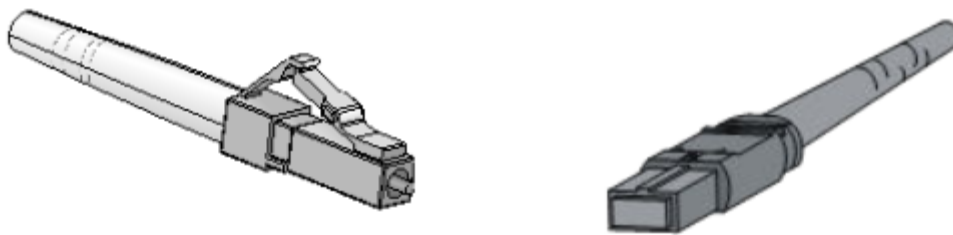
Οι οπτικοί πομποδέκτες αποτελούν πολύ σημαντικό ρόλο στα κέντρα δεδομένων, καθώς είναι αυτοί που επιτρέπουν την μετάδοση δεδομένων μέσω των οπτικών ινών. Αυτές οι συσκευές χρησιμεύουν ως συνδετικός κρίκος, μεταξύ των ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων, μετατρέποντας τα δεδομένα σε οπτική μορφή για την μετάδοση και το αντίθετο. Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σαν πομποί και ως δέκτες ταυτόχρονα.

Η μορφή τους (Form Factors) διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες και τις ταχύτητες που πρέπει να καλύψουν στο εκάστοτε δίκτυο. Κάποιες από τις πιο συνήθεις είναι οι SFP (Small Form-Factor Pluggable), οι SFP+, οι QSFP, οι QSFP+, οι CFP, οι CFP2 και οι CFP4. Οι κύριες διαφορές αυτών των μοντέλων είναι το μέγεθος, η κατανάλωση ενέργειας και ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων. Με το τελευταίο να είναι το πιο σημαντικό, οι ταχύτητες κυμαίνονται από μερικά Mbits σε Tbits, ανάλογα με το εκάστοτε μοντέλο. [24][25][26]



Εικόνα 25: Εξέλιξη οπτικών πομποδεκτών (<https://www.prooptix.com/news/transceiver-form-factors/>)

Η μετάδοση που μπορεί να επιτευχθεί από τους οπτικούς πομποδέκτες, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με βασικότερο τον τύπο τους (μονής ή πολλαπλής λειτουργίας), τον τύπο οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται ή την ποιότητα του λοιπού οπτικού εξοπλισμού. Οι πομποδέκτες μονής λειτουργίας είναι κατάλληλοι για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ οι πολλαπλών λειτουργιών είναι σχεδιασμένοι για μικρότερες. Επίσης, υπάρχουν πομποδέκτες CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) και DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), που επιτρέπουν την πολυπλεξία πολλαπλών μηκών κύματος, σε μία μόνο ίνα. Για την σύνδεση τους με την οπτική ίνα, χρησιμοποιούνται διάφορες οπτικές υποδοχές (fiber-optic connectors), όπως τους LC (Lucent Connector) και τους MPO (Multi-fiber Push-on) με τους πρώτους να υποστηρίζουν την μετάδοση μίας κατεύθυνσης. [24][25][26]



Εικόνα 26: Lucent Connector (αριστερά) , MPO Connector (δεξιά) [26]

Όσον αφορά το κομμάτι της συμβατότητας, πλέον, ακολουθούνται τα βιομηχανικά πρότυπα και πρωτόκολλα, διασφαλίζοντας έτσι, την ομαλή συνεργασία με κάθε είδος εξοπλισμού δικτύου από διαφορετικούς προμηθευτές. Αυτό, άλλωστε, είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους, η δυνατότητα δηλαδή εναλλαγής τους, η οποία επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση ή αντικατάσταση, χωρίς καμία διακοπή στην λειτουργία του εξοπλισμού. Παρά ταύτα, οι συνεχόμενες εξελίξεις στην τεχνολογία των οπτικών πομποδεκτών συνεχίζουν να πιέζουν τα όρια, επιτρέποντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης και βελτιωμένη απόδοση ισχύος σε περιβάλλοντα κέντρων δεδομένων. Συμπερασματικά, οι οπτικοί πομποδέκτες αποτελούν, πλέον, αναγκαίο εξοπλισμό για τα κέντρα δεδομένων, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό, την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων και μεταδόσεων πολλών χιλιομέτρων.

### 3.5.3 Προκλήσεις – όρια των οπτικών πομποδεκτών στα κέντρα δεδομένων

Σύμφωνα με μελέτες, η εσωτερική κυκλοφορία πακέτων μεταξύ των διακομιστών ενός κέντρου δεδομένων, υπολογίζεται στο ποσοστό του 71% της συνολικής τους κίνησης, καθώς και στο ποσοστό του 14% της συνολικής κίνησης των κέντρων δεδομένων . Τα νούμερα αυτά, είχαν ως αποτέλεσμα την όλο και μεγαλύτερη ζήτηση κατάλληλου οπτικού εξοπλισμού για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Από το έτος 2018 μέχρι και το έτος 2024, προβλέπεται η συνολική αύξηση της αντίστοιχης αγοράς του οπτικού εξοπλισμού στα 7 δισεκατομμύρια δολάρια . Ο οπτικός αυτός εξοπλισμός, είναι βασισμένος στην τεχνολογία Ethernet και ονομάζεται faceplate-pluggable (FPP) optical modules ή αλλιώς οπτικοί πομποδέκτες στους οποίους αναφερθήκαμε και παραπάνω. Είναι μία τεχνολογία που έχει αρκετά πλεονεκτήματα και λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος, μεταξύ των οπτικών και ηλεκτρικών διεπαφών. Λόγω της εύκολης τοποθέτησης ή αφαίρεσης τους, προσφέρουν ελαστικότητα στον εξοπλισμό του εκάστοτε δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες του, καθώς μπορούν να μετατρέψουν οποιαδήποτε



θύρα ενός switch, σε οπτική ή μη. Ένα άλλο πλεονέκτημα τους που επηρεάζει άμεσα και το κόστος, είναι η σταδιακή ανάπτυξη που μπορούν να προσφέρουν καθώς ανάλογα με τις απαιτήσεις μπορούν να αναβαθμιστούν κατά κύριο λόγο, μεμονωμένα. Ωστόσο, τα όρια αυτής της τεχνολογίας δεν την κάνουν πλέον, την βέλτιστη και αποδοτικότερη επιλογή, φέρνοντας έτσι, στο προσκήνιο την αναζήτηση νέων λύσεων. Κάποιες από τις κύριες προκλήσεις της όσον αφορά τις μεγαλύτερες αποδόσεις είναι το κόστος, η κατανάλωση ενέργειας, τα θέματα χώρου στο Rack, αλλά και η αδυναμία της να ξεπεράσει το όριο των 800G χωρητικότητας (capacity) στο δίκτυο. [24]

Τα τελευταία χρόνια, η άνοδος του cloud computing, η αύξηση χρήση VM μηχανών και η ανάπτυξη ολοένα και περισσότερων εφαρμογών δεδομένων μεγάλης κλίμακας, επιταχύνει τη ζήτηση νέων υποδομών – τεχνολογιών στα κέντρα δεδομένων. Πρότυπα υψηλών ταχυτήτων, όπως τα 10 Gigabit Ethernet, τα 40 Gigabit Ethernet, τα 100 Gigabit Ethernet και τα 400 Gigabit Ethernet είναι πλέον κοινά, ωθώντας στην υιοθέτηση νέων τρόπων μεταγωγής για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων εύρους ζώνης. Πολλές εφαρμογές που τρέχουν σε κέντρα δεδομένων, περιορίζονται σημαντικά, καθώς δεν μπορούν να έχουν τις τεράστιες ποσότητες υπολογιστικών πόρων και υψηλών ταχυτήτων που έχουν ανάγκη. Νέες προτάσεις με σκοπό νέες τεχνολογίες, αρχιτεκτονικές και προγράμματα, γίνονται συνεχώς χωρίς καμία να καταφέρει να διατηρεί την ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους. Σύμφωνα δε, με μελέτες, παρά την μεγάλη αύξηση του κόστους, μεγάλες εταιρείες όπως η Facebook, η Google και η Microsoft, έχουν ακολουθήσει αυτές τις νέες προτάσεις, όπως τις ζεύξεις πολλαπλών μηκών κύματος (multi-wavelength links) . [24]

### **3.6 Οπτική μεταγωγή στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων**

Μετά την αναφορά στα κέντρα δεδομένων, στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται μέσα σε αυτά, αλλά και τις προκλήσεις τους, σειρά έχει η αναφορά σε μία νέα προσέγγιση στον τομέα των δικτύων, των τοπολογιών και της μεταγωγής εσωτερικά σε αυτά, που έχει ως σκοπό την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και την επίτευξη νέων και υψηλότερων αποδόσεων.

Ταυτόχρονα με την ετήσια αύξηση ανάγκης για μεγαλύτερες αποδόσεις, ταχύτητες και εύρος ζώνης αντίστοιχα, παρατηρείται πως αυξάνεται ραγδαία και η ενέργεια που καταναλώνεται από τα κέντρα δεδομένων. Κάτι τέτοιο, έχει τεράστια επίδραση στην συνολική κατανάλωση ενέργειας του πλανήτη, καθώς τα ίδια καταναλώνουν περίπου το 1/3 από αυτήν. Ανανεώσιμες πηγές ή η δημιουργία εγκαταστάσεων σε βορειότερες χώρες με μικρότερες θερμοκρασίες,

φαίνεται πως δεν μπορούν να δώσουν μια ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα. Ωστόσο, πέραν της επίδρασης που έχουν στην ατμόσφαιρα, σημαντική αύξηση δεν παύει να δέχεται και το συνολικό κόστος διαχείρισης ενός κέντρου, με ότι αυτό μπορεί να συνεπάγεται. Τέλος, η καθυστέρηση ή και η απώλεια της πληροφορίας είναι ένα από τα πλέον, συνήθη φαινόμενα, εξαιτίας της υπεραυξημένης κίνησης πακέτων πληροφορίας. [28]

### **3.6.1 Εισαγωγή στα εσωτερικά δίκτυα κέντρων δεδομένων – Electrical Switches**

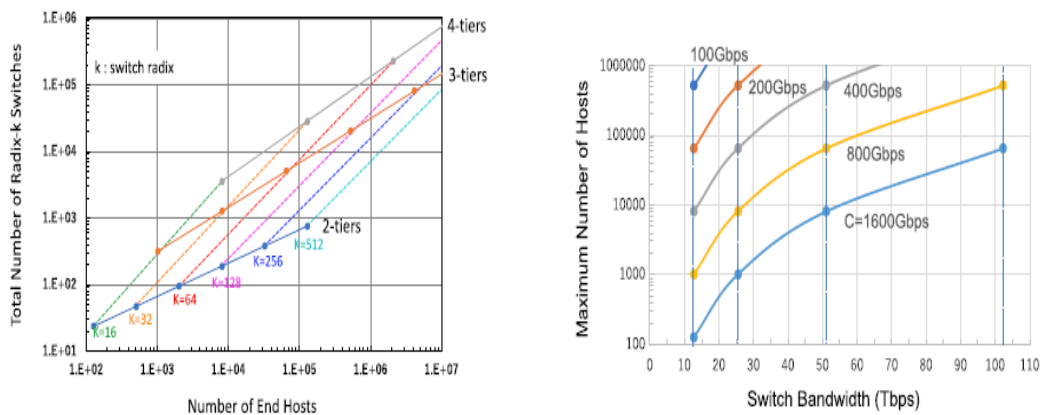
Ένας από τους κυριότερους τομείς των σημερινών κέντρων δεδομένων, είναι το εσωτερικό τους δίκτυο και η επικοινωνία μεταξύ του εξοπλισμού τους. Τον πρώτο λόγο για αυτή την εσωτερική επικοινωνία και την δρομολόγησης της, έχουν τα γνωστά σε όλους μας Switch. Για την ακρίβεια, ηλεκτρικά Switch τα οποία με την βοήθεια διαφόρων άλλων τεχνολογιών (FPP , οπτικές ίνες), εξελίσσονται συνεχώς, προκειμένου να συνεχίσουν να συμβαδίζουν με τις ολοένα και αυξημένες ανάγκες. Πιο συγκεκριμένα, το εσωτερικό δίκτυο συμπεριλαμβάνει switch τριών επιπέδων (3 layer), τα ToR switches, τα aggregation switches και τα core switches, όπου με την κατάλληλη τοπολογία και συνδυασμό, καλύπτουν τις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης. Κάτι τέτοιο συμβαίνει για την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων ή bandwidth. [28]

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται, παράλληλη αύξηση στο bandwidth των switch chips και στην κατανάλωση ενέργειας τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την ανάγκη παρουσίας νέων τεχνολογιών, όπως τα co-packaged optics, τα οποία θα βοηθήσουν στην μείωση αυτής της κατανάλωσης, αλλά και μερικώς στην επίτευξη καλύτερων αποδόσεων (κεφάλαιο 5). Ωστόσο, αν λάβουμε υπόψιν τον νόμο του Moore, με το πέρασμα των χρόνων αυτή η τεχνολογία, ίσως αποδειχθεί ανεπαρκής στον επόμενο διπλασιασμό ενέργειας και απόδοσης.

#### **3.6.1.1 Folded Clos: κυρίαρχη τοπολογία και προκλήσεις**

Η τοπολογία, η οποία φαίνεται να κυριαρχεί στα σημερινά κέντρα δεδομένων, είναι η Folded Clos (παραλλαγή Fat-tree). Μεγάλη συμβολή στην επιλογή της, έχει η δυνατότητα που προσφέρει για την δημιουργία δικτύων μεγάλης κλίμακας από πανομοιότυπα switch chips, με σημαντικές μειώσεις στα κόστη. Σύμφωνα με μελέτες, σε μία τέτοια αρχιτεκτονική ο αριθμός πολλών παραγόντων της εσωτερικής επικοινωνίας, όπως τα συνολικά switches, οι εσωτερικές συνδέσεις αλλά και ο αριθμός των hosts ορίζονται από κάποιες ιδιότητες των switch (bandwidth, layer). [28]

Σε ένα κέντρο βασισμένο σε μία τέτοια αρχιτεκτονική, ο αριθμός των hosts (servers) που μπορούν να εξυπηρετηθούν είναι αντιστρόφως ανάλογος, με τον ρυθμό μετάδοσης (uplink speed) των ToR Switches. Αυτό, περιορίζει αρκετά την ταυτόχρονη αύξηση επιδόσεων, αλλά και εξοπλισμού στο δίκτυο. Στις παρακάτω εικόνες (εικόνα 22, εικόνα 23), παρουσιάζονται οι επιδόσεις μέσω διαφόρων αλλαγών στα switch (tier, radix number) αλλά και οι τελικοί χρήστες που μπορούν να εξυπηρετηθούν, ανάλογα με το bandwidth και τον ρυθμό μετάδοσης της σύνδεσης. [28]

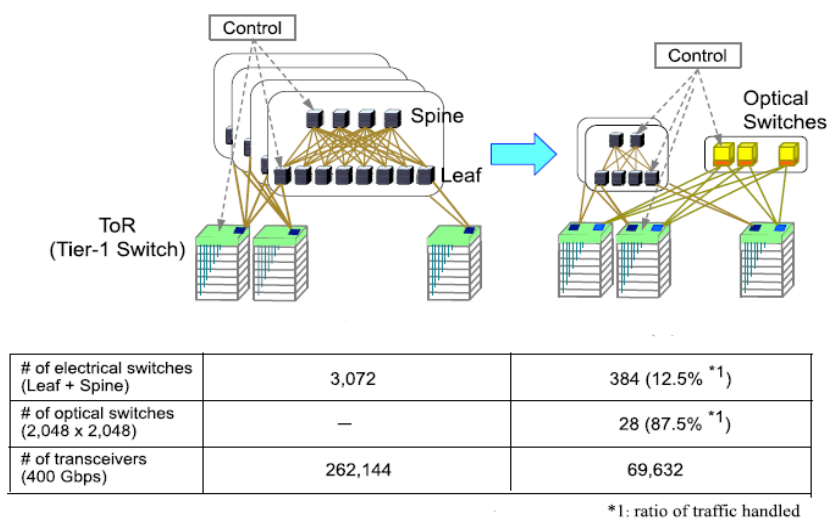


Εικόνα 27, 28: Διαμόρφωση δικτύου ανάλογα της ιδιότητες των Switch, Τελικοί Hosts ανάλογα τον ρυθμό μετάδοσης (link speed) [28]

### 3.6.2 Ενσωμάτωση οπτικών switch στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων

Σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, αναφερθήκαμε στην τεχνολογία των οπτικών switch και δειγματοληπτικά παρουσιάστηκαν κάποια από αυτά. Στο παρόν στάδιο, θα αναφερθούμε στην ένταξη τους στο εσωτερικό δίκτυο ενός κέντρου δεδομένων. Ο οπτικός αυτός εξοπλισμός, χάρη στην βασική του διαφοροποίηση, όσον αφορά τον τύπο σήματος που επεξεργάζεται (οπτικό αντί ηλεκτρικού), παρέχει την δυνατότητα διατήρησης του σήματος στην ίδια μορφή, καθόλα τα στάδια που μπορεί να βρεθεί ένα πακέτο δεδομένων (μεταφορά – επεξεργασία – δρομολόγηση). Έτσι, υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη αξιοποίηση κάθε είδους πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM).

Επιπροσθέτως, αντίθετα από τα ηλεκτρικά switch, ο αριθμός των θυρών τους δεν είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον ρυθμό μετάδοσης τους. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα τα δύο αυτά νούμερα να μην είναι πλέον, αντιστρόφως ανάλογα, και επιτρέπουν έτσι, την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, ταυτόχρονα με την ύπαρξη πολλών θυρών στο μηχάνημα.



Εικόνα 29: Παρουσίαση δικτύου πριν και μετά την ένταξη των οπτικών switch [28]

Στην Εικόνα 29, παρουσιάζεται η δομή ενός εσωτερικού δικτύου κέντρου δεδομένων, πριν και μετά την ένταξη των οπτικών switch σε αυτό. Στο αριστερό δίκτυο, υπάρχει ένα σύνολο μόνο από ηλεκτρικά switch, ενώ στο δεξί βλέπουμε πως υπάρχει μία συνεργασία οπτικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού. Ο οπτικός εξοπλισμός είναι υπεύθυνος για τις μεγαλύτερες ροές δεδομένων, (περίπου το 87,5% της συνολικής ροής δεδομένων), εκμεταλλευόμενος τον ρυθμό μετάδοσής του, ενώ τα υπόλοιπα switch έχουν αναλάβει τις μικρότερες ροές (12,5%). Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μεγάλου αριθμού θυρών, καθώς και στον οπτικό εξοπλισμό δεν υπάρχει το «πρόβλημα» των αντιστρόφως ανάλογων στοιχείων, που μπορεί να εμποδίσει την αύξηση απόδοσης σε μία μεγαλύτερη ανάγκη.

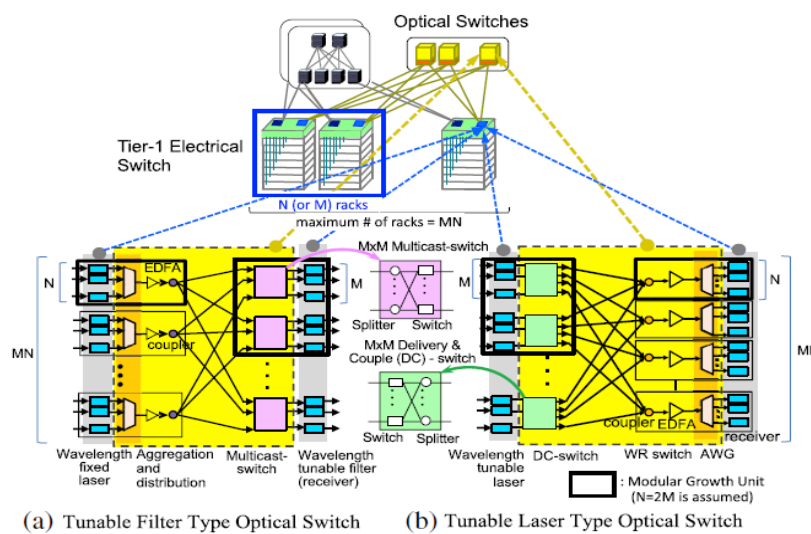
Τέλος στον πίνακα της Εικόνας 24 παρουσιάζεται ο αριθμός του εξοπλισμού σε κάθε μία από τις περιπτώσεις, με σκοπό να γίνει αναφορά, στο πόσο μειωμένος είναι μετά την ένταξη του οπτικού εξοπλισμού στο δίκτυο. Με την προσθήκη των 28 οπτικών switch, ο αριθμός των ηλεκτρικών switch και των οπτικών πομποδεκτών μειώνεται αισθητά, σε μόλις 384 και 69.632 από τα σχετικά μεγαλύτερα νούμερα των 3.072 και 262.144 αντίστοιχα που χρησιμοποιούνταν προηγουμένως.

Συμπερασματικά, λοιπόν, η χρήση των συγκεκριμένων οπτικών τεχνολογιών μειώνει σημαντικά τον αριθμό των συνολικών μηχανημάτων στο δίκτυο, με αποτέλεσμα την συνολική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εσωτερικών διασυνδέσεων, παρουσιάζοντας τα ίδια τελικά αποτελέσματα και τους χρήστες που μπορούν να εξυπηρετηθούν. Με την μείωση του «περιττού» εξοπλισμού, επιτυγχάνεται η εξάλειψη του φαινομένου της καθυστέρησης και

της υψηλής κίνησης. Επίσης, μεγάλη βελτίωση δέχεται το κομμάτι ελέγχου και διαχείρισης με την διαχείριση του δικτύου, τον εντοπισμό και την διάγνωση δυσλειτουργιών, να γίνονται ευκολότερα και γρηγορότερα. [28]

### 3.6.2.1 Large-Port-Count Optical Switch

Με το πέρασμα των χρόνων, στην προσπάθεια να ικανοποιηθούν οι ανάγκες και οι προκλήσεις για τις οποίες έχουμε αναφερθεί εκτενώς, έχουν γίνει αρκετές μελέτες πάνω σε πολλά οπτικά switch διαφορετικών αρχιτεκτονικών, μηχανισμών και υλικών. Σκοπός αυτών των μελετών, είναι η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μεταφοράς πακέτων (10 μs), σε συνδυασμό με έναν μεγάλο αριθμό θυρών (>1000) σε ένα μηχάνημα. Μία από τις αρχιτεκτονικές, που θα έλεγε κανείς πως ξεχωρίζει, είναι αυτή του large-port-count οπτικού switch. Χρησιμοποιώντας οπτικές τεχνολογίες, όπως τα Si photonics, σε συνδυασμό με οπτικές διατάξεις, όπως τους ROADMs, αλλά έχοντας δεχθεί την κατάλληλη παραμετροποίηση, καταφέρνει να ξεπερνάει κάθε πρόκληση. [28]



Εικόνα 30 : Αρχιτεκτονικές οπτικού switch [28]

Στην Εικόνα 30 παρουσιάζονται δύο προσεγγίσεις από τον Ken-Ichi Sato και τους συνεργάτες του [28]. Στην πρώτη προσέγγιση (a), βλέπουμε τα σήματα που έρχονται από laser, να δέχονται μία πολυπλεξία πριν φτάσουν στον ενισχυτή και καταλήξουν στο κατάλληλο multicast switch και μετά στην αντίστοιχη έξοδο.

Από την άλλη, στην αρχιτεκτονική (b), τα σήματα των laser πάνε σε ένα DC switch, όπου και συνεχίζουν ως ένα για τον κατάλληλο ενισχυτή, ανάλογα την έξοδό τους. Έπειτα το σήμα αποπολυπλέκεται για να φτάσει στον δέκτη του.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Time-sensitive networking (TSN) και επικοινωνία πραγματικού χρόνου**

### **4.1 Εισαγωγή στα ντετερμινιστικά δίκτυα και το TSN (Δίκτυα ευαίσθητα στον χρόνο)**

Καθώς όλα σήμερα είναι διασυνδεδεμένα, η ανάγκη για ντετερμινιστική επικοινωνία και επικοινωνία πραγματικού χρόνου, έχει αυξηθεί σχεδόν σε κάθε κλάδο, από τους βιομηχανικούς αυτοματισμούς και τα συστήματα αυτοκινήτων, μέχρι τις ροές ήχου/ βίντεο και τα κομμάτια των τηλεπικοινωνιών. Η ικανότητα επίτευξης ακριβούς συγχρονισμού, όσον αφορά το κομμάτι του χρόνου, και η ικανότητα πρόβλεψης, όσον αφορά το κομμάτι της μεταφοράς δεδομένων, είναι πλέον, απαραίτητη για την λειτουργία κρίσιμων εφαρμογών, όπου και οι παραμικρές καθυστερήσεις μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες. [29][30][43]

#### **4.1.1 Ντετερμινιστικά δίκτυα**

Ντετερμινιστικά δίκτυα, ονομάζονται αυτά που τα αποτελέσματα μετάδοσης και επεξεργασίας δεδομένων είναι προβλέψιμα και συνεπή όσον αφορά τον παράγοντα του χρόνου. Σε ένα τέτοιο είδος δικτύου, κάθε ενέργεια και λειτουργία ακολουθεί ένα καθορισμένο σύνολο κανόνων και πρωτοκόλλων με σκοπό την επίτευξη του μικρότερου ποσοστού λανθασμένων πακέτων (PER). Όσον αφορά την εφαρμογή τους, εντάσσονται σε μεγάλο βαθμό στο κομμάτι των βιομηχανιών – αυτοματισμών και κατηγοριοποιούνται ανάλογα τις λειτουργίες και ανάγκες του κάθε τομέα.

Κάποιες από τις βασικότερες κατηγορίες εφαρμογής τους είναι η παρακολούθηση καταστάσεων – μετρήσεων, οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής και οι βιομηχανικοί αυτοματισμοί. Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία η σημαντικότερη ανάγκη – απαίτηση είναι η διατήρηση ενός κοινού χρονοδιαγράμματος με σκοπό την άρτια παροχή αποτελεσμάτων στους διαχειριστές. Από την άλλη, στην δεύτερη κατηγορία υπάρχουν αυστηρότερες απαιτήσεις από τον παράγοντα του χρόνου καθώς έχουν ανάγκη για ταυτόχρονες συνδέσεις με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Ωστόσο, όπως θα δούμε και παρακάτω η τρίτη κατηγορία των βιομηχανικών αυτοματισμών χρησιμοποιώντας πολλές κατηγορίες εργαλείων και μηχανημάτων έχει την μεγαλύτερη ανάγκη άμεσων και ταυτόχρονων επικοινωνιών πραγματικού χρόνου με πολύ μικρούς κύκλους μεταφοράς πακέτων.

Τα πιο αξιοσημείωτα παραδείγματα εφαρμογής ντετερμινιστικών δικτύων στον βιομηχανικό αυτοματισμό είναι τα εξής: αυτόματα μηχανήματα κατασκευής, αυτόματα μηχανήματα συσκευασίας και αυτόματες μηχανές εκτύπωσης. Και στις τρεις (3) κατηγορίες μηχανημάτων οι διαδικασίες παραγωγής πραγματοποιούνται σε πάρα πολύ μεγάλο ποσοστό αποκλειστικά από τα μηχανήματα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και έχουν ανάγκη διασύνδεσης σε ένα δίκτυο χωρίς καθυστερήσεις ή απώλειες. [43]

Κατηγορίες εφαρμογής	Κύκλος επικοινωνίας [ms]	Ακρίβεια συγχρονισμού [μs]	Κόμβοι	Φορτίο/Κόμβο [Byte]	Απόσταση [m]	Τοπολογία δικτύου
Παρακολούθηση καταστάσεων	100	1	1000	300	1000	Star - Tree
Διαδικασίες Παραγωγής	10-100	1000	300	1500	100	Star - Tree
Μηχανές Κατασκευής	0,5	0,25	50	30	7	Line – Ring - Baum
Μηχανές συσκευασίας	1	1	100	50	5	Line – Ring - Baum
Μηχανές εκτύπωσης	4	0,25	200	50	25	Line – Ring - Baum

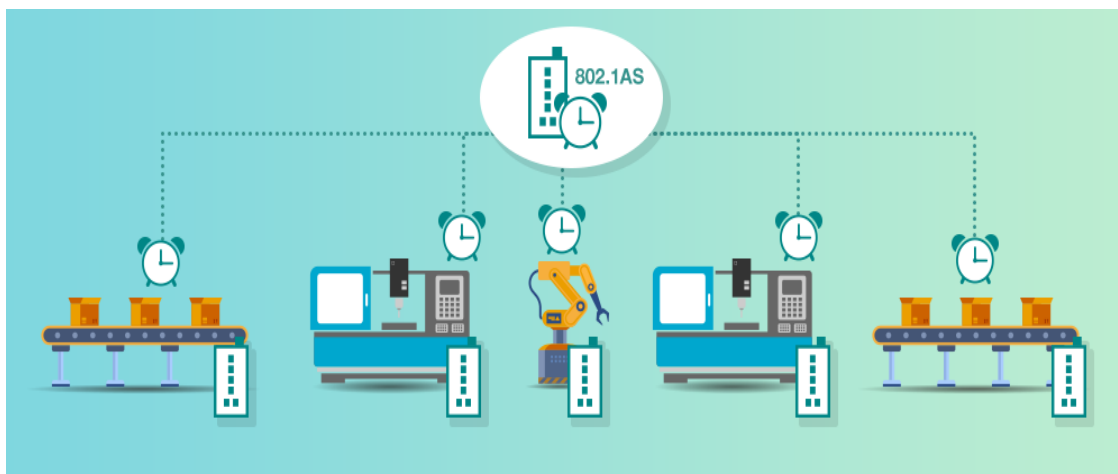
Πίνακας 5: Επικοινωνιακές απαιτήσεις ντετερμινιστικών δικτύων[43]

#### 4.1.2 TSN

Για την κάλυψη των παραπάνω αυστηρών αναγκών, έκανε την εμφάνιση του το TSN, μία πρωτοποριακή λύση που προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.

Το TSN είναι μία τεχνολογία, η οποία σχεδιάστηκε σχολαστικά για την αντιμετώπιση προβλημάτων και προκλήσεων, που σχετίζονται με τα παραδοσιακά δίκτυα Ethernet. Με την ενσωμάτωση της στην υποδομή τους, θα μπορέσουν να προσφέρουν υψηλότερη αξιοπιστία, ακριβή χρονισμό και χαμηλή καθυστέρηση. Όπως θα δούμε και παρακάτω, η δομή του βασίζεται σε μία αλυσίδα προτύπων και πρωτοκόλλων, το IEEE 802.1AS, το IEEE 1588, αλλά και το πρωτόκολλο ακρίβειας χρόνου (Precision Time Protocol - PTP). Υιοθετώντας λοιπόν, τις λειτουργίες τους, το TSN χρησιμοποιεί συγχρονισμένα ρολόγια σε όλες τις συσκευές,

καταφέροντας να συντονίσει την λειτουργία πραγματικού χρόνου στο δίκτυο. Επιπλέον, με την χρήση μηχανισμών Quality of Service (QoS), διαμόρφωσης κίνησης και τεχνικές προγραμματισμού, δίνει προτεραιότητα σε δεδομένα που την χρειάζονται περισσότερο από άλλα, διασφαλίζοντας ότι διασχίζουν το δίκτυο με ελάχιστη καθυστέρηση και jitter. [29][30]



Εικόνα 31: Συγχρονισμός συσκευών του δικτύου μέσω ρολογιών συγχρονισμού  
(<https://www.moxa.com/en/spotlight/industrial-ethernet/tsn/index>)

## 4.2 Πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές κλειδιά για το TSN

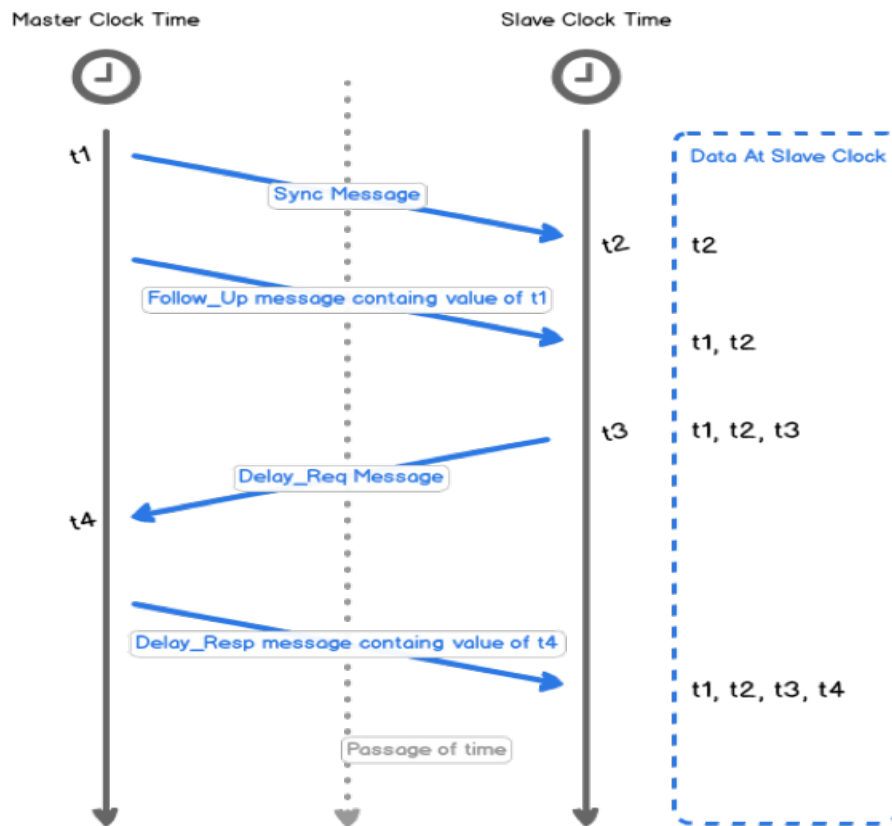
Το TSN δομείται πάνω σε μία σειρά πρωτοκόλλων και προτύπων αρχιτεκτονικών, που προσφέρουν συνεχή λειτουργία και συνέπεια μεταξύ του δικτυακού εξοπλισμού. Πρότυπα, όπως το IEEE802.1AS και το IEEE 802.1Qbv, τα οποία είναι καθορισμένα από το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

### 4.2.1 Precision Time Protocol (PTP) – IEEE802.1AS

Το πρότυπο IEEE 802.1AS, στο οποίο είναι βασισμένη και η βασική ιδέα του TSN, είναι μια επέκταση του ευρέως γνωστού Precision Time Protocol (PTP), το οποίο έχει καθοριστεί με την σειρά του από το πρότυπο IEEE 1588. Το IEEE 802.1AS προσαρμόζει το PTP ειδικά για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο, όπως η ροή ήχου – βίντεο, αλλά και εφαρμογές αυτοματισμών, όπου η ανταπόκριση και ο συγχρονισμός είναι κρίσιμα στοιχεία. Το PTP, όπως ακριβώς δηλώνεται και από την ονομασία του, είναι ένα πρωτόκολλο συγχρονισμού ακρίβειας χρονικών μονάδων, που διασφαλίζει ακρίβεια σε κάθε επικοινωνία μέσω συγχρονισμένων ρολογιών σε κάθε συσκευή του δικτύου. Κάνοντας χρήση της αρχιτεκτονικής



master-slave, ορίζεται μία ιεραρχικά ανώτερη συσκευή η οποία χρησιμοποιείται σαν το αρχικό ρολόι, με το οποίο συγχρονίζονται τα ρολόγια όλων των υπόλοιπων συσκευών. [31][32][33]



Εικόνα 32: Διαδικασία συγχρονισμού ρολογιών (<https://www.5gworldpro.com/blog/2023/02/11/what-is-precision-time-protocol-ptp/>).

#### 4.2.2 Time-Aware Shaper (TAS)-IEEE 802.1Qbv

Το IEEE 802.1Qbv, είναι ένα σημαντικό πρότυπο το οποίο εισάγει το μηχανισμό Time-Aware Shaper (TAS) στην τεχνολογία του TSN. Η λειτουργία του TAS περιλαμβάνει κάποιες πύλες διέλευσης δεδομένων, οι οποίες έχουν 2 στάδια λειτουργίας (ανοιχτή – κλειστή). Όταν οι πύλες είναι κλειστές, δεν περνάνε τα δεδομένα, ενώ αντίστοιχα όταν είναι ανοιχτές περνάνε. Ωστόσο, όταν πολλές πύλες είναι ανοιχτές, ταυτόχρονα, την απόφαση για την ροή των δεδομένων και ποια έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα από άλλα, την λαμβάνει ο μηχανισμός κανονικής προτεραιότητας του 802.1Q. Πιο αναλυτικά, το TAS επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και των χρονικών διαστημάτων αυτών, διασφαλίζοντας ότι τα ευαίσθητα στον χρόνο πακέτα, αποστέλλονται σε προκαθορισμένα διαστήματα. Έτσι, δίνει στις συσκευές δικτύου την δυνατότητα να ρυθμίζουν την μετάδοση της κίνησης, που είναι

κρίσιμη ως προς τον χρόνο, ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις και διασφαλίζοντας, ότι τα πακέτα φτάνουν στον προορισμό τους εντός προκαθορισμένων χρονικών ορίων (μέγιστη καθυστέρηση 100μs στα 5 hops). [35]

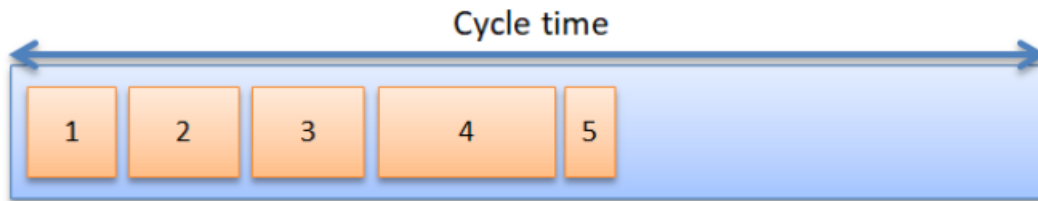
#### **4.2.2.1 Asynchronous Time-Aware Shaper (ATAS)**

Για την επίτευξη των παραπάνω, υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις και πληροφορίες, οι οποίες πρέπει να είναι γνωστές, πριν τα δεδομένα φτάσουν στο TAS. Ο ακριβής συγχρονισμός όλου του δικτύου, τα μεγέθη των δεδομένων και οι χρόνοι προσέλευσης τους ή οι διάφορες καθυστερήσεις, που μπορεί να έχουν, είναι κάποια από τα στοιχεία που χρειάζονται. Με άλλα λόγια, για να λειτουργήσει σωστά το παραπάνω πρωτόκολλο επικοινωνίας, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ότι το εκάστοτε δίκτυο είναι υλοποιημένο πάνω στο TAS, κάτι το οποίο είναι αρκετά περίπλοκο και δαπανηρό. Για την αντιμετώπιση αυτού, δημιουργήθηκε μία «ασύγχρονη» και λιγότερο δαπανηρή παραλλαγή του, το asynchronous time-aware shaper (ATAS), το οποίο επιτυγχάνει τα ίδια αποτελέσματα, χωρίς την ανάγκη κάποιων βασικών απαιτητικών λειτουργιών όπως τον συγχρονισμό ρολογιών, τον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου ή κάποιο κεντρικό σημείο ελέγχου. Χρησιμοποιώντας τοπικές διαδικασίες σε κάθε πόρτα ενός switch, μπορεί να καταλάβει ποια από τα δεδομένα που περνάνε έχουν την μεγαλύτερη προτεραιότητα, και ταυτόχρονα μπορεί να προβλέψει, πότε να περιμένει τα επόμενα σε σειρά πακέτα. Έτσι, μπορεί να αποφασίζει ποια είναι η κατάλληλη στιγμή να ανοίξει ή να κλείσει μία πύλη με σκοπό την αποφυγή καθυστερήσεων. [35]

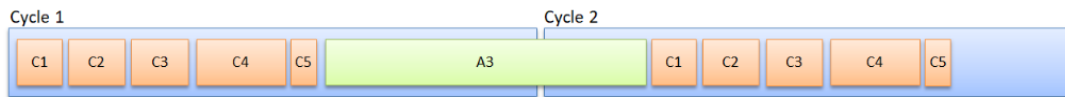
#### **4.2.3 Frame Preemption - IEEE 802.1Qbu**

Το Frame Preemption, είναι μία επέκταση του γνωστού σε όλους μας Ethernet, βασισμένο στα πρότυπα IEEE 802.3br και IEEE 802.1Qbu χρησιμοποιείται στην τεχνολογία του TSN για την αντιμετώπιση προβλημάτων στην επικοινωνία δικτύων, εξαιτίας απρόβλεπτων καταστάσεων, όπως τα πολύ μεγάλα πακέτα δεδομένων. Στα παγκόσμια δίκτυα, η επικοινωνία πραγματοποιείται σε «κύκλους», δηλαδή σε μικρά μη μεταβλητά χρονικά περιθώρια, που επαναλαμβάνονται για την αποστολή, επίσης, μη μεταβλητών δεδομένων (cyclic communication). Ωστόσο, κάποιες φορές υπάρχουν δεδομένα που μεταβάλλονται, είτε από άποψη μεγέθους, είτε από άποψη χρόνου. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην επικοινωνία,

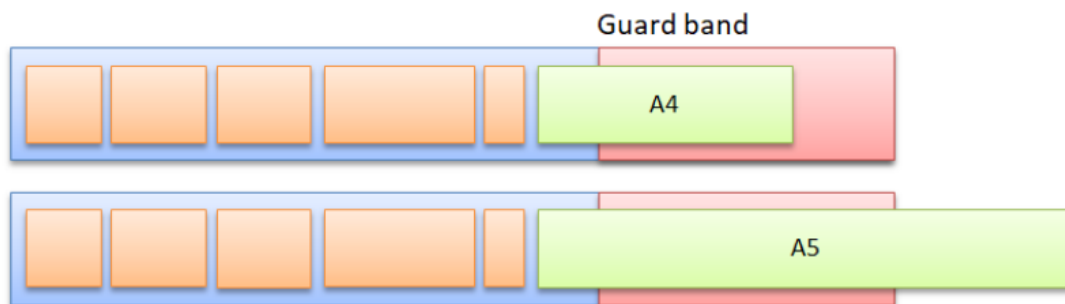
καθώς το δίκτυο δεν ξέρει τι να περιμένει. Παραδείγματος χάριν, ένα αρκετά μεγάλο πακέτο που δεν χωράει σε αυτά τα περιθώρια, μπορεί να επηρεάσει τα υπόλοιπα δεδομένα, έτσι, για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιείται ένα ακόμα μικρότερο χρονικό περιθώριο ασφαλείας, αμέσως μετά το τέλος του κύκλου που ονομάζεται «Guard Band». Το «Guard Band» χρησιμοποιείται μόνο για την αποστολή των μεταβαλλόμενων δεδομένων. Βέβαια, το ερώτημα που τίθεται την δεδομένη στιγμή, είναι τι γίνεται στην περίπτωση που ένα πακέτο δεν χωράει ούτε στο «Guard band». Την απάντηση εδώ, έρχεται να δώσει το Frame Preemption, με τον διαχωρισμό αυτού του μηνύματος σε όσα «Guard Band» χρειάζεται, επιτυγχάνεται η ορθή αποστολή του. Επιπροσθέτως, εφόσον το μέγεθος του πακέτου δεν είναι μεγαλύτερο - ίσο του μεγέθους του «Guard Band» ο υπόλοιπος «χώρος» μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιο άλλο πακέτο της ίδιας τάξης (acyclic data). [34]



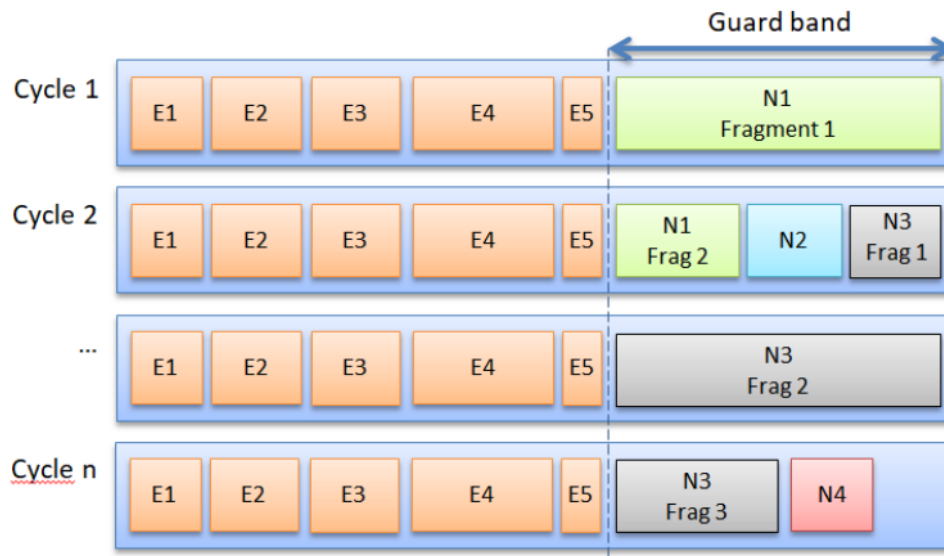
Εικόνα 33: Cycle Data [34]



Εικόνα 34: Acyclic Data [34]



Εικόνα 35: Guard Band [34]



Εικόνα 36:Frame Preemption in Guard Band [34]

### 4.3 Εφαρμογές του TSN

#### 4.3.1 Εισαγωγή του TSN στον κόσμο των βιομηχανιών

Η ταχεία ανάπτυξη της Industry 4.0 και του Industrial Internet of Things (IIoT), έχει δημιουργήσει την ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για χρονικά επακριβή επικοινωνία, ασφάλεια και αξιοπιστία σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Αυτό φέρνει την τεχνολογία του TSN, ολοένα και πιο κοντά στο να γίνει το βασικό κομμάτι δικτυακής υποδομής αυτών των περιβαλλόντων. [36][37][38]

#### 4.3.2 Τα οφέλη του TSN στον αυτοματισμό των βιομηχανιών

Το κομμάτι του αυτοματισμού στις βιομηχανίες έχει επηρεάσει σημαντικά διάφορους τομείς, όπως η παραγωγικότητα, η ασφάλεια, το κόστος και ο ρυθμός μετάδοσης. Ωστόσο, για την ορθή λειτουργία τους και την αποφυγή οποιουδήποτε λάθους, που θα μπορούσε να πλήξει έναν οργανισμό, υπάρχει ανάγκη πλήρους συνδεσιμότητας και συνεχούς παροχής επαρκών υπολογιστικών – δικτυακών πόρων, ανά πάσα στιγμή αυτό κριθεί απαραίτητο, χωρίς καθυστερήσεις ή απώλειες.

Η ένταξη του TSN σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία ωθούν την απόδοση και την αξιοπιστία των αυτόματων συστημάτων. Εξασφαλίζει

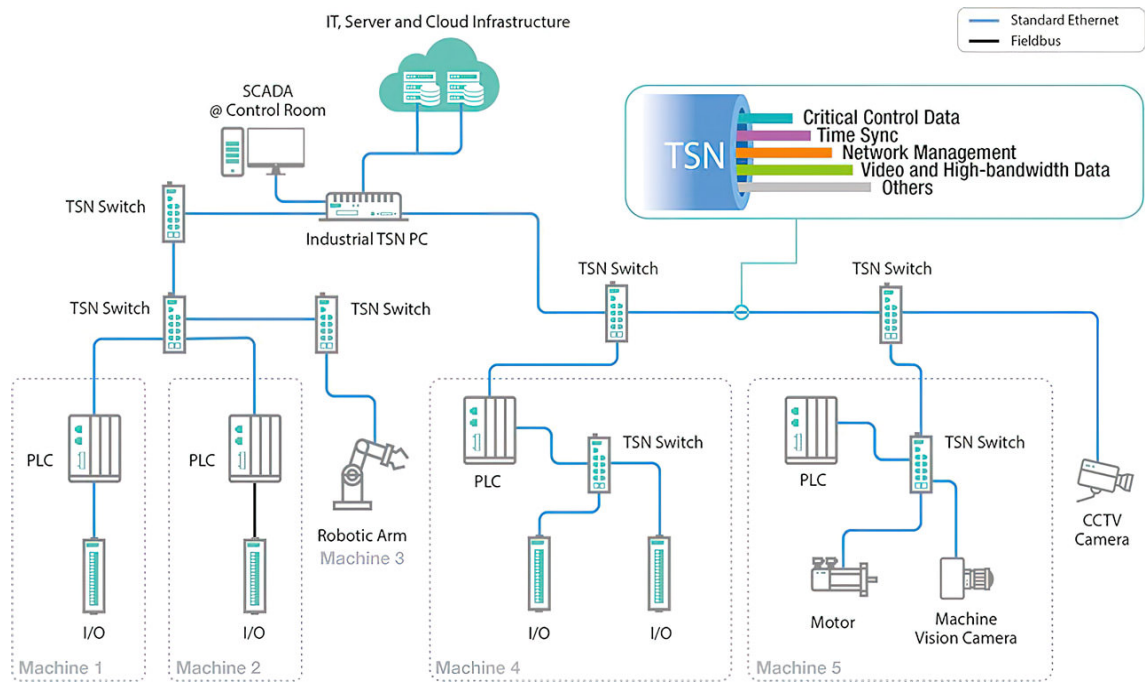
βελτιωμένη ακρίβεια στον έλεγχο της κίνησης, δίνοντας την δυνατότητα πλήρους ελέγχου, σημαντικά μειωμένη έως μηδενική καθυστέρηση (jitter) μετάδοσης δεδομένων ή εντολών, επιτρέποντας ακριβείς και συγχρονισμένες κινήσεις. Προσφέρει συγχρονισμό σε καταναμεμημένα συστήματα και αισθητήρες, κάτι από το οποίο μπορούν να επωφεληθούν οι βιομηχανίες, που χρησιμοποιούν πολύπλοκες διαδικασίες παραγωγής, για την ελαχιστοποίηση λαθών. Επιπλέον, υποστηρίζει εφαρμογές «ευαίσθητες» στον χρόνο, όπως οι ρομποτικοί αυτοματισμοί και τα συστήματα μεταφοράς, ενισχύοντας έτσι, απaráμιλλα τα κέρδη απόδοσης και παραγωγικότητας στον οργανισμό. [36][37][38]

#### **4.4 Μελλοντικές προκλήσεις και κατευθύνσεις του TSN**

Η τεχνολογία του TSN γίνεται ολοένα και δημοφιλέστερη, για τα πλεονεκτήματα της πάνω στο Ethernet, αλλά αυτό δεν αποκλείει την ύπαρξη διαφόρων προκλήσεων, που πρέπει να ξεπεράσει προτού εγκατασταθεί πλήρως στο εσωτερικό των δικτύων.

Η εξέλιξη του TSN και των διαφόρων προτύπων, στα οποία έχει ως βάση, συγχωνεύονται ολοένα και περισσότερο στα υπάρχοντα δίκτυα κάθε τομέα. Αυτό, δημιουργεί την πρόκληση γεφύρωσης του χάσματος, μεταξύ παραδοσιακών και σύγχρονων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, καθώς απαιτείται η ύπαρξη μίας σωστά τοποθετημένης προσέγγισης, για να διασφαλιστεί η συμβατότητα και η συνύπαρξη τους, πάνω στο ίδιο δίκτυο. Επιπλέον, η ανάγκη για ασφάλεια, δεν παύει να είναι ανάγκη πρωταρχικού σκοπού σε καμία τεχνολογία. Έτσι, και το TSN στην προσπάθεια του να ανταποκριθεί στις δυναμικές απαιτήσεις των εκτεταμένων βιομηχανικών δικτύων, δημιουργεί την πρόκληση για ισχυρότερα αντίμετρα σε απειλές. Η εξισορρόπηση της αυξανόμενης εξέλιξης και επεκτασιμότητας του εξοπλισμού, με την ενίσχυση των μέτρων ασφαλείας, είναι πολύ σημαντική για την αντιμετώπιση διαφόρων απειλών στον κυβερνοχώρο.

Συμπερασματικά, η επίδειξη του τρόπου με τον οποίο το TSN ενισχύει τη λειτουργική αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την παραγωγικότητα, υπογραμμίζει την σημασία του, ανοίγοντας το δρόμο για την ολοκληρωτική ένταξη του στις βιομηχανικές επικοινωνίες.



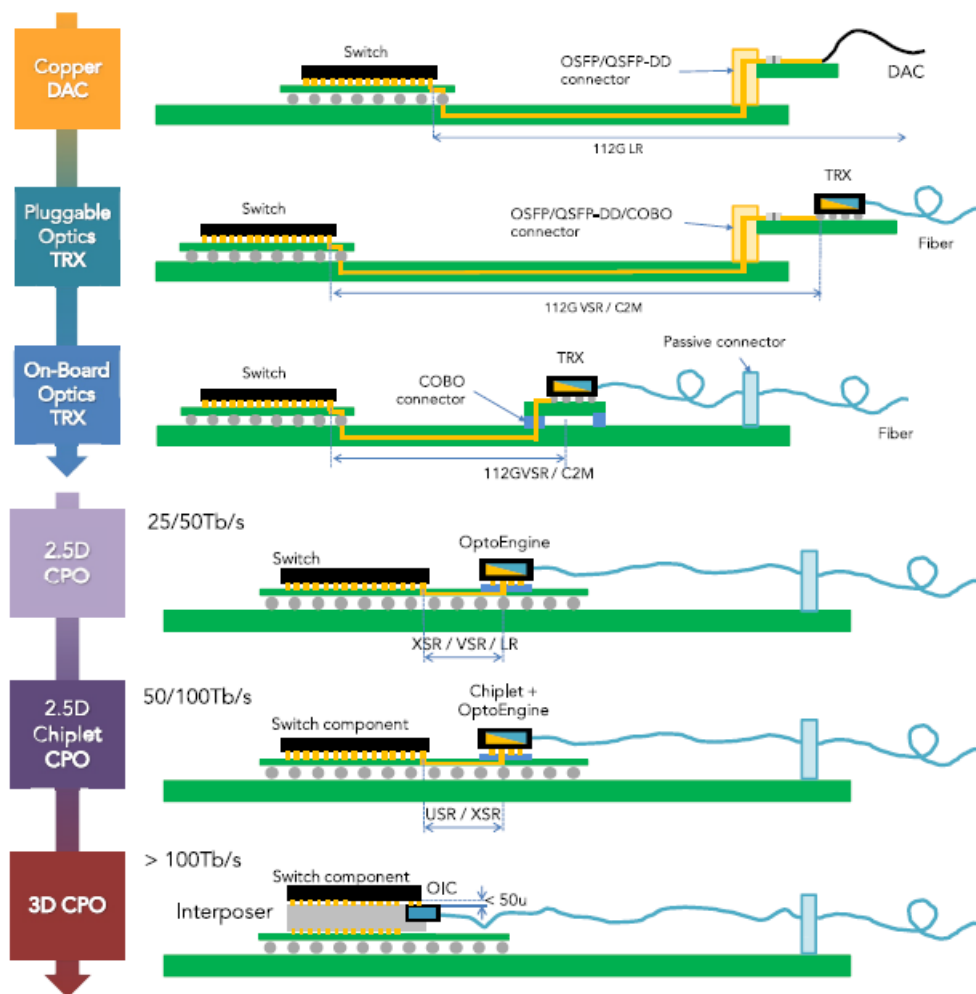
Εικόνα 37: Εφαρμογή TSN σε δίκτυο ενός οργανισμού [38]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μεταφορά των οπτικών τεχνολογιών εσωτερικά και ενίσχυση των κέντρων δεδομένων (Co-packaged optics)**

Η ανάγκη για αποδοτικότερα κέντρα δεδομένων όσον αφορά παραμέτρους όπως ο ρυθμός μετάδοσης και η ενέργεια, είναι ένα από τα πλέον μείζονα θέματα για το μέλλον του παγκόσμιου δικτύου. Με την συνεχή αύξηση και εξέλιξη των τεχνολογιών όπως το cloud computing, η τεχνητή νοημοσύνη, οι αναλύσεις μεγάλου όγκου δεδομένων και το IoT οι απαιτήσεις για την ανάπτυξη των κέντρων δεδομένων είναι μονόδρομος.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, μία από τις κυριότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιείται σήμερα στα κέντρα δεδομένων για την μεταγωγή δεδομένων είναι τα FPP. Θα έλεγε κανείς, πως έχουν «εδραιωθεί» σχεδόν σε κάθε εξοπλισμό μεταγωγής (Switch), λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων και της ευελιξίας τους. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια όρια που πρέπει ξεπεραστούν, ώστε τα δίκτυα να συμβαδίσουν με τις παγκόσμιες ανάγκες. Σύμφωνα με μελέτες, έχουν γίνει αρκετές προσεγγίσεις όσον αφορά την επέκταση των FPP μέσω της κύριας πλακέτας (PCB), του εξοπλισμού που συνδέονται, χωρίς να καταφέρνουν να διατηρούν την ίδια απλότητα των συστημάτων. Από την άλλη, η μεταφορά των οπτικών εσωτερικά του δικτυακού εξοπλισμού, είτε στην πλακέτα (OBO), είτε ακόμα πιο κοντά στα chip μεταγωγής των Switch (CPO), φαίνεται να είναι μία ελκυστικότερη λύση εξέλιξης και βελτίωσης των δικτύων. Αυτές οι τεχνολογίες φέρνουν στο προσκήνιο πολλά ερωτήματα και πιθανές αλλαγές στην συνδεσιμότητα των κέντρων δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, αμφισβητώντας την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία οπτικών – ηλεκτρονικών, και επαναπροσδιορίζοντας την αρχιτεκτονική των κέντρων δεδομένων, μέσω μίας διαφορετικής προσέγγισης, υπόσχονται αυξημένη απόδοση, ρυθμό μετάδοσης και εύρος ζώνης. [40]

Τα Co-packaged optics, ξεπερνούν τα όρια των κλασσικών δικτύων, επιτυγχάνοντας μία «συνεργασία» του οπτικού (lasers, modulators, ανιχνευτές φωτός κ.α.) και ηλεκτρικού (πλακέτες πυριτίου κ.α.) εξοπλισμού, μέσα στην ίδια συσκευή – πλακέτα. Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων προσφέρει σημαντική βελτίωση, σχεδόν σε κάθε χαρακτηριστικό ενός δικτύου. Ωστόσο, είναι βασικό να γίνουν οι κατάλληλες μελέτες και δοκιμές, μέχρις ότου είναι έτοιμα να πάρουν πλήρως τα ηνία από τα FPP. [40]



Εικόνα 38: Σταδιακή μεταφορά των οπτικών ολοένα και πιο κοντά στο chip του Switch (CPO). Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο φαίνεται η τεχνολογία OBO. [40]

## 5.1 Εισαγωγή στα ON-BOARD και τα CO-PACKAGED OPTICS

### 5.1.1 ON-BOARD OPTICS

Η τεχνολογία των on-board optics έχει πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές σε τομείς, όπου υπάρχει ανάγκη για υψηλότερες ταχύτητες και εύρος ζώνης από αυτές που μπορούν να προσφέρουν τα FPP, όπως τα υπολογιστικά συστήματα υψηλών αποδόσεων (HPC). Αυτό συμβαίνει, γιατί πέρα από τις υψηλότερες αποδόσεις, προσφέρει μειωμένες θερμοκρασίες και περισσότερο χώρο στην πρόσοψη του εξοπλισμού. Ωστόσο, παρά την μεταφορά των οπτικών μονάδων στο εσωτερικό πάνω στην κύρια πλακέτα (PCB) και μειώνοντας την απόσταση των



ηλεκτρικών συνδέσεων, δεν σημειώθηκε κάποια ιδιαίτερη βελτίωση σε σύγκριση με τα FPP στο κομμάτι κατανάλωσης ενέργειας. [40]

### 5.1.2 CO-PACKAGED OPTICS

Με σκοπό την εύρεση μίας ακόμη αποδοτικότερης λύσης, η τεχνολογία CPO έκανε την εμφάνιση της. Με την μεταφορά του οπτικού εξοπλισμού ακόμα πιο κοντά στην κύρια πλακέτα των Switch, επιτυγχάνονται υψηλότερες ταχύτητες και αποδόσεις. Πολλά ερωτήματα όμως, παραμένουν. Θα καταφέρει αυτή η βελτίωση στην παράμετρο της απόδοσης, να διατηρήσει την ισορροπία και στους υπόλοιπους τομείς του δικτύου; Όπως θα δούμε και παρακάτω, τομείς όπως το κόστος, η κατανάλωση ενέργειας και η ευελιξία των συστημάτων, θα πρέπει να έχουν επίσης ένα θετικό αντίκτυπο από την ένταξη της στον δικτυακό εξοπλισμό των κέντρων δεδομένων. [40]

## 5.2 Η αρχιτεκτονική των CO-PACKAGED OPTICS

Η αρχιτεκτονική μίας μονάδας co-packaged optic αντιπροσωπεύει έναν αξιοσημείωτο συνδυασμό οπτικών και ηλεκτρικών στοιχείων μέσα στην ίδια συσκευή. Στον πυρήνα μίας τέτοιας συσκευής, συνυπάρχουν οπτικά εξαρτήματα, όπως lasers, optical modulator, ανιχνευτές φωτός, waveguides και ηλεκτρικά chips, που είναι υπεύθυνα για την δρομολόγηση ή μεταγωγή σε ένα δίκτυο. Αυτή η σύμπτυξη διαφορετικών στοιχείων, εξαλείφει την ανάγκη για εκτεταμένες διασυνδέσεις που συχνά προκαλούν υποβάθμιση του σήματος και διάφορες καθυστερήσεις, διασφαλίζοντας ότι η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται με πολύ υψηλές ταχύτητες.

Οι optical waveguides καθοδηγούν το φως που εκπέμπουν τα lasers με τέτοιο τρόπο, ώστε να διευκολύνουν την επεξεργασία τους από τους optical modulators, με σκοπό την κωδικοποίηση των δεδομένων. Έπειτα, αυτά τα ειδικά διαμορφωμένα οπτικά σήματα λαμβάνονται από τους ανιχνευτές φωτός (photodetectors), οι οποίοι τα μετατρέπουν ξανά σε ηλεκτρικά σήματα, για να τα επεξεργαστούν τα chip δρομολόγησης – μεταγωγής. Τα chip με την σειρά τους λειτουργούν παράλληλα με τον οπτικό εξοπλισμό, για την δημιουργία των τελικών οπτικών «δεδομένων». Έτσι, η αρχιτεκτονική τους βελτιστοποιεί σε μεγάλο βαθμό την παροχή ισχύος στον ενσωματωμένο εξοπλισμό – εξαρτήματα, διασφαλίζοντας αποτελεσματική λειτουργία και αντιμετώπιση των προβλημάτων θερμότητας, ένα κρίσιμο στοιχείο για την διατήρηση της αξιόπιστης απόδοσης.

Ένα άλλο αρκετά σημαντικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής των μονάδων CPO είναι η προσαρμοστικότητα της. Ο σχεδιασμός τους υποστηρίζει ποικίλες οπτικές τεχνολογίες, επιτρέποντας ευελιξία στην επιλογή τύπου λέιζερ και ειδική διαμόρφωση στην αρχιτεκτονική των modulators και των ανιχνευτών φωτός, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε δικτύου. Συμπερασματικά, η τεχνολογία αυτή, επιτρέπει την απόλυτη συνεργασία οπτικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων, σηματοδοτώντας μια καθοριστική πρόοδο για την συνδεσιμότητα των κέντρων δεδομένων.[38][40]

### **5.2.1 Διαφορετικές προσεγγίσεις στην αρχιτεκτονική τους**

Πέραν από την βασική ιδέα για την ένταξη των CPO στην καθημερινότητα των κέντρων δεδομένων, υπάρχουν και κάποια άλλα ερωτήματα, όσον αφορά το ποια αρχιτεκτονική τους φαίνεται να είναι αποδοτικότερη. Έκτος από την αρχική μεταφορά των οπτικών εσωτερικά, υπάρχουν διαφοροποιήσεις, όσον αφορά την θέση των lasers των οπτικών σημάτων, αλλά και το πώς θα εκτελείται η δρομολόγηση.

#### **5.2.1.1 2.5D CPO**

Στην προσέγγιση των 2.5D CPO, παρόλο που τα οπτικά εξαρτήματα μεταφέρονται εσωτερικά και πολύ κοντά στο κύριο chip του switch, δεν συνδέονται κατευθείαν μαζί του. Για την επίτευξη αυτής της σύνδεσης μεσολαβούν διαφορετικά υποστρώματα, τα οποία εκτός του ότι έχουν πάνω τους τοποθετημένο τον οπτικό εξοπλισμό, αλλά παρέχουν και το απαραίτητο κενό για την διασύνδεση των οπτικών στοιχείων (lasers, modulators, ανιχνευτές φωτός) με το υπόλοιπο κύκλωμα.

#### **5.2.1.2 3D CPO**

Στην προσέγγιση 3D τα οπτικά εξαρτήματα είναι τοποθετημένα επάνω στο ίδιο υπόστρωμα με τα ηλεκτρικά. Συγκριτικά με την προσέγγιση των 2.5D, η σύνδεση με το κεντρικό chip είναι ακόμα μικρότερη, πράγμα το οποίο σημαίνει πως για να επιτευχθεί, χρειάζεται εξειδικευμένες τεχνικές κατασκευής και προσφέρει θετικότερο αντίκτυπο σε απόδοση και καθυστέρηση.

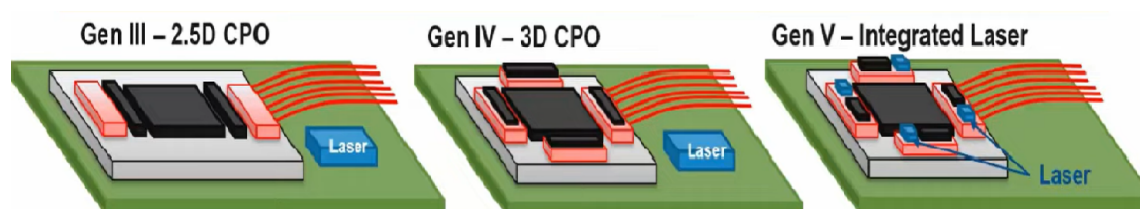
### 5.2.1.3 Ενσωματωμένο laser

Τα ενσωματωμένα laser αντιπροσωπεύουν μια πρωτοποριακή προσέγγιση, όπου οι δίοδοι laser τοποθετούνται μαζί με τα ηλεκτρικά και οπτικά εξαρτήματα στο ίδιο πακέτο. Αυτή η ενσωμάτωση, προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, εξαλείφοντας τις καθυστερήσεις των σημάτων, ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των CPO. Επιπλέον, προσφέρουν έναν πιο συμπαγή και αποδοτικό σχεδιασμό, που συμβάλει στην ευκολότερη ενσωμάτωση τους στην βιομηχανία των κέντρων δεδομένων. Τέλος, πέραν της βελτιωμένης απόδοσης που προσφέρει, δημιουργεί και κάποια ερωτήματα όσον αφορά τον τρόπο ψύξης του λέιζερ.

### 5.2.1.4 Εξωτερικά laser

Από την άλλη πλευρά, τα CPO προσφέρουν την δυνατότητα εφαρμογής εξωτερικών πηγών λέιζερ, όπου έχουν ξεχωριστούς οπτικούς πομποδέκτες, οι οποίοι συνδέονται με το υπόλοιπο κύκλωμα με καλώδια οπτικών ινών. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης επιδρούν στην ευελιξία και την εύκολη προσαρμογή του στην εκάστοτε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, οι εξωτερικές πηγές λέιζερ επιτρέπουν την επιλογή laser ανάλογα τα κριτήρια απόδοσης ή μήκους κύματος. Επιπλέον, δίνουν την δυνατότητα αλλαγής τους, χωρίς αυτό να επηρεάζει το υπόλοιπο κύκλωμα CPO, διασφαλίζοντας έτσι την προσαρμοστικότητα του. Τέλος, οι εξωτερικές πηγές λέιζερ συχνά διαθέτουν προηγμένους μηχανισμούς ψύξης, απλοποιώντας τη διαχείριση της θερμότητας σε απαιτητικά περιβάλλοντα κέντρων δεδομένων.

Η επιλογή μεταξύ ενσωματωμένων και εξωτερικών λέιζερ, εξαρτάται από το δίκτυο εφαρμογής του, τις ανάγκες απόδοσης ή ακόμα και το κόστος, αντανακλώντας έτσι, στο δυναμικό τοπίο της τεχνολογίας CPO και της συνεχιζόμενης εξέλιξής της.



Εικόνα 39: Απεικόνιση των διαφόρων αρχιτεκτονικών CPO(Co-Packaged Optics for our Connected Future(2023)  
Tony Chan Carusone, Professor of Electrical and Computer Engineering at the University of Toronto)

### 5.3 Επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας και το οικοσύστημα

Ένας από τους κυριότερους τομείς των κέντρων δεδομένων, που δέχονται θετικό αντίκτυπο από την τεχνολογία των CPO, είναι η ενέργεια και το περιβάλλον. Τα σημερινά κέντρα δεδομένων χαρακτηρίζονται από την χρήση οπτικών πομποδεκτών, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικών ινών και συχνά προκαλούν σημαντικές απώλειες ισχύος λόγω των πολλαπλών μετατροπών των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά και το αντίστροφο. Επί προσθέτως, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6 η κατανάλωση ενέργειας των FFP είναι ανάλογη της αύξησης – βελτίωσης του ρυθμού μετάδοσής τους.

Μοντέλο FFP	Ρυθμός μετάδοσης	Ενεργειακό Κόστος
SFP	1G	2W
QSFP	25 G	3.5 W
QSFP – DD	400 G	14 W
OSFP	400 G	21.1 W

Πίνακας 6: Κατανάλωση ενέργειας ανά μοντέλο FFP [40]

Τα CPO αντιμετωπίζουν αυτά τα μειονεκτήματά, τοποθετώντας οπτικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα στο ίδιο chip της πλακέτας, ελαχιστοποιώντας αποτελεσματικά αυτές τις μετατροπές. Αποτέλεσμα αυτής της συνεργασίας είναι η διασφάλιση σημαντικά μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας κατά την μετάδοση ή την λήψη των οπτικών σημάτων αλλά και η μείωση των συνολικών εξαρτημάτων που περνάνε τα δεδομένα μέχρι να φτάσουν στο κεντρικό chip, μετατροπές ζωτικής σημασίας για την σημερινή εποχή και την εξοικονόμηση ενέργειας. Πέραν από το άμεσο κομμάτι εξοικονόμησης, λόγω της μείωσης μετατροπών των σημάτων, η τεχνολογία των CPO προσφέρει αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας και στο κομμάτι της ψύξης. Εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερικούς οπτικούς πομποδέκτες και λοιπά ηλεκτρικά εξαρτήματα, τα κέντρα δεδομένων μπορούν να μειώσουν την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την διατήρηση σταθερών θερμοκρασιών του εξοπλισμού. Κάτι τέτοιο συμβάλει ακόμα περισσότερο στην συνολική εξοικονόμηση ενέργειας και έρχεται να συναντήσει την αυξανόμενη δέσμευση του κλάδου, για φιλικότερες λειτουργίες ως προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτικότερες λύσεις.

Καθώς η κατανάλωση ενέργειας των κέντρων δεδομένων εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικά ανησυχία, τα CPO αναδεικνύονται ως μία τεχνολογία που, όχι μόνο ικανοποιεί τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μεγαλύτερες ταχύτητες και εύρος ζώνης, αλλά ενσωματώνει και μία βιώσιμη και αποτελεσματική προσέγγιση στην υποδομή των κέντρων δεδομένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα και μελλοντικά ζητήματα

Έπειτα από την παραπάνω ανάλυση των δικτύων των κέντρων δεδομένων, του εξοπλισμού που χρησιμοποιούν, τις τεχνικές μεταγωγής των πακέτων τους, αλλά και την συνεχόμενη εξέλιξη τους ετησίως, φτάνουμε στο συμπέρασμα πως απαιτούνται νέες αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις, καθώς και νέες τεχνικές μεταγωγής. Σκοπός αυτών των νέων αρχιτεκτονικών και τεχνικών είναι, να έχουν ένα θετικό αντίκτυπο στην επίδοση και απόδοση, καλύπτοντας έτσι τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις του παγκόσμιου ιστού, με ταυτόχρονη μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας.

Τα FPP, ως η σημερινή θεμελιώδης οπτική διάταξη των εσωτερικών δικτύων των κέντρων, φαίνεται να αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις – περιορισμούς σε ισχύ, κόστος και ρυθμό μετάδοσης. Αυτό ωθεί στη αναζήτηση νέων τεχνολογικών προσεγγίσεων, που φέρνουν τις οπτικές τεχνολογίες πιο κοντά στην κύρια πλακέτα των switch. Ως ένα πρώτο βήμα εξέλιξης, παρουσιάζονται τα CPO, που με την σημαντική μείωση στην απόσταση ηλεκτρικού και οπτικού τμήματος ενός switch, προσφέρουν μεγαλύτερες ταχύτητες, μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας, λιγότερες μετατροπές σήματος και μικρότερες καθυστερήσεις στην μεταφορά πακέτων. Η πρώτη γενιά των CPO στοχεύει στην υιοθέτηση switch της τάξεως των 51.2 Tb/s και ταχύτητες των 100 Gb/s.

Μία άλλη προσθήκη, η οποία θα μπορούσε να δώσει μία ακόμα μεγαλύτερη «ανάσα» στα κέντρα δεδομένων, σε συνδυασμό με τις αλλαγές στο hardware από την τεχνολογία των CPO, είναι το TSN. Επιδρώντας αποκλειστικά στον τομέα του software, μπορεί να βελτιστοποιήσει τον τρόπο επικοινωνίας του κλασσικού ethernet, προσφέροντας επικοινωνία πραγματικού χρόνου και αντιμετώπιση του φαινομένου των μεγάλων ουρών πακέτων, που τείνουν να προκαλούν καθυστέρηση και απώλεια της πληροφορίας.

Ωστόσο, κάτι τέτοιο φαίνεται να μην εξαλείφει τελείως το πρόβλημα. Σύμφωνα με το νόμο του Moore, στην επομένη ευρύτερη αύξηση των τεχνολογικών εξαρτημάτων, είναι πολύ πιθανόν τα CPO να φτάσουν στο ίδιο αδιέξοδο με τα FPP. Έτσι, η ανάγκη για μία πιο σταθερή και μακροπρόθεσμη λύση σε συνεργασία με τα CPO παραμένει.

Την απάντηση σε αυτή την ανάγκη φαίνεται να δίνει η οπτική μεταγωγή. Για την ακρίβεια, η προσθήκη πλήρως οπτικών switch στα δίκτυα των κέντρων, μπορεί να προσφέρει ριζικές αλλαγές και αποτελέσματα. Όπως παρουσιάσαμε και παραπάνω (κεφάλαιο 3), με την ένταξη τους μπορούν να μειώσουν σημαντικά τον αριθμό των συνολικών ζεύξεων και μετατροπών, αλλά και τον συνολικό αριθμό μηχανημάτων, που χρειάζονται για την κάλυψη των ιδιαίτερων αναγκών ενός τέτοιου δικτύου. Επίσης, προσφέρουν μεγαλύτερη κάλυψη και ευελιξία με τον

μεγάλο αριθμό port ανά μηχανήμα, χωρίς κάτι τέτοιο να επηρεάζει τον ρυθμό μετάδοσης, όπως ήταν σύνηθες στα ηλεκτρικά switch. Πιο συγκεκριμένα, τα silicon photonics σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες πολυπλεξίας (WDM), μπορούν να εξαλείψουν κάθε φαινόμενο καθυστέρησης και περιττής κατανάλωσης ενέργειας, χωρίς να φαίνεται κάποιο εμπόδιο στο προσεχές μέλλον.

Καταλήγοντας, αξίζει να σημειωθεί, πως για την ομαλή μελλοντική ένταξη όλων των προαναφερθέντων σε ένα κέντρο δεδομένων, χρειάζεται πρώτα να γίνουν κατάλληλες μελέτες και συμφωνίες, όσον αφορά τα κόστη αλλά και το τελικό πλάνο – μοντέλο από προμηθευτές και υπευθύνους, με σκοπό την θετική πορεία του τομέα με όσον το δυνατόν λιγότερες συνέπειες.

## Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia, «Wikipedia The Free Encyclopedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_center](https://en.wikipedia.org/wiki/Data_center). [Πρόσβαση May 2023 ].
- [2] N. Oakley, 22 February 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://storymaps.arcgis.com/stories/a21d93abf29d4b6990370cfcba143cd9>. [Πρόσβαση May 2023].
- [3] C. Tao και G. Xiaofenf, «The features, hardware, and architectures of data center networks: A survey,» σε *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Shanghai, Shanghai Key Laboratory of Scalable Computing and Systems, Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2016, pp. 45-74.
- [4] C. E. Leiserson, «Fat-trees: Universal networks for hardware-efficient supercomputing,» σε *IEEE Transactions on Computers*, IEEE, 1985, pp. 892-901.
- [5] C. Dehury, «Computer Inquisitive,» 28 April 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://blogchinmaya.blogspot.com/2017/04/what-is-fat-tree-and-how-to-construct.html>. [Πρόσβαση 15 May 2023].
- [6] R. Cardona, «Introduction to Spine-and-Leaf Topologies,» σε *The Fast-Track Guide to VXLAN BGP EVPN Fabrics*, Apress , 2021.
- [7] S. Alexander, «Tech Target,» August 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/definition/Leaf-spine>. [Πρόσβαση June 2023].
- [8] Z. Xiao, D. Hong-tao, C. Jian-quan, L. Yi και L.-j. Zeng, «Ensure Data Security in Cloud Storage,» σε *International Conference on Network Computing and Information Security*, Guilin, 2011.
- [9] C. Shailaja, «International Society of Automation,» 31 May 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.isa.org/intech-home/2020/march-april/departments/physical-security-of-a-data-center>. [Πρόσβαση June 2023].
- [10] D. Miyuru, W. Yonggang και R. Fan, «Data Center Energy Consumption Modeling : A Survey,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015.
- [11] Y. Sverdlik, «Data Center Knowledge,» 27 June 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2016/06/27/heres-how-much-energy-all-us-data-centers-consume#close-modal>.
- [12] E. Commision, European Commision, 7 June 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/green-cloud>.

- [13] K. Hiroo, «Fifty Year History of Optical Fibers,» αρ. 197, pp. 10-16, 2020.
- [14] C. Keimel, G. Claydon, B. Li, J. Park και M. E. Valdes, «MICRO-ELECTROMECHANICAL-SYSTEM (MEMS) BASED SWITCHES FOR POWER,» σε *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, California, 2011.
- [15] G. Papadimitriou, C. Papazoglou και A. Pomportsis, «Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures.,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, τόμ. 21, αρ. 2, pp. 384-405, 2003.
- [16] «Orbray,» 05 July 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://orbray.com/magazine\\_en/archives/501](https://orbray.com/magazine_en/archives/501).
- [17] C. V. GARCÍA, «Liquid crystal optical switches,» σε *Optical Switches*, 2010, pp. 206-240.
- [18] D. Fei, C. Kai και Y. Yonglin, «Low-power and high-speed 2 × 2 thermo-optic MMI-MZI switch with suspended phase arms and heater-on-slab structure,» *Optics Letters*, τόμ. 46, αρ. 2, pp. 234-237, 2021.
- [19] «Anritsu Advancing beyond (SOA (Semiconductor Optical Amplifier)),» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.anritsu.com/en-au/sensing-devices/products/soa#:~:text=SOA%20\(Semiconductor%20Optical%20Amplifiers\)&text=SOA%20is%20used%20for%20amplifying,to%20compensate%20for%20transmission%20loss](https://www.anritsu.com/en-au/sensing-devices/products/soa#:~:text=SOA%20(Semiconductor%20Optical%20Amplifiers)&text=SOA%20is%20used%20for%20amplifying,to%20compensate%20for%20transmission%20loss).
- [20] Y. Lu και H. Gu, «Flexible and Scalable Optical Interconnects for Data Centers: Trends and Challenges,» *IEEE Communications Magazine*, pp. 27-33, October 2019.
- [21] «Fiber Optic Solutions,» 29 April 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fiber-optic-solutions.com/what-is-wdm.html>.
- [22] M. Biswanath, «WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges,» *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, τόμ. 18, αρ. 10, pp. 1810-1824, 2000.
- [23] E. K. Gerd, «A Review of WDM Technology and Applications,» *Ideal Library*, τόμ. 5, αρ. 1, pp. 3-39, 1999.
- [24] C. Qixiang, B. Meisam, G. Madeleine, R. Sebastien και B. Keren, «Recent advances in optical technologies for data,» *Optica*, τόμ. 5, αρ. 11, pp. 1354-1370, 2018.
- [25] «Radiall,» 14 November 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.radiall.com/insights/what-is-an-optical-transceiver>.
- [26] U. Yilmaz, «LinkedIn,» 22 February 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/guide-fiber-optic-transceivers-connector-types-cable-y%C4%B1lmaz-%C3%BCrg%C3%BCn>.
- [27] R. Essiambre και R. Tkach, «Capacity Trends and Limits of Optical Communications Networks,» *Proceeding of the IEEE*, τόμ. 100, αρ. 5, pp. 1035-1055, 2012.



- [28] S. Ken-Ichi, M. Hiroyuki, K. Ryotaro, S. Keijiro, I. Kazuhiro και N. Shu, «Prospects and challenges of optical switching technologies for intra data center networks,» *Optical Communications and Networking*, τόμ. 14, αρ. 11, pp. 903-915, 2022.
- [29] N. Finn, «Introduction to Time-Sensitive Networking,» *IEEE Communications Standards Magazine*, pp. 22-28, June 2018.
- [30] J. L. Messenger, «Time-Sensitive Networking: An Introduction,» *IEEE Communications Standards Magazine*, pp. 29-33, June 2018.
- [31] S. T. Watt, S. Achanta, H. Abubakari, E. Sagen, Z. Korkmaz και H. Ahmed, «Understanding and Applying Precision Time Protocol,» *IEEE 2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, pp. 1-7, 9 December 2015.
- [32] «Knowledge Ni,» 2 August 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019V0iSAE>.
- [33] M. D. Johas Teener και G. M. Garner, «Overview and Timing Performance of IEEE 802.1AS,» σε *International IEEE Symposium on Precision Clock*, Michigan, 2008.
- [34] R. Hulsebos, «industrial ethernet book,» 30 May 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://iebmedia.com/technology/tsn/tsn-technology-ethernet-frame-preemption/>.
- [35] M. Máté, C. Simon και M. Maliosz, «Asynchronous Time-Aware Shaper for Time-Sensitive Networking,» *Journal of Network and Systems Management*, τόμ. 30, αρ. 76, 12 September 2022.
- [36] T. Leyrer, «Time-sensitive networking for industrial automation,» 2018.
- [37] «industrial ethernet book,» March 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://iebmedia.com/technology/tsn/five-things-tsn-can-accomplish-for-the-iiot-and-industry-4-0/>.
- [38] S. Rob, C. Ruby, R. Jeff, V. Srinivas, W. Xu, S. Katharine και S. James, «Co-packaged Optics for Data Center Switching,» σε *2020 European Conference on Optical Communications (ECOC)*, 2020.
- [39] T. Min, X. Jiang, L. Siyang, F. Junbo, Z. Hua, Y. Chaonan, C. Shixi και G. Hangyu, «Co-packaged optics (CPO): status, challenges, and solutions,» σε *Frontiers of Optoelectronics*, 2022.
- [40] M. Cyriel, K. Rajagopa, Z. Aaron και N. David, «Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges,» σε *IET Optoelectronics*, Oxford, 2020.
- [41] L. Brian, M. Aman και T. Niharita, «A Survey and Evaluation of Data Center Network Topologies,» Atlanta, 2016.
- [42] «Fiber Optic Network Products,» 13 September 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fiberopticshare.com/single-mode-fiber-vs-multimode-fiber-choose-2.html>.

- [43] S. Nsaibi, Timing Performance Analysis of the Deterministic Ethernet Enhancements Time-Sensitive Networking (TSN) for Use in the Industrial Communication, Kaiserslautern: Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern , 2020.