



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
(STUDY OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS)

Αναστασία Καράμπαλη

Επιβλέπων: Ελευθέριος Στεργίου, Καθηγητής

Άρτα, Φεβρουάριος, 2026

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, **XX/02/2026**

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Ελευθέριος Στεργίου ,

Επιβλέπων, Καθηγητής

2. Μέλος επιτροπής

Σπυριδούλα Μαργαρίτη

3. Μέλος επιτροπής

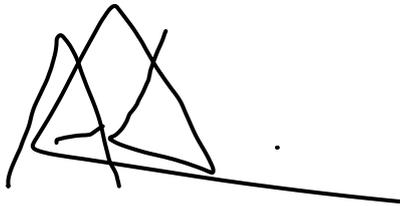
Δημήτριος Λιαροκάπης,

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Καράμπαλη, Αναστασία

Υπογραφή

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal line extending to the right.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τις τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (Passive Optical Networks - PON) και τη δυνατότητα αξιοποίησής τους ως υποδομή Οπτικών Τοπικών Δικτύων (Optical Local Area Networks - OLAN) σε περιβάλλοντα οργανισμών, campus και κτιριακών εγκαταστάσεων. Η αυξανόμενη ζήτηση για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, συμμετρικής επικοινωνίας, χαμηλής καθυστέρησης και προβλέψιμης ποιότητας υπηρεσίας καθιστά τα PON ως μια σημαντική εναλλακτική λύση έναντι των παραδοσιακών Ethernet LAN. Αρχικά παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και η βασική λειτουργία των PON, εστιάζοντας στον ρόλο του κοινού μέσου μετάδοσης και στους μηχανισμούς Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) που ρυθμίζουν την ανοδική κίνηση (upstream traffic). Επίσης πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των κύριων τεχνολογιών EPON, GPON, XGS-PON, NG-PON2 και WDM-PON και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τους ως προς χωρητικότητα, QoS, επεκτασιμότητα και κόστος. Ακόμη, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λειτουργία των μηχανισμών DBA και στην επίδρασή τους σε κρίσιμες μετρικές απόδοσης (καθυστέρηση, jitter, throughput και δικαιοσύνη κατανομής πόρων), ειδικά σε συνθήκες μεταβαλλόμενης και bursty κίνησης. Τέλος, εξετάζονται ζητήματα λειτουργικής αξιοπιστίας, όπως η προβληματική συμπεριφορά τερματικών (rogue/babbling ONUs), τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική σταθερότητα του δικτύου. Η εργασία φανερώνει ότι η επιτυχής υλοποίηση OLAN εξαρτάται τόσο από την ονομαστική χωρητικότητα της επιλεγμένης τεχνολογίας PON όσο και από τον ορθό σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής, την επιλογή κατάλληλων πολιτικών DBA και την προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες φόρτου και υπηρεσιών του οργανισμού.

Λέξεις-κλειδιά: Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Οπτικά Τοπικά Δίκτυα, Dynamic Bandwidth Allocation, Αξιολόγηση Απόδοσης, QoS, NG-PON2.

Abstract

This undergraduate thesis examines Passive Optical Network (PON) technologies and their potential use as the underlying infrastructure for Optical Local Area Networks (OLAN) in organizational, campus, and building environments. The increasing demand for high data rates, symmetrical communication, low latency, and predictable Quality of Service (QoS) has positioned PON-based architectures as a strong alternative to conventional Ethernet LAN solutions. Initially, the architecture and fundamental operation of PON systems are presented, with emphasis on the shared transmission medium and on Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) mechanisms that regulate upstream traffic. A comparative analysis of the main PON technologies — EPON, GPON, XGS-PON, NG-PON2, and WDM-PON — is conducted, highlighting their characteristics in terms of capacity, QoS support, scalability, and cost. Special focus is placed on DBA mechanisms and their impact on key performance metrics such as delay, jitter, throughput, and fairness of resource allocation, particularly under variable and bursty traffic conditions. Furthermore, issues of operational reliability are examined, including abnormal terminal behavior (rogue/babbling ONUs), which may affect the overall stability of the network. The study demonstrates that the successful deployment of OLAN infrastructures depends not only on the nominal capacity of the selected PON technology, but also on proper architectural design, suitable DBA policy selection, and adaptation to real traffic conditions and service requirements within the organization.

Keywords: Passive Optical Networks, Optical Local Area Networks, Dynamic Bandwidth Allocation, Performance Evaluation, Quality of Service, NG-PON2.

Πίνακας περιεχομένων

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Πίνακας περιεχομένων	9
Κατάλογος συντομογραφιών	11
1.Εισαγωγή	11
1.1. Σκοπός μελέτης	12
1.2. Μεθοδολογία	13
1.3. Δομή εργασίας	13
2. Τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (PON)	15
2.1 Αρχιτεκτονική και βασική λειτουργία των PON	16
2.2 EPON (Ethernet Passive Optical Network)	21
2.3. GPON (Gigabit Passive Optical Network)	23
2.4. XGS-PON (10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network)	26
2.5. NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2)	29
2.6. WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network)	31
2.7. Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών PON	34
2.8. Αξιολόγηση Μηχανισμών Κατανομής Εύρους Ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA) στα PON	37
2.9. Αξιοπιστία και Ασφάλεια σε Περιβάλλοντα PON: Rogue ONU	40
3.Οπτικά Τοπικά Δίκτυα (OLAN): Αρχιτεκτονικές και Εφαρμογές	42
3.1 Ορισμός και Χαρακτηριστικά των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)	42
3.2 Σύγκριση Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLAN) με Παραδοσιακά Ethernet LAN	44
3.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)	46
3.4 Περιπτώσεις Εφαρμογής των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)	48
3.5 Προκλήσεις Υλοποίησης και Μελλοντικές Τάσεις των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs) ..	49
4.Αξιολόγηση Απόδοσης Παθητικών Οπτικών Δικτύων σε Αρχιτεκτονικές OLAN	52
4.1 Εισαγωγή στην αξιολόγηση απόδοσης PON σε περιβάλλον OLAN	52
4.2 Μετρικές Αξιολόγησης Απόδοσης Παθητικών Οπτικών Δικτύων	55
4.3 Μηχανισμοί Dynamic Bandwidth Allocation και η επίδρασή τους στην απόδοση	58
4.4 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών PON και μηχανισμών DBA σε OLAN σενάρια	61
4.5 Ζητήματα αξιοπιστίας και λειτουργικών αστοχιών σε OLAN/PON περιβάλλοντα	64
5. Σενάρια Παθητικών Δικτύων - Μελέτες	67
5.1. Σενάριο Μελέτης Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύου EPON	67
5.2 Σενάριο Μελέτης Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύου GPON	70
5.3 Σενάριο Μελέτης Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύου WDM-PON	74
6. Συζήτηση	78
7. Συμπεράσματα	84
8. Περιορισμοί	87

9.	Προτάσεις.....	87
10.	Βιβλιογραφία.....	88

Κατάλογος συντομογραφιών

AI: Artificial Intelligence (Τεχνητή Νοημοσύνη)

AP: Access Point

ATM : Asynchronous Transfer Mode

BPON: Broadband Passive Optical Network

DBA: Dynamic Bandwidth Allocation (Δυναμική Κατανομή Εύρους Ζώνης)

DTWA: Dynamic Time and Wavelength Allocation

EPON: Ethernet Passive Optical Network

FTTH: Fiber to the Home

Gbps: Gigabits per second (Gigabit ανά δευτερόλεπτο)

GPON: Gigabit Passive Optical Network

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT: Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)

IP: Internet Protocol (Πρωτόκολλο Διαδικτύου)

IPTV: Internet Protocol Television

ITU-T: International Telecommunication Union – Telecommunication
Standardization Sector

LAN: Local Area Network

MAC: Media Access Control (Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο)

Mbps: Megabits per second (Megabit ανά δευτερόλεπτο)

NG-PON2: Next Generation Passive Optical Network 2

ODN: Optical Distribution Network

OLAN: Optical Local Area Network

OLT: Optical Line Terminal

ONU: Optical Network Unit

ONT: Optical Network Terminal

OPEX: Operational Expenditure (Λειτουργικό Κόστος)

OTDR: Optical Time-Domain Reflectometer / Reflectometry (Οπτικός
Ανακλασίμετρος Χρόνου)

POL: Passive Optical LAN

PON: Passive Optical Network

QoE: Quality of Experience (Ποιότητα Εμπειρίας Χρήστη)

QoS: Quality of Service (Ποιότητα Υπηρεσίας)

RTT: Round-Trip Time (Χρόνος Διαδρομής Μετ' Επιστροφής)

SLA: Service Level Agreement (Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας)

TDMA: Time Division Multiple Access (Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου)

TDM: Time Division Multiplexing (Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου)

TWDM-PON: Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network

UPS: Uninterruptible Power Supply (Αδιάλειπτη Παροχή Ισχύος)

vDBA: virtual DBA (Virtual Dynamic Bandwidth Allocation)

vPON: virtualized PON (Virtualized Passive Optical Network)

VLAN: Virtual Local Area Network (Εικονικό Τοπικό Δίκτυο)

VoIP: Voice over Internet Protocol

WDM: Wavelength Division Multiplexing (Πολυπλεξία Μήκους Κύματος)

WDM-PON: Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network

WSS: Wavelength Selective Switch

XGS-PON: 10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network

1.Εισαγωγή

Οι ραγδαίες εξελίξεις στις υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών και η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων των ρυθμών μετάδοσης, καθυστέρησης και αξιοπιστίας έχουν αναδιαμορφώσει τον τρόπο σχεδιασμού και υλοποίησης των σύγχρονων δικτύων πρόσβασης και τοπικής δικτύωσης. Η ευρεία διάδοση εφαρμογών cloud, υπηρεσιών βίντεο υψηλής ανάλυσης, τηλεδιάσκεψης, απομακρυσμένης εργασίας, καθώς και η ενσωμάτωση συστημάτων Internet of Things (IoT), έχουν δημιουργήσει την ανάγκη ανάπτυξης δικτυακών υποδομών οι οποίες δεν περιορίζονται μόνο σε υψηλό downstream ρυθμό (καθοδική κατεύθυνση) και απαιτούν αυξημένη συμμετρία, χαμηλή καθυστέρηση και προβλέψιμη ποιότητα υπηρεσίας (Hajomer et al., 2024; Sapundzhi et al., 2025; Memon et al., 2025).

Οι τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (Passive Optical Networks - PON) έχουν καθιερωθεί ως βασική λύση για την υλοποίηση δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς, καθώς κατέχουν τη δυνατότητα προφοράς υψηλούς χωρητικότητας με χαμηλό λειτουργικό κόστος και αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα. Η αρχιτεκτονική point-to-multipoint (σημείο-πολλαπλών σημείων), η χρήση παθητικών στοιχείων διανομής και η συγκέντρωση της διαχείρισης στο κεντρικό σημείο (Optical Line Terminal-OLT-Οπτικός Τερματικός Σταθμός Γραμμής) καθιστούν τα PON ιδιαίτερα αξιοποιήσιμα για μαζική ανάπτυξη, ενώ εισάγουν νέες προκλήσεις, κυρίως στο upstream (ανοδική κατεύθυνση), όπου το κοινόχρηστο μέσο απαιτεί αυστηρό χρονοπρογραμματισμό (Time scheduling) και μηχανισμούς δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation) (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011).

Παράλληλα τα τελευταία χρόνια, με την ευρυζωνική πρόσβαση παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον όσον αφορά την αξιοποίηση των τεχνολογιών PON σε περιβάλλοντα τοπικής δικτύωσης οργανισμών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (Optical Local Area Networks - OLAN ή Passive Optical LAN - POL) (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).. Στα OLAN, οι αρχιτεκτονικές PON χρησιμοποιούνται ως εσωτερική υποδομή δικτύου σε κτίρια, πανεπιστημιούπολεις, νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αντικαθιστώντας εν μέρει τα

παραδοσιακά Ethernet LAN (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Η εν λόγω προσέγγιση συμβάλλει στη μείωση των ενεργών στοιχείων του πεδίου, στην απλοποίηση της καλωδίωσης, στη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς και στην ευκολότερη κλιμάκωση. Ωστόσο, παράλληλα μεταφέρει κρίσιμες απαιτήσεις από το επίπεδο του φυσικού μέσου στο επίπεδο διαχείρισης και κατανομής πόρων (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Η απόδοση ενός OLAN δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ονομαστική χωρητικότητα της τεχνολογίας PON που χρησιμοποιείται (π.χ. GPON, XGS-PON ή NG-PON2), αλλά καθορίζεται σημαντικά από τους μηχανισμούς Dynamic Bandwidth Allocation (DBA), οι οποίοι ελέγχουν τη μετάδοση στο upstream. Σε μελέτες των Aurzada et al. (2011) και Memon et al. (2025) αποδεικνύεται ότι οι επιλογές στον σχεδιασμό των DBA αλγορίθμων επηρεάζουν άμεσα κρίσιμους παράγοντες όπως την καθυστέρηση, το jitter (Διακύμανση καθυστέρησης), την απώλεια πακέτων και την δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με ετερογενή και απότομα μεταβαλλόμενη κίνηση (bursty traffic). Το παραπάνω ζήτημα αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα στα OLAN, όπου το δίκτυο λειτουργεί ως υποδομή τοπικής δικτύωσης και καλείται να προσφέρει συμπεριφορά αντίστοιχη ενός LAN, παρά το γεγονός ότι βασίζεται σε point-to-multipoint αρχιτεκτονική.

Επιπλέον, λόγω της κοινόχρηστης φύσης του upstream καναλιού τα PON και τα OLAN καθίστανται ευάλωτα σε λειτουργικές αστοχίες, όπως η περίπτωση rogue ή babbling Optical Network Units (Προβληματική συμπεριφορά), κατά την οποία ένας ελαττωματικός ή κακώς συγχρονισμένος τερματικός εξοπλισμός μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία ολόκληρου του δένδρου διανομής (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019). Τέτοιου είδους φαινόμενα, μολονότι δε σχετίζονται άμεσα με την ακατέργαστη χωρητικότητα, μπορούν να υποβαθμίσουν σημαντικά την ποιότητα υπηρεσίας και ως εκ τούτου αναδεικνύεται η ανάγκη για ολοκληρωμένη αξιολόγηση απόδοσης και αξιοπιστίας (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019).

1.1. Σκοπός μελέτης

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η συστηματική μελέτη των τεχνολογιών Παθητικών Οπτικών Δικτύων και η αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους για χρήση σε αρχιτεκτονικές Οπτικών Τοπικών Δικτύων. Μελετάται ιδιαίτερα η

συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών EPON, GPON, XGS-PON, NG-PON2 και WDM-PON και διερευνάται η επίδραση των μηχανισμών Dynamic Bandwidth Allocation στην απόδοση, την καθυστέρηση και τη λειτουργική σταθερότητα του δικτύου. Η εργασία στοχεύει να αναδείξει την επιλογή τεχνολογίας και πολιτικής κατανομής πόρων με βάση ρεαλιστικά σενάρια χρήσης και όχι αποκλειστικά με ονομαστικά χαρακτηριστικά.

1.2. Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε συστηματική βιβλιογραφική έρευνα και συγκριτική ανάλυση επιστημονικών πηγών που αφορούν τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων και την εφαρμογή τους σε Οπτικά Τοπικά Δίκτυα. Η συλλογή του υλικού πραγματοποιήθηκε μέσω διεθνών επιστημονικών βάσεων δεδομένων και ψηφιακών βιβλιοθηκών (IEEE Xplore, Elsevier, Springer, MDPI, arXiv), καθώς και μέσω τεχνικών προτύπων και θεσμικών εκδόσεων (ITU-T).

Οι επιλεγμένες πηγές περιλαμβάνουν επιστημονικά άρθρα, διδακτορικές διατριβές, τεχνικές αναφορές, white papers και διεθνή πρότυπα, με κριτήρια επιλογής τη συνάφεια με το αντικείμενο, τη χρονική επικαιρότητα και την αξιοπιστία της έκδοσης.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στη σύγκριση αρχιτεκτονικών PON, μηχανισμών Dynamic Bandwidth Allocation και μετρικών απόδοσης (καθυστέρηση-latency, throughput-ρυθμαπόδοση, jitter, Quality of Service-QoS), καθώς και στη σύνδεσή τους με απαιτήσεις OLAN σε ρεαλιστικά σενάρια χρήσης. Μέσω της σύνθεσης των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης προκύπτουν τα συμπεράσματα και οι προτάσεις της εργασίας.

1.3. Δομή εργασίας

Παρακάτω παρατίθεται συνοπτικά η δομή της παρούσας εργασίας και το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου ξεχωριστά. Ειδικότερα, περιλαμβάνονται οκτώ κεφάλαια, τα οποία οργανώνονται με τρόπο ώστε να παρουσιάζεται αναλυτικά τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο όσο και η ανάλυση απόδοσης και τα συμπεράσματα του υπό μελέτη αντικειμένου. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το πλαίσιο και το κίνητρο της μελέτης, οι σύγχρονες απαιτήσεις των δικτύων πρόσβασης και τοπικής δικτύωσης, ο σκοπός

και η μεθοδολογία της εργασίας, καθώς και η συνολική δομή της. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (PON) και η εξέλιξή τους από τις πρώιμες υλοποιήσεις έως τις σύγχρονες γενιές, αναλύοντας τα βασικά πρότυπα, την αρχιτεκτονική τους και τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη λειτουργία τους. Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζεται η έννοια των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLAN/POL) και η αξιοποίηση των αρχιτεκτονικών PON ως εσωτερική υποδομή δικτύου οργανισμών, παρουσιάζοντας τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, τη σύγκρισή τους με τα παραδοσιακά Ethernet LAN, τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τις κύριες περιπτώσεις εφαρμογής τους. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η αξιολόγηση της απόδοσης των PON σε σενάρια OLAN, παρουσιάζοντας τις βασικές μετρικές απόδοσης, τον ρόλο των μηχανισμών Dynamic Bandwidth Allocation (DBA), τη συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών και πολιτικών κατανομής πόρων, καθώς και ζητήματα λειτουργικής αξιοπιστίας και αντιμετώπισης αστοχιών. Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται συζήτηση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανάλυσης, συνδέοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών PON με τις απαιτήσεις πραγματικών OLAN εγκαταστάσεων και αναδεικνύοντας τα κύρια σχεδιαστικά trade-offs. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, στο Κεφάλαιο 7 καταγράφονται οι περιορισμοί της μελέτης, ενώ στο Κεφάλαιο 8 διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία επιχειρεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη προσέγγιση στο ζήτημα της αξιοποίησης των PON ως υποδομή τοπικής δικτύωσης, συνδέοντας τη θεωρητική ανάλυση με τις πρακτικές απαιτήσεις σύγχρονων οργανισμών και τις τάσεις εξέλιξης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

2. Τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (PON)

Τα τελευταία χρόνια, τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PON) αποτελούν μία από τις κυρίαρχες τεχνολογικές λύσεις στην υλοποίηση δικτύων πρόσβασης δικτύων τοπικής κλίμακας. Η βασική φιλοσοφία των PON έγκειται στην αξιοποίηση της οπτικής ίνας ως μέσου μετάδοσης και στη χρήση παθητικών στοιχείων διανομής, με σκοπό τη δυνατότητα σύνδεσης πολλαπλών χρηστών μέσω μίας κοινής υποδομής, χωρίς την ανάγκη ενεργών ενδιάμεσων συσκευών στο πεδίο (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011).

Η παθητική φύση του δικτύου διανομής των PON μειώνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, περιορίζει τα σημεία πιθανής αστοχίας και συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Aurzada et al., 2011; Ballesta & Boltimore, 2017). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές πρόσβασης που βασίζονται σε ενεργό εξοπλισμό κατά μήκος της διαδρομής, τα PON επιτρέπουν την κεντροποιημένη διαχείριση του δικτύου από τον Οπτικό Τερματικό Σταθμό (Optical Line Terminal - OLT), ενώ το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο Διανομής (Optical Distribution Network - ODN) παραμένει λειτουργικά απλό και μακροχρόνια βιώσιμο (Aurzada et al., 2011; Ballesta et al., 2017).

Η βασική αρχιτεκτονική των PON είναι σημείο-πολλαπλών σημείων (point-to-multipoint), όπου ένα OLT εξυπηρετεί πολλαπλές Οπτικές Μονάδες Δικτύου (Optical Network Units - ONUs) ή Τερματικά Δικτύου (Optical Network Terminals - ONTs) μέσω παθητικών διακλαδωτών (Kramer, 2002). Η εν λόγω αρχιτεκτονική συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους ανά χρήστη, ενώ παρουσιάζει και ορισμένες προκλήσεις στη διαχείριση του κοινού μέσου και κυρίως στην ανοδική κατεύθυνση μετάδοσης (upstream), μολονότι απαιτείται αυστηρός συγχρονισμός και μηχανισμοί αποφυγής συγκρούσεων (Kramer & Pesavento, 2002).

Η μετάδοση δεδομένων στα PON είναι εγγενώς ασύμμετρη ως προς τον τρόπο λειτουργίας (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Στην καθοδική κατεύθυνση (downstream), το σήμα μεταδίδεται με ευρυεκπομπή προς όλους τους χρήστες, ενώ στην ανοδική κατεύθυνση οι ONUs διαμοιράζονται το ίδιο φυσικό κανάλι, μεταδίδοντας σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες με τη χρήση τεχνικών Time Division Multiple Access (TDMA) (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Ο

προγραμματισμός του χρόνου υλοποιείται μέσω μηχανισμών Dynamic Bandwidth Allocation (DBA), οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο και τον χρόνο μετάδοσης κάθε ONU και επιδρούν άμεσα στην καθυστέρηση, στο jitter, στην απώλεια πακέτων και στη δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025).

Με σκοπό τη συνολική απόδοση ενός PON είναι απαραίτητη η αποτελεσματικότητα των μηχανισμών DBA, κυρίως σε περιβάλλοντα όπου η κίνηση χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα και συνύπαρξη πολλαπλών κατηγοριών υπηρεσιών (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Σύμφωνα με τους Memon et al. (2025) τα συστήματα με υψηλή θεωρητική χωρητικότητα μπορεί να παρουσιάζουν αυξημένη καθυστέρηση και μειωμένη ποιότητα υπηρεσίας, σε περίπτωση που οι αλγόριθμοι κατανομής εύρους ζώνης δεν είναι επαρκώς προσαρμοσμένοι στα πραγματικά προφίλ κίνησης.

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τεχνολογίες PON έχουν εξελιχθεί με ραγδαίο ρυθμό, αρχικά ως πρώιμες υλοποιήσεις όπως το Ethernet PON (EPON) και το Gigabit PON (GPON), και μετέπειτα ως σύγχρονες αρχιτεκτονικές υψηλής χωρητικότητας, όπως το XGS-PON και το NG-PON2 (Ruffini, 2020; Horváth et al., 2020). Οι εν λόγω νεότερες τεχνολογίες περιλαμβάνουν αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης, βελτιωμένη υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας και το NG-PON2, πραγματοποιεί επίσης τη χρήση πολλαπλών μηκών κύματος μέσω τεχνικών Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM), προσφέροντας αυξημένη ευελιξία και δυνατότητα συνύπαρξης πολλαπλών υπηρεσιών στο ίδιο φυσικό μέσο (Ruffini, 2020; Horváth et al., 2020).

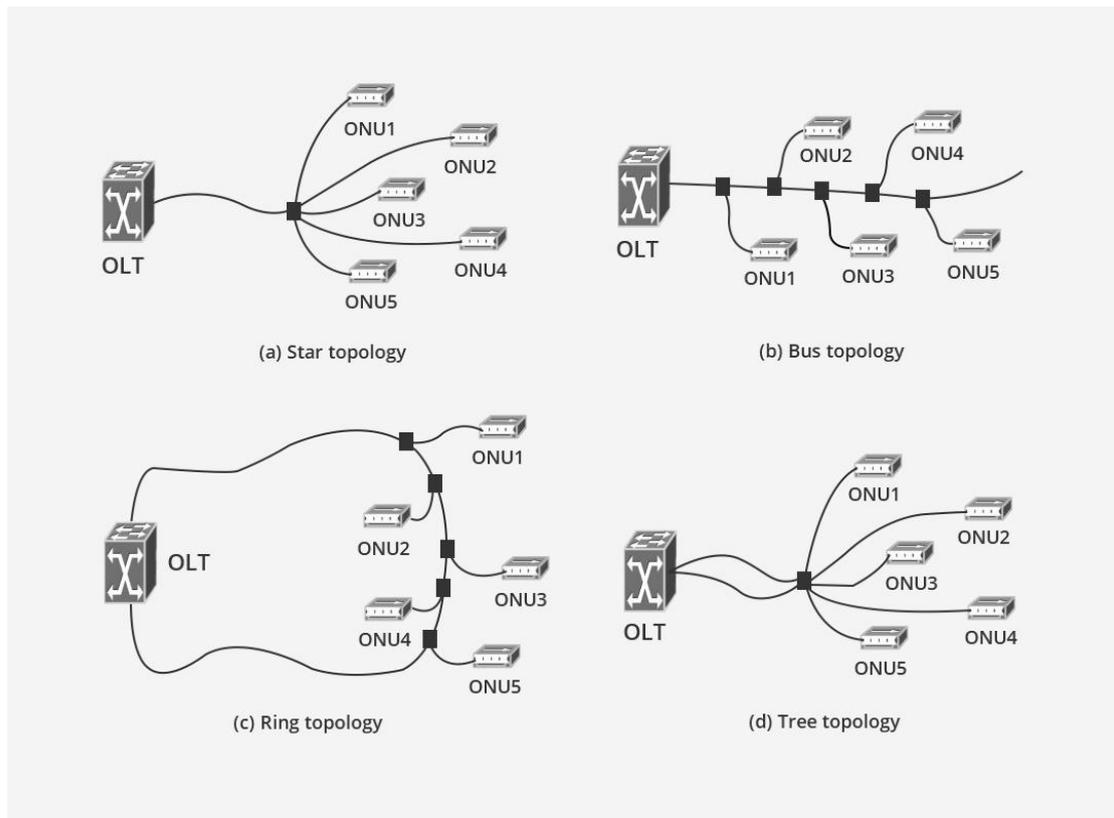
Αναφορικά με τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η κατανόηση της αρχιτεκτονικής, της λειτουργίας και των επιμέρους χαρακτηριστικών κάθε τεχνολογίας PON αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους σε σύγχρονες εφαρμογές. Παρακάτω θα παρουσιασθούν αναλυτικά οι κύριες τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων, προκειμένου να παρατεθεί το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μελέτη των Οπτικών Τοπικών Δικτύων και την αξιολόγηση της απόδοσής τους.

2.1 Αρχιτεκτονική και βασική λειτουργία των PON

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PON) χαρακτηρίζονται από μια αρχιτεκτονική σημείο-πολλαπλών σημείων (point-to-multipoint), η οποία εδράζεται σε οπτικές ίνες και παθητικά στοιχεία διανομής του σήματος. Ο κύριος στόχος της εν λόγω αρχιτεκτονικής είναι να επιτευχθεί αποδοτική, οικονομική και ενεργειακά φιλική διανομή ευρυζωνικής σύνδεσης σε πολλούς τελικούς χρήστες μέσω ενός κοινού φυσικού μέσου, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων ενεργών στοιχείων (Kramer & Pesavento, 2002; Ballesta & Boltimore, 2017). Η παραπάνω προσέγγιση διαφοροποιείται από παραδοσιακές λύσεις πρόσβασης λόγω των ενεργών κόμβων του πεδίου, όπου η τροφοδοσία και η συντήρηση ενδιάμεσου εξοπλισμού αυξάνει το κόστος και την πιθανότητα αστοχίας (Aurzada et al., 2011).

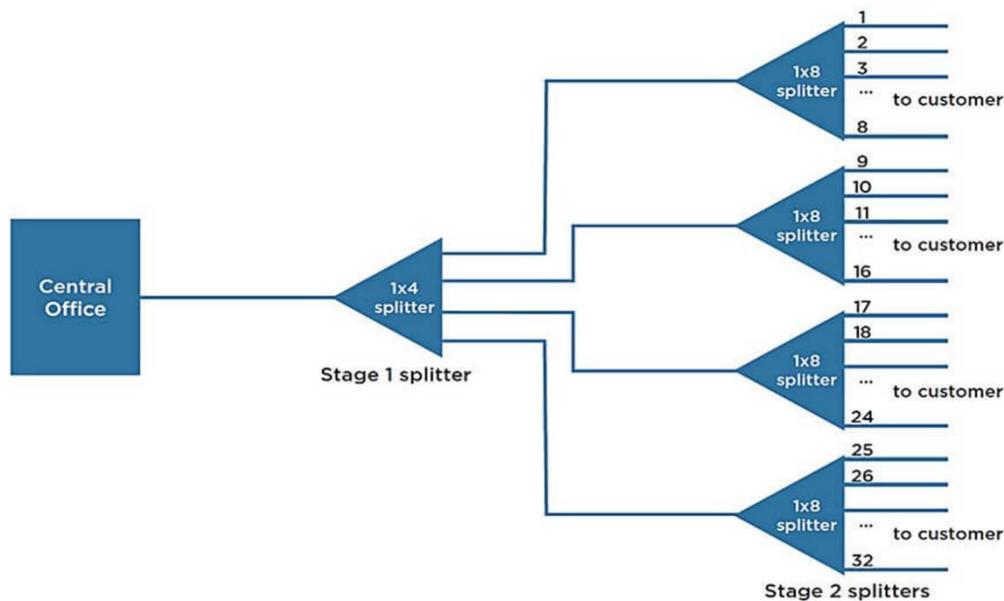
Η τυπική αρχιτεκτονική ενός PON περιλαμβάνει τρεις κύριες συνιστώσες: τον Οπτικό Τερματικό Σταθμό (Optical Line Terminal – OLT), τις Οπτικές Μονάδες Δικτύου (Optical Network Units – ONUs) ή Τερματικούς Χρήστες (Optical Network Terminals – ONTs), και το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (Optical Distribution Network – ODN) (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Συγκεκριμένα, ο OLT είναι εγκατεστημένος στην πλευρά του παρόχου (στο τηλεφωνικό κέντρο ή σε υποδομή κορμού) και έχει ως κύριο ρόλο την αποστολή και λήψη δεδομένων προς και από τους χρήστες, καθώς και την κεντρική διαχείριση του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών συγχρονισμού, προγραμματισμού και κατανομής εύρους ζώνης (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Η κεντροποιημένη διαχείριση παρέχει καλύτερη ποιότητα ελέγχου QoS, ενώ ταυτόχρονα καθιστά τον σχεδιασμό του DBA καίριο παράγοντα για τη συνολική συμπεριφορά του δικτύου υπό δυναμικά φορτία (Memon et al., 2025).

Το ODN αποτελείται συνήθως από τοπολογίες αστέρα ή δένδρου (Σχήμα 1), οι οποίες πραγματοποιούνται με χρήση διακλαδωτών (splitters) που μοιράζουν το σήμα από μία οπτική ίνα σε πολλαπλές εξόδους.



Σχήμα 1 ODNs τοπολογίες Παθητικού Οπτικού Δικτύου

Οι διακλαδωτές είναι πλήρως παθητικοί, ενώ δεν απαιτούν ηλεκτρική τροφοδοσία παρέχοντας λόγους διακλάδωσης 1:16, 1:32, ή και 1:128 (Horváth et al., 2020; Ballesta & Boltimore, 2023) (Σχήμα 2).



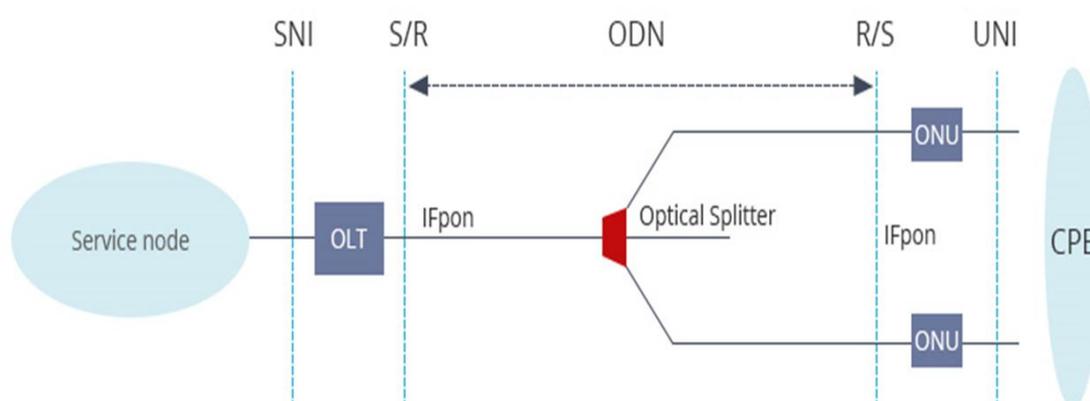
Σχήμα 2 Splitters σε Οπτικό Δίκτυο

Λόγω της δομής του, ένα OLT μπορεί να εξυπηρετήσει δεκάδες ή και εκατοντάδες ONUs/ONTs, προσφέροντας σημαντική εξοικονόμηση κόστους σε κάθε χρήστη (Horváth et al., 2020; Ballesta & Boltimore, 2017). Ωστόσο, η επιλογή split ratio επηρεάζεται από το οπτικό budget της ζεύξης (loss budget), τις αποστάσεις, τον αριθμό συνδέσεων/συγκολλήσεων, καθώς και από την ταυτόχρονη δραστηριότητα ορισμένων χρηστών, καθορίζοντας το απαιτούμενο aggregation capacity (Sapundzhi et al., 2025).

Οι ONUs/ONTs είναι τοπικές συσκευές που μεταφράζουν τα οπτικά σήματα σε ηλεκτρικά με σκοπό την τελική σύνδεση με το εσωτερικό δίκτυο του χρήστη (π.χ. Ethernet ή Wi-Fi) (Zhang et al., 2020; Hajomer et al., 2024). Συνήθως περιλαμβάνουν επιπλέον δυνατότητες διαχείρισης και ενσωμάτωσης υπηρεσιών, όπως φωνή (Voice over IP - VoIP), τηλεόραση (Internet Protocol Television - IPTV) και Internet (Zhang et al., 2020; Hajomer et al., 2024). Παρά το γεγονός ότι μερικές φορές τα ακρωνύμια ONT και ONU χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, ωστόσο κατέχουν μια διαφορά η οποία έγκειται στην τοπολογία και στη θέση τους στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, τα ONUs δύνανται να εξυπηρετούν πολλούς τελικούς χρήστες (π.χ. σε πολυκατοικίες), ενώ τα ONTs χρησιμοποιούνται συνήθως οικιακά (Zhang et al., 2020; Hajomer et al., 2024). Σε περιβάλλοντα τοπικής δικτύωσης οργανισμών, όπου τα PON εφαρμόζονται ως Passive Optical LAN (POL) ή Optical Local Area Networks (OLAN), οι Οπτικοί

Τερματικοί Σταθμοί (Optical Network Terminals - ONTs) κατέχουν κεντρικό ρόλο, καθώς λειτουργούν ως σημεία σύγκλισης υπηρεσιών δεδομένων, φωνής και βίντεο και ενσωματώνονται στο τοπικό περιβάλλον δικτύου (Gagnon, 2019).

Κατά την καθοδική κατεύθυνση (downstream) η μετάδοση δεδομένων γίνεται με ευρυεκπομπή (broadcasting), δηλαδή το ίδιο σήμα αποστέλλεται από το OLT σε όλα τα ONUs, αλλά μόνο ο προοριζόμενος τερματικός εξοπλισμός αποκωδικοποιεί τις πληροφορίες που σχετίζονται με αυτόν (Σχήμα 3). Η μετάδοση πραγματοποιείται με χρήση πολυπλεξίας χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM), ενώ η απόδοση φτάνει έως και τα 2.5 ή 10 Gbps, ανάλογα με την τεχνολογία (π.χ. GPON, XGS-PON) (Zhang et al., 2020; Horváth et al., 2020). Μολονότι το downstream φτάνει σε όλους τους τερματικούς κόμβους, οι μηχανισμοί κρυπτογράφησης και ελέγχου πρόσβασης αποτελούν ουσιώδη στοιχείο της αρχιτεκτονικής, με σκοπό τη διασφάλιση της εμπιστευτικότητας (Gagnon, 2019; ITU-T, 2022).



Σχήμα 3 Οπτικά ONUs/ONTs

Αντίθετα, κατά την ανοδική κατεύθυνση (upstream) είναι απαραίτητος ο συντονισμός, ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις ανάμεσα στα σήματα που στέλνουν τα ONUs. Για τον παραπάνω λόγο, εφαρμόζονται τεχνικές πρόσβασης TDMA και μηχανισμοί δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (DBA), οι οποίοι εκχωρούν συγκεκριμένες χρονοθυρίδες (time slots) σε κάθε ONU, βασισμένοι στις απαιτήσεις και στην τρέχουσα κίνηση δικτύου (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002). Η επιλογή του αλγορίθμου DBA επηρεάζει τόσο την καθυστέρηση, όσο και τον τρόπο συμπεριφοράς του δικτύου σε αιχμές φορτίου, σε bursty ροές ή σε συνδυασμό υπηρεσιών ποικίλων προτεραιοτήτων (Memon et al., 2025).

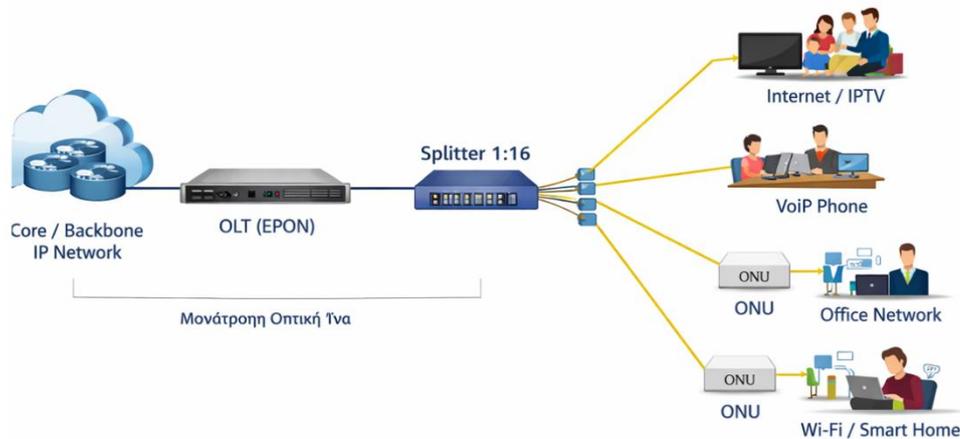
Τα PON κατά κύριο λόγο υποστηρίζουν αποστάσεις έως 20 χιλιόμετρα, ενώ το εν λόγω όριο επεκτείνεται χάρη στη χρήση οπτικών ενισχυτών σε προχωρημένα συστήματα. Η παθητική φύση του δικτύου συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας, μικρής κατανάλωσης ενέργειας και απλοποιημένης συντήρησης, καθιστώντας τα PON ιδανικά για χρήση σε αγροτικές περιοχές, πόλεις, πανεπιστημιούπολεις, στρατιωτικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα (Mechdyne, 2022). Επίσης, σε POL/OLAN εγκαταστάσεις η εμβέλεια κυμαίνεται ευρύτερα ανάλογα με το συνολικό οπτικό budget και τη χρήση splitters/τοπολογίας στο κτίριο, με τυπικές τιμές περίπου 20 km αλλά και σε υψηλότερες υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις (Gagnon, 2019).

Η αρθρωτή αρχιτεκτονική των PON παρέχει στους παρόχους τη δυνατότητα της σταδιακής επέκτασης της κάλυψής τους χωρίς τη σημαντική αναδιάρθρωση του φυσικού δικτύου, ενώ η δυνατότητα ταυτόχρονης υποστήριξης πολλαπλών τεχνολογιών σε διαφορετικά μήκη κύματος, όπως συμβαίνει με την NG-PON2, προσφέρει σημαντική ευελιξία στην αναβάθμιση και τη μετάβαση προς μελλοντικές υποδομές (Ruffini, 2020). Ως εκ τούτου, επιτρέπεται η «ομαλή εξέλιξη» του δικτύου, καθώς ο πάροχος διατηρεί αφενός την παθητική υποδομή (ODN) και αφετέρου αναβαθμίζει επιλεκτικά τον ενεργό εξοπλισμό όπου υπάρχει πραγματική ανάγκη αυξημένης χωρητικότητας (Dixit et al., 2012; Ballesta & Boltimore, 2017).

2.2 EPON (Ethernet Passive Optical Network)

Το Ethernet Passive Optical Network (EPON) αποτελεί μία από τις πρώτες υλοποιήσεις παθητικού οπτικού δικτύου και είναι βασισμένο στην τεχνολογία Ethernet. Αναπτύχθηκε από το IEEE και προδιαγράφηκε στο πρότυπο IEEE 802.3ah το 2004, για να συνδυάσει την ευρεία διάδοση του Ethernet με τα πλεονεκτήματα των παθητικών οπτικών τοπολογιών (Kramer, 2002). Το EPON διαδραμάτισε κύριο ρόλο στην εξέλιξη των PON, καθώς συνέδεσε την υιοθέτηση της οπτικής πρόσβασης σε περιβάλλοντα που ήδη βασίζονταν σε Ethernet τεχνολογίες, ενώ μείωσε το εμπόδιο της ενσωμάτωσης και της εκπαίδευσης προσωπικού (Horváth et al., 2020) (Σχήμα 4).

Αρχιτεκτονική Δικτύου EPON



Σχήμα 4 EPON Οπτικό Παθητικό Δίκτυο

Η αρχιτεκτονική του EPON παραμένει όμοια με άλλες τεχνολογίες PON: περιλαμβάνει έναν Οπτικό Τερματικό Σταθμό (OLT) στην πλευρά του παρόχου, ένα παθητικό δίκτυο διανομής (ODN) με διακλαδωτές (splitters) και πολλαπλές Οπτικές Μονάδες Δικτύου (ONUs) στον τελικό χρήστη. Η βασική έκδοσή του υποστηρίζει ταχύτητες 1.25 Gbps συμμετρικά (downstream και upstream), ενώ η έκδοση 10G-EPON φτάνει έως και 10 Gbps (Zhang et al., 2020; Aurzada et al., 2011). Οι παραπάνω εκδόσεις διατηρούν τη λογική point-to-multipoint διαμοίρασμού και εισάγουν αυξημένες απαιτήσεις σε εξοπλισμό και σχεδιασμό οπτικού budget (Aurzada et al., 2011).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του EPON είναι ότι απλοποιεί την υλοποίηση και μειώνει το κόστος ανάπτυξης λόγω της χρήσης εγγενών Ethernet πλαισίων, χωρίς ενθυλάκωση ή μετατροπή πρωτοκόλλου. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα συμβατό με τις υπάρχουσες τεχνολογίες LAN, ενώ διευκολύνεται η μετάβαση από ενσύρματα χαλκοδίκτυα σε οπτικές ίνες (Kramer & Pesavento, 2002). Επιπλέον, η εγγενής Ethernet προσέγγιση διευκολύνει την υλοποίηση βασικών μηχανισμών διαχείρισης στο επίπεδο Layer 2 (Aurzada et al., 2011). Ωστόσο, η τελική ποιότητα της υπηρεσίας εξαρτάται σημαντικά από την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού πρόσβασης στο upstream (Aurzada et al., 2011).

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, η τεχνολογία EPON παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς αναφορικά με την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), καθώς δεν υποστηρίζει ενσωματωμένα εργαλεία κατηγοριοποίησης κυκλοφορίας και διαχείρισης προτεραιοτήτων αντίστοιχα με εκείνα του GPON (Sapundzhi et al., 2025). Επιπλέον, ο μηχανισμός DBA του EPON είναι συγκριτικά λιγότερο αποτελεσματικός σε απαιτητικά σενάρια, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της δυναμικής κατανομής των πόρων σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενα φορτία, κυρίως όταν συνυπάρχουν ροές με διαφορετική ευαισθησία σε καθυστέρηση (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025).

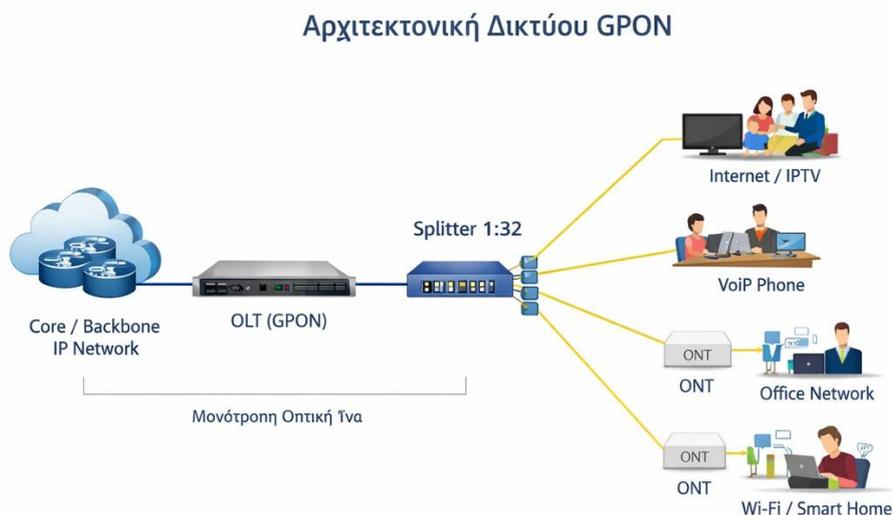
Μολονότι, η απόσταση κάλυψης του EPON φτάνει έως 20 χιλιόμετρα, τα split ratios σπανίως υπερβαίνουν το 1:32, σε αντίθεση με την GPON που φτάνει τα 1:128 (Ballesta & Boltimore, 2017). Κατά συνέπεια περιορίζεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλών χρηστών από έναν μόνο OLT, ενώ μειώνεται η αποδοτικότητα του δικτύου σε αγροτικές ή εκτεταμένες περιοχές, όπου η οικονομία κλίμακας είναι κρίσιμη (Horváth et al., 2020). Στην πράξη, η επιλογή split ratio επηρεάζεται επίσης από τον τρόπο κατανομής του πραγματικού φόρτου στους χρήστες, από τον βαθμό ταυτόχρονης δραστηριότητας, καθώς και από παράγοντες που συνδέονται με τη διαστασιολόγηση και τις πολιτικές QoS (Sapundzhi et al., 2025).

Συνεπώς, το EPON παραμένει μια τεχνολογία με χαμηλό κόστος, ιδανική για αστικά δίκτυα μικρής και μεσαίας κλίμακας ή περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις ως προς το QoS. Το Ethernet παραμένει ιδιαίτερα διαδεδομένο λόγω της απλότητας και της προβλέψιμης συμπεριφοράς του, παρότι παρουσιάζει περιορισμούς σε σύγκριση με νεότερες τεχνολογίες όπως GPON ή XGS-PON. (Horváth et al., 2020; Sapundzhi et al., 2025).

2.3. GPON (Gigabit Passive Optical Network)

Το Gigabit Passive Optical Network (GPON) αποτελεί μια προηγμένη τεχνολογία παθητικού οπτικού δικτύου από την International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) και την οικογένεια προδιαγραφών G.984.x και καθιερώθηκε παγκοσμίως ως η πιο διαδεδομένη λύση για ευρυζωνική πρόσβαση μέσω οπτικής ίνας (Sapundzhi et al., 2025). Η GPON προσφέρει τυπικά ταχύτητες 2.5 Gbps downstream και 1.25 Gbps upstream, ενώ

υποστηρίζει μεγάλη απόσταση και υψηλές αναλογίες διακλάδωσης, έως και 1:128, ανάλογα με τον σχεδιασμό του ODN και το διαθέσιμο οπτικό budget (Sapundzhi et al., 2025). Η καθιέρωσή της οφείλεται στην ικανότητά της να εξυπηρετεί μεγάλες ομάδες χρηστών με σχετικά χαμηλό κόστος ανά σύνδεση, ενώ συγχρόνως διατηρεί τις δυνατότητες QoS, οι οποίες θεωρούνται πιο ανεπτυγμένες σε σύγκριση με πρώιμες λύσεις PON (Ballesta & Boltimore, 2017) (Σχήμα 5).



Σχήμα 5 GPON Οπτικό Παθητικό Δίκτυο

Σε αντίθεση με την EPON, η οποία στηρίζεται σε αμιγώς Ethernet πλαίσια, η GPON χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο GEM (GPON Encapsulation Method) για την ενθυλάκωση διαφορετικών τύπων δεδομένων, Ethernet, ATM ή TDM, με αποτέλεσμα την αυξημένη ευελιξία στη μεταφορά ετερογενών υπηρεσιών (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Η χρήση του GEM προσφέρει επίσης πλεονεκτήματα όσον αφορά την αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου υπηρεσιών, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία σε σενάρια σύγκλισης (convergence) όπου γίνεται ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων, φωνής και βίντεο (Sapundzhi et al., 2025).

Η GPON υποστηρίζει μηχανισμούς Traffic Containers (T-CONT), οι οποίοι επιτρέπουν την κατηγοριοποίηση των ροών δεδομένων με βάση διαφορετικές κλάσεις εξυπηρέτησης (service classes), όπως εγγυημένο εύρος ζώνης, βέλτιστη προσπάθεια (best-effort) και καθυστέρηση-ευαίσθητη μετάδοση (delay-sensitive) (Sapundzhi et

al., 2025; Aurzada et al., 2011). Η εν λόγω δυνατότητα καθιστά τη GPON ιδιαίτερα κατάλληλη για σύγκλιση υπηρεσιών triple-play (φωνή, δεδομένα και βίντεο) και διασφάλιση ποιότητας στην παροχή υπηρεσιών, καθώς ο πάροχος δύναται να επιβάλει πολιτικές εξυπηρέτησης ανά κλάση (Sapundzhi et al., 2025; Aurzada et al., 2011). Συγκεκριμένα, στο upstream, μέσω του σωστού συνδυασμού T-CONT και DBA καθορίζεται η πραγματική εμπειρία των χρηστών, καθώς τα bursty φορτία ενδέχεται να οδηγήσουν σε αυξημένες καθυστερήσεις αν ο αλγόριθμος δεν ανταποκρίνεται επαρκώς (Memon et al., 2025).

Επιπλέον, η GPON χαρακτηρίζεται για την αποδοτική λειτουργία της σε δίκτυα με αυξανόμενη κίνηση. Ο αλγόριθμος Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) που χρησιμοποιείται είναι εξελιγμένος σε σχέση με πρώιμες υλοποιήσεις, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της κατανομής χρονοθυρίδων ανάλογα με τις ανάγκες κάθε ONU και βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (Aurzada et al., 2011; Ballesta & Boltimore, 2017). Παρά τα παραπάνω, η απόδοση του DBA εξαρτάται τόσο από τον τρόπο αναφοράς των buffers, όσο και από τις πολιτικές προτεραιοτήτων, διαφοροποιώντας τις επιδόσεις ανάλογα με το σενάριο κίνησης και τον βαθμό συμφόρησης (Memon et al., 2025).

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική, η GPON ακολουθεί την ίδια τοπολογία σημείο-πολλαπλών σημείων όπως και οι υπόλοιπες τεχνολογίες PON, αξιοποιώντας διακλαδωτές χωρίς τροφοδοσία. Οι αποστάσεις που καλύπτονται φτάνουν συνήθως τα 20 km χωρίς τη βοήθεια ενισχυτών. Επιπλέον, σε προχωρημένα σενάρια και με ειδικές παραμετροποιήσεις και σχεδιασμό μπορούν να εξεταστούν λύσεις με μεγαλύτερη εμβέλεια, ωστόσο συνοδεύονται από αυξημένες απαιτήσεις στον σχεδιασμό του optical budget (Zhang et al., 2010). Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός GPON δεν αποτελεί τόσο ζήτημα «προτύπου», όσο ζήτημα πρακτικής μηχανικής στο πεδίο, όπου η ποιότητα των συνδέσεων, οι απώλειες και η τοπολογία καθορίζουν τα τελικά περιθώρια λειτουργίας (Gagnon, 2019).

Η GPON έχει υιοθετηθεί από ποικίλους παρόχους τηλεπικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο λόγω του βέλτιστου συνδυασμού απόδοσης, αξιοπιστίας και οικονομικής αποδοτικότητας. Επιπλέον, έχει καταστεί η βάση για τη μετάβαση προς πιο εξελιγμένες τεχνολογίες όπως XGS-PON και NG-PON2, ενώ επιτρέπει τη σταδιακή αναβάθμιση των υφιστάμενων υποδομών μέσω συνύπαρξης (coexistence) στο ίδιο

ODN, ανάλογα με τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται (Ballesta & Boltimore, 2017; Ruffini, 2020). Τέλος, η πρακτική αυτή μειώνει τον κίνδυνο και το κόστος μετάβασης σε νεότερες γενιές χωρίς πλήρη αντικατάσταση του παθητικού δικτύου (Dixit et al., 2012).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η GPON παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις. Η ασυμμετρία των ταχυτήτων (2.5 Gbps downstream έναντι 1.25 Gbps upstream) μπορεί να περιορίσει την απόδοση σε περιβάλλοντα με υψηλότερες απαιτήσεις για upstream μετάδοση - όπως υπηρεσίες cloud backup, τηλεδιάσκεψη και peer-to-peer δικτυακές εφαρμογές (Horváth et al., 2020; Hajomer et al., 2024). Επιπλέον, η αύξηση της κίνησης προς πιο συμμετρικά πρότυπα χρήσης ασκεί πίεση για την ανάπτυξη τεχνολογιών με μεγαλύτερη upstream χωρητικότητα, όπως την ανάπτυξη του XGS-PON (10 Gigabit Symmetrical Passive Optical Network) και νεότερων προτύπων (Ruffini, 2020).

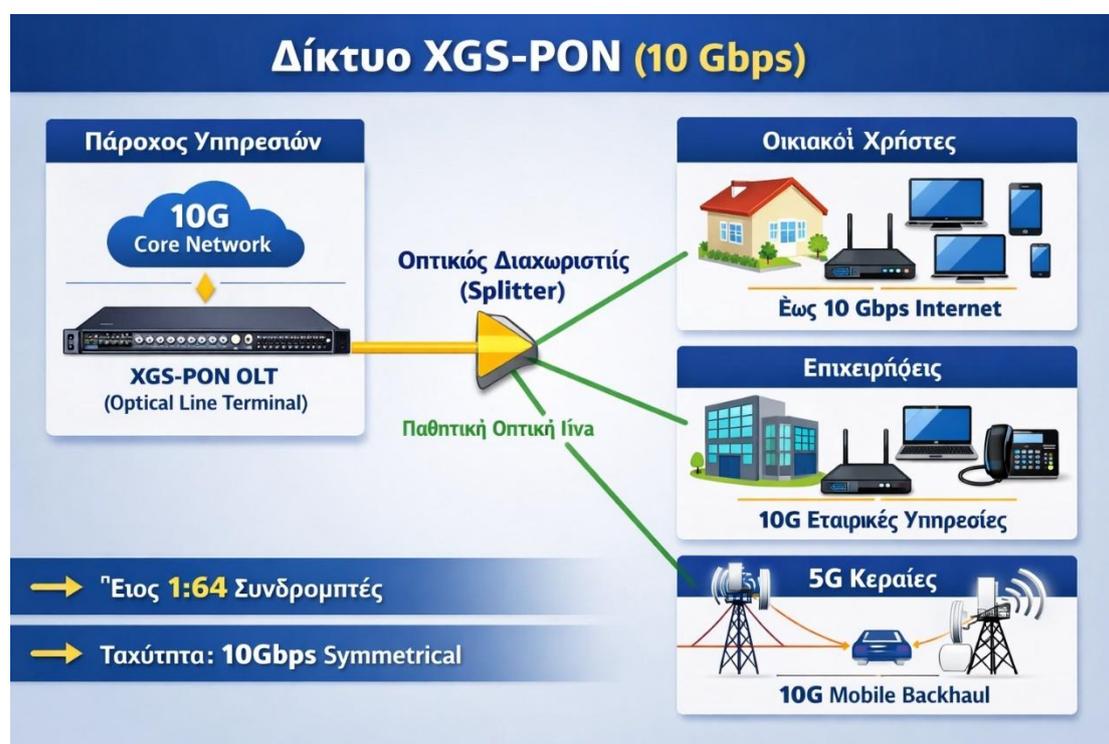
Στις μέρες μας σε πολλές χώρες, η GPON αποτελεί τη βάση των δικτύων FTTH (Fiber to the Home), ενώ αναγνωρίζεται ευρέως ως πλήρης και οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία PON, η οποία παρέχει μηχανισμούς QoS, ευελιξία μεταφοράς υπηρεσιών μέσω GEM (GPON Encapsulation Method) και δυνατότητα αποτελεσματικής κλιμάκωσης μέσω splitters (Sapundzhi et al., 2025).

2.4. XGS-PON (10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network)

Το XGS-PON (10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network) αποτελεί μια εξελιγμένη τεχνολογία παθητικού οπτικού δικτύου που ορίστηκε από την ITU-T μέσω της προδιαγραφής G.9807.1, με στόχο να παρέχει συμμετρική μετάδοση δεδομένων 10 Gbps τόσο στην καθοδική όσο και στην ανοδική κατεύθυνση, ξεπερνώντας την ασυμμετρία της GPON (Horváth et al., 2023). Η μετάβαση σε συμμετρικές ταχύτητες αποτυπώνει την αλλαγή των προφίλ χρήσης, στα οποία οι εφαρμογές απαιτούν πλέον υψηλό upstream και χαμηλή καθυστέρηση, κυρίως σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Hajomer et al., 2024; Memon et al., 2025). (Σχήμα 6)

Η συμμετρική του φύση καθιστά την εν λόγω τεχνολογία ιδανική για περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις στην upstream μετάδοση, όπως cloud computing, υπηρεσίες τηλεσυνεργασίας, video conferencing, εφαρμογές edge computing και γενικότερα

επιχειρησιακές υπηρεσίες στις οποίες απαιτείται υψηλή αμφίδρομη χωρητικότητα (Sapundzhi et al., 2025; Hajomer et al., 2024).



Σχήμα 6 Παθητικό Οπτικό Δίκτυο XGS-PON

Ειδικότερα, ιδίως σε επιχειρησιακές εγκαταστάσεις, φαίνεται ότι η συμμετρία σε συνδυασμό με τη δυνατότητα κεντρικής διαχείρισης και QoS καθιστά το XGS-PON κατάλληλο για υποδομές optical LAN, μολονότι αντικαθιστά ένα μέρος της παραδοσιακής ενσύρματης καλωδίωσης με οπτική ίνα και ONTs (Optical Network Terminal) κοντά στον χρήστη (Gagnon, 2019).

Η αρχιτεκτονική του XGS-PON είναι σχεδιασμένη, ώστε να είναι συμβατή με το υπάρχον παθητικό οπτικό δίκτυο (ODN) και παρέχει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης λειτουργίας GPON και XGS-PON στον ίδιο φυσικό δίαυλο με τεχνικές πολυπλεξίας μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM). Έτσι, διευκολύνεται η σταδιακή αναβάθμιση χωρίς την ανάγκη αντικατάστασης της υποδομής (Horváth et al., 2020; Ruffini, 2020). Η εν λόγω συνύπαρξη είναι καίρια, μολονότι το κόστος επανακαλωδίωσης και αντικατάστασης του Optical Distribution Network (ODN) αποτελεί συχνά το μεγαλύτερο εμπόδιο στις μαζικές αναβαθμίσεις (Dixit et al., 2012).

Όσον αφορά το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας (QoS), το XGS-PON βασίζεται σε αντίστοιχες έννοιες με την Gigabit Passive Optical Network (Παθητικό Οπτικό Δίκτυο - GPON) (π.χ. T-CONTs), όμως η υψηλότερη διαθέσιμη χωρητικότητα επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στον DBA, κυρίως σε περιβάλλοντα συνύπαρξης υπηρεσιών με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και υπηρεσίες best-effort (Memon et al., 2025). Η αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητας δεν εξαλείφει τις προκλήσεις του upstream, αλλά καθιστά ακόμη πιο σημαντικό τον σωστό σχεδιασμό των πολιτικών DBA και της ιεράρχησης προτεραιοτήτων. Το παραπάνω συμβαίνει επειδή το δίκτυο καλείται να υποστηρίξει μεγαλύτερο όγκο δεδομένων με προβλέψιμο τρόπο και κυρίως για υπηρεσίες που είναι ευαίσθητες σε καθυστέρηση και jitter (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025).

Η χρήση πιο ισχυρών οπτικών πομποδεκτών (optical transceivers) στο XGS-PON κατοχυρώνει τη δυνατότητα κάλυψης αποστάσεων έως 20 χιλιομέτρων με split ratios της τάξης του 1:64 (ανάλογα με το optical budget και τον σχεδιασμό), ενώ καθιστά την τεχνολογία οικονομικά βιώσιμη και αποδοτική για χρήση σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, επιχειρήσεις και δίκτυα με αυξημένες απαιτήσεις σε ταχύτητα και σταθερότητα (Zhang et al., 2020). Παράλληλα, όπως υποστηρίζεται από τον Gagnon (2019), σε πρακτικές POL/OLAN υλοποιήσεις, η ορθή εγκατάσταση και δοκιμή της οπτικής υποδομής (συνδέσεις, splitters, απώλειες) επηρεάζει καθοριστικά την αξιοπιστία και την απόδοση του τελικού συστήματος.

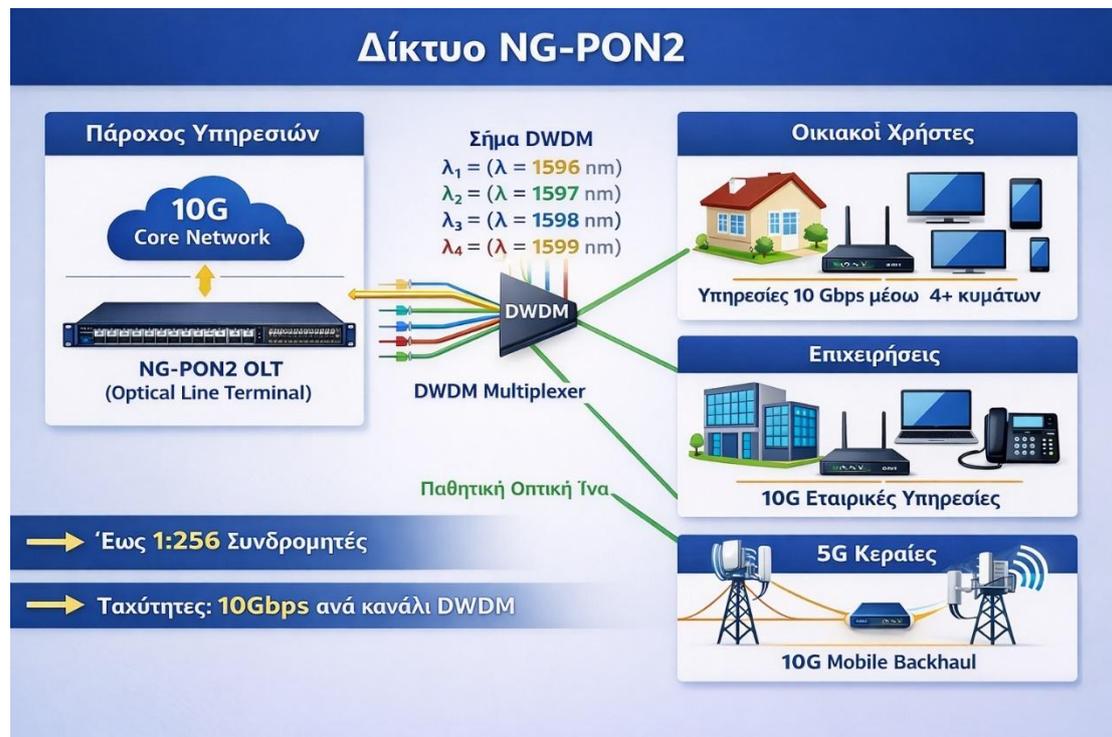
Παρά το γεγονός ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο σε σύγκριση με την GPON, η μακροπρόθεσμη απόδοση του XGS-PON είναι ιδιαίτερος σημαντική. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, επεκτασιμότητα και προσαρμοστικότητα στις μελλοντικές εξελίξεις, καθιστώντάς την ως μια στρατηγική επιλογή για την επέκταση των οπτικών δικτύων πρόσβασης (Horváth et al., 2020; Ruffini, 2020). Επίσης, σε σενάρια όπου το upstream είναι εξίσου σημαντικό με το downstream αναδεικνύεται η αύξηση της πρακτικής αξίας της τεχνολογίας, όταν ενσωματώνεται, αποτυπώνοντας τη σύγχρονη πραγματικότητα των υπηρεσιών (Hajomer et al., 2024).

Όπως καθίσταται φανερό από τα παραπάνω, το XGS-PON αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη λύση για συμμετρική, αξιόπιστη και επεκτάσιμη ευρυζωνική

πρόσβαση, ενώ συνδέει τις ώριμες υποδομές GPON με τις πιο σύνθετες λύσεις πολλαπλών μηκών κύματος της επόμενης γενιάς (Ruffini, 2020).

2.5. NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2)

Η τεχνολογία NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2) αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή παθητικού οπτικού δικτύου που έχει προδιαγραφεί από την ITU-T μέσω της οικογένειας συστάσεων G.989.x, με σκοπό την υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων, αυξημένης ευελιξίας και πολυεπίπεδης απόδοσης σε σύγκριση με τα προηγούμενα πρότυπα, όπως GPON και XGS-PON (Ruffini, 2020). Η NG-PON2 αποτελεί μια λύση πρόσβασης η οποία μπορεί να υποστηρίξει όχι μόνο αυξημένη χωρητικότητα αλλά και πιο σύνθετα σενάρια υπηρεσιών, τα οποία χρειάζονται εξίσου ευελιξία στην κατανομή πόρων και ονομαστική ταχύτητα (Memon et al., 2025). (Σχήμα 7).



Σχήμα 7 Παθητικό Οπτικό Δίκτυο NG-PON2

Η βασική τεχνική αρχή της NG-PON2 είναι η αξιοποίηση πολλαπλών μηκών κύματος, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή συγκεντρωτική χωρητικότητα. Πιο

συγκεκριμένα, η NG-PON2 μπορεί να προσφέρει έως 40 Gbps αξιοποιώντας πολλαπλά κανάλια των 10 Gbps και καθιστώντας την τεχνολογία κατάλληλη για ιδιαίτερα απαιτητικά σενάρια πρόσβασης και συγκέντρωσης κίνησης (Ruffini, 2020). Η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (WDM) λειτουργεί τόσο ως μηχανισμός αύξησης χωρητικότητας, όσο και ως εργαλείο οργάνωσης/διαχωρισμού υπηρεσιών. Το παραπάνω έχει σημαντική πρακτική αξία σε περιπτώσεις που ο πάροχος επιθυμεί να εξυπηρετήσει διαφορετικού τύπου προφίλ χρήσης στο ίδιο φυσικό ODN (Ruffini, 2020; Dixit et al., 2012).

Επιπλέον, η NG-PON2 υλοποιείται μέσω της υβριδικής αρχιτεκτονικής Time and Wavelength Division Multiplexing PON (TWDM-PON), η οποία συνδυάζει Time Division Multiplexing (TDM) και Wavelength Division Multiplexing (WDM). Έτσι, το δίκτυο κατέχει δύο διαστάσεις διαχείρισης πόρων όπως την κατανομή στον χρόνο (χρόνος/χρονικές θυρίδες) και την κατανομή στο φάσμα των μηκών κύματος (κανάλια) (Dixit et al., 2012). Η εν λόγω προσέγγιση επιτρέπει στο σύστημα να κλιμακώνει τη χωρητικότητα χωρίς να βασίζεται στη μείωση του χρόνου ανά χρήστη, καθώς αυτό στα TDM-PON συχνά οδηγεί σε αυξημένη συμφόρηση σε σενάρια υψηλού φόρτου (Memon et al., 2025).

Ακόμη, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του NG-PON2 είναι η δυναμική επιλογή μήκους κύματος (wavelength mobility), επιτρέποντας στο Optical Line Terminal (OLT) σε περίπτωση συμφόρησης, αναδιάρθρωσης υπηρεσιών ή βλάβης να μετακινεί έναν χρήστη ή μια ομάδα χρηστών σε διαφορετικό μήκος κύματος, παρέχοντας υψηλότερο επίπεδο λειτουργικής ανθεκτικότητας (Ruffini, 2020). Η παραπάνω δυνατότητα σχετίζεται άμεσα με το όραμα ευέλικτης πρόσβασης, σύμφωνα με το οποίο το δίκτυο μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά τη συμπεριφορά του ανάλογα με την πραγματική ζήτηση, δίχως τη συμβολή χειροκίνητων παρεμβάσεων στο πεδίο ή μεταβολές στην παθητική υποδομή (Dixit et al., 2012).

Σε επίπεδο μετάβασης και συνύπαρξης, η NG-PON2 σχεδιάστηκε με σκοπό την παροχή δυνατοτήτων συνύπαρξης με προηγούμενες γενιές PON στο ίδιο ODN, χρησιμοποιώντας κατάλληλα φίλτρα διαχωρισμού μηκών κύματος. Η συνύπαρξη (coexistence) μειώνει σημαντικά το κόστος μετάβασης, καθώς ο πάροχος κατέχει τη δυνατότητα της τμηματικής αναβάθμισης περιοχών ή συνδρομητών που το χρειάζονται, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την εξυπηρέτηση των υπόλοιπων με

παλαιότερες τεχνολογίες (Ruffini, 2020; Dixit et al., 2012). Συνεπώς, το δίκτυο αναβαθμίζεται σταδιακά, διατηρώντας παθητική οπτική υποδομή και την αντικατάσταση του ενεργού εξοπλισμού και διευκολύνοντας τα μεγάλα δίκτυα πρόσβασης όπου η αντικατάσταση του ODN σε μαζική κλίμακα είναι πρακτικά και οικονομικά δυσχερής (Ballesta & Boltimore, 2017).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η NG-PON2 χαρακτηρίζεται για την αυξημένη πολυπλοκότητα και το κόστος της. Ο ενεργός εξοπλισμός προϋποθέτει περισσότερο σύνθετους πομποδέκτες, με δυνατότητες ρύθμισης (tunable transceivers), ενώ η διαχείριση πολλαπλών μηκών κύματος αυξάνει τις απαιτήσεις για συστήματα ελέγχου, παρακολούθησης και προγραμματισμού πόρων (Ruffini, 2020). Επιπλέον, η πολυδιάστατη φύση της κατανομής πόρων (χρόνος και μήκος κύματος) καθιστά απαιτητικότερο τον σχεδιασμό του DBA, μολονότι πλέον εκτός από την ορθότερη χρονοθυρίδα πρέπει να επιλέγεται και «το κατάλληλο κανάλι», ιδιαίτερα σε περιπτώσεις επίτευξης αυστηρών απαιτήσεων καθυστέρησης (Memon et al., 2025; Dixit et al., 2012).

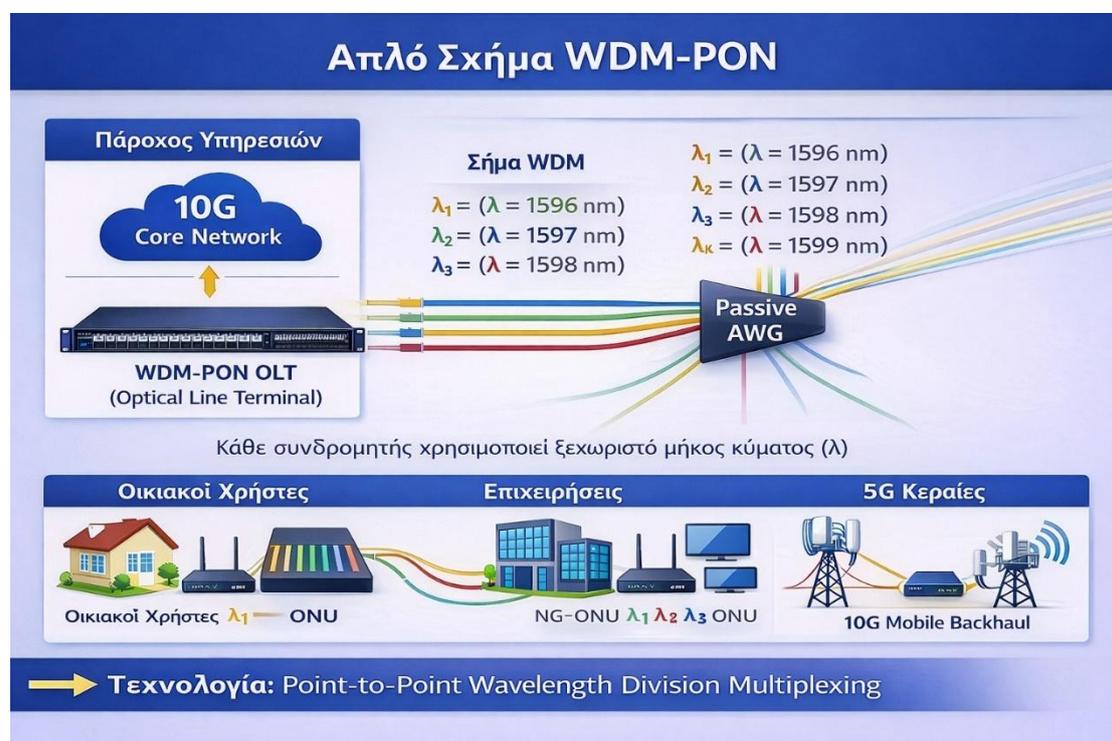
Όπως καθίσταται φανερό το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο Επόμενης Γενιάς 2 (Next Generation Passive Optical Network - 2-NG-PON2) συνδυάζει υψηλή απόδοση, δυναμική προσαρμοστικότητα και ανθεκτικότητα, ενώ υποστηρίζει σημαντικά τις εξελισσόμενες ανάγκες της κοινωνίας της πληροφορίας, παρέχοντας τη δυνατότητα κλιμακούμενης αύξησης χωρητικότητας και ευελιξίας μέσω Παθητικού Οπτικού Δικτύου Πολυπλεξίας Χρόνου και Μήκους Κύματος (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network -TWDM-PON) (Dixit et al., 2012; Ruffini, 2020).

2.6. WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network)

Η τεχνολογία WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network) διαφοροποιείται από τα κλασικά PON ως προς τον τρόπο διαμοιρασμού των πόρων, καθώς αξιοποιεί την πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (WDM) (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Αντίθετα με τις Time Division Multiplexing – Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM-based) αρχιτεκτονικές, όπου πολλαπλές Οπτικές Μονάδες Δικτύου (ONUs) μοιράζονται το ίδιο μήκος κύματος σε

διαφορετικό χρόνο, στο WDM-PON κάθε ONU αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος για την ανοδική ή καθοδική μετάδοση. Έτσι, η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται χωρίς προγραμματισμό του χρόνου στο επίπεδο MAC, καθώς η απομόνωση επιτυγχάνεται στο φασματικό πεδίο (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011).

Η παραπάνω προσέγγιση μεταβάλλει τον μηχανισμό κατανομής πόρων από χρονο-διαμοιραζόμενο σε φασματικά διαχωρισμένο, οδηγώντας σε διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης και σχεδιασμού, αλλά ταυτόχρονα εισάγοντας σε νέες απαιτήσεις εξοπλισμού και διαχείρισης δικτύου (Dixit et al., 2012). (Σχήμα 8)



Σχήμα 8 WDM-PON Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

Το WDM-PON αποτελεί μια μορφή οπτικής πρόσβασης με ισχυρότερα χαρακτηριστικά απομόνωσης διότι η ανάθεση ξεχωριστού καναλιού (wavelength) σε κάθε χρήστη μειώνει σημαντικά την πιθανότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ ροών και περιορίζει τα φαινόμενα συμφόρησης που συνδέονται με τον χρονικό διαμοιρασμό στα συστήματα Time Division Multiplexing – Πολυπλεξία Διάρθρωσης Χρόνου (TDM-PON) (Ballesta & Boltimore, 2017). Επιπλέον, ο διαχωρισμός του σε μήκη κύματος μπορεί να ενισχύσει την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια του μέσου, καθώς η

πρόσβαση ενός χρήστη στο κανάλι άλλου χρήστη είναι κατασκευαστικά περιορισμένη. Ωστόσο, η συνολική ασφάλεια εξακολουθεί να εξαρτάται τόσο από τον ενεργό εξοπλισμό όσο και από και τις πολιτικές διαχείρισης (Kramer & Pesavento, 2002; ITU-T, 2022).

Ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους πομποδέκτες, η τεχνολογία WDM-PON υποστηρίζει σημαντικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και παρουσιάζει υψηλή επεκτασιμότητα, καθώς η αύξηση του αριθμού χρηστών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσθήκης νέων μηκών κύματος (Ballesta & Boltimore 2017; Dixit et al., 2012; Sapundzhi et al., 2025). Επιπλέον, η χρήση αποκλειστικού μήκους κύματος ανά ONU περιορίζει τον ανταγωνισμό στο επίπεδο πρόσβασης, με αποτέλεσμα πιο προβλέψιμη συμπεριφορά ως προς την καθυστέρηση και το jitter σε σύγκριση με τις TDM-PON αρχιτεκτονικές (Ballesta & Boltimore, 2017; Dixit et al., 2012; Sapundzhi et al., 2025). Για τον παραπάνω λόγο, το WDM-PON θεωρείται κατάλληλο για εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις σταθερότητας και ποιότητας υπηρεσίας, όπως επιχειρησιακά ή κρίσιμα δικτυακά περιβάλλοντα (Ballesta et al., 2017; Dixit et al., 2012; Sapundzhi et al., 2025). Παρά τα ανωτέρω, η πρακτική υιοθέτησή του σε μεγάλη κλίμακα εξαρτάται από το κόστος του τερματικού εξοπλισμού και τις τεχνολογίες που μπορούν να μειώσουν την πολυπλοκότητα (Horváth et al., 2020).

Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι το κόστος. Η ανάγκη για tunable laser πομποδέκτες σε κάθε ONU, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, αυξάνει σημαντικά το τελικό κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας. Παράλληλα, η διαχείριση και συντήρηση του δικτύου είναι πιο σύνθετη, καθώς απαιτεί ακρίβεια στην παραμετροποίηση και τον συγχρονισμό των συχνοτήτων (Horváth et al., 2020; Dixit et al., 2012). Ως εκ τούτου ποικίλες προσεγγίσεις NG-PON2 υιοθετούν υβριδικά μοντέλα (TWDM), προκειμένου να διατηρούν τα επίπεδα χωρητικότητας, κόστους και δυνατότητας μετάβασης προηγούμενων προτύπων (Ruffini, 2020).

Παρά το γεγονός ότι το WDM-PON δεν έχει ακόμα υιοθετηθεί ευρέως, όπως υποστηρίζεται από τους Memon et al. (2025) αποτελεί σημαντικό συστατικό των μελλοντικών αρχιτεκτονικών πρόσβασης, κυρίως για εφαρμογές όπου απαιτείται πλήρης διαχωρισμός, χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά σταθερή μετάδοση. Παράλληλα, από ορισμένες κατευθύνσεις όπως τα coherent PON συστήματα

καθίσταται φανερό ότι η αύξηση χωρητικότητας προς 100G και άνω θα απαιτήσει εξελιγμένους μηχανισμούς φυσικού στρώματος και MAC (Media Access Control)/DBA, με σκοπό τη διατήρηση επιδόσεων χαμηλής καθυστέρησης σε αυξημένα split ratios (Zou et al., 2025).

Τέλος, εξέχουσα σημασία αποτελεί το γεγονός ότι διεξάγονται προσπάθειες μείωσης κόστους μέσω “colorless ONUs” (τερματικών που δεν απαιτούν ακριβή ρύθμιση laser ανά χρήστη), ώστε να καταστεί η WDM λογική ως μια εμπορικά βιώσιμη λύση. Η πορεία των εν λόγω τεχνικών μπορεί να αυξήσει την υιοθέτηση WDM-PON προσεγγίσεων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις χωρητικότητας και απομόνωσης είναι αυξημένες (Ballesta & Boltimore, 2017; Horváth et al., 2020).

Ωστόσο, το WDM-PON παρά το υψηλό κόστος και την πολυπλοκότητά του παρέχει δυνατότητες υψηλής απόδοσης, ιδιωτικότητα και επεκτασιμότητα, ενώ παραμένει τεχνολογία αιχμής για ειδικά σενάρια και υποδομές υψηλών απαιτήσεων, (Kramer, 2002; Zou et al., 2025).

2.7. Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών PON

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών παθητικών οπτικών δικτύων (PON) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλαπλών προτύπων, καθένα εκ των οποίων στοχεύει στην κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων και αφορά ποικίλες περιπτώσεις εφαρμογής. Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακα τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των τεχνολογιών EPON, GPON, XGS-PON, NG-PON2 και WDM-PON, όπως προκύπτουν από ποικίλες διεθνείς επιστημονικές μελέτες (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011; Ballest a& Boltimore, 2017; Zhang et al., 2020; Horváth et al., 2020).

Πίνακας 1 Σύγκριση τεχνολογιών PON

Τεχνολογία	Downstream / Upstream	Split Ratio	Απόσταση (km)	Αρχιτεκτονική	QoS	Κόστος	Επεκτασιμότητα	Παρατηρήσεις
EPON	1.25 Gbps / 1.25 Gbps	Έως 1:32	~20	TDM	Περιορισμένο	Χαμηλό	Μέτρια	Βασίζεται σε Ethernet MAC
GPON	2.5 Gbps / 1.25 Gbps	Έως 1:128	~20	TDM + GEM	Καλή	Μέτριο	Καλή	Ευρεία υιοθέτηση
XGS-PON	10 Gbps / 10 Gbps	Έως 1:64	~20	TDM	Βελτιωμένο	Υψηλό	Πολύ καλή	Συμμετρικές ταχύτητες
NG-PON2	40 Gbps (4x10)	Έως 1:64	~40*	TWDM	Πολύ καλή	Πολύ υψηλό	Εξαιρετική	Υψηλό κόστος πομποδε-κτών
WDM-PON	10 Gbps ανά κανάλι (WDM)	Δεν εφαρμόζεται	~60+	WDM	Άριστο	Πολύ υψηλό	Υψηλή (φασματική)	Αποκλειστικό μήκος κύματος ανά ONU

Από τη συγκριτική εξέταση των τεχνολογιών PON αναδεικνύεται ότι οι διαφορές τους δεν αφορούν αποκλειστικά τις ονομαστικές ταχύτητες μετάδοσης, αλλά και τη δομή της αρχιτεκτονικής, τους μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και τον τρόπο διαχείρισης της ανοδικής κίνησης. Η τεχνολογία EPON αποτελεί την απλούστερη υλοποίηση, καθώς βασίζεται σε εγγενή Ethernet λειτουργία, γεγονός που ευνοεί τη διαλειτουργικότητα και το χαμηλό κόστος. Ωστόσο, το περιορισμένο πλαίσιο QoS και η εξάρτηση από βασικούς μηχανισμούς χρονοπρογραμματισμού περιορίζουν την καταλληλότητά της σε περιπτώσεις εφαρμογής αυξημένων ή διαφοροποιημένων απαιτήσεων υπηρεσιών (Kramer & Pesavento, 2002; Horváth et al., 2020).

Η GPON εισάγει πιο ανεπτυγμένους μηχανισμούς διαχείρισης μέσω της ενθυλάκωσης GEM (GPON Encapsulation Method) και της έννοιας των T-CONTs (Transmission Containers) επιτρέποντας σαφέστερη κατηγοριοποίηση ροών και υποστήριξη QoS. Κατά συνέπεια, έχει καθιερωθεί ευρέως σε δίκτυα πρόσβασης, καθώς προσφέρει ικανοποιητική ισορροπία μεταξύ κόστους, λειτουργικής πολυπλοκότητας και απόδοσης, ιδίως σε περιβάλλοντα με μικτές υπηρεσίες (φωνή, δεδομένα, βίντεο) (Kramer & Pesavento, 2002; Sapundzhi et al., 2025).

Η αυξανόμενη ανάγκη για συμμετρικές ταχύτητες, κυρίως σε περιπτώσεις όπου το upstream φορτίο είναι αυξημένο οδήγησαν στη ανάπτυξη του XGS-PON. Η δυνατότητα συνύπαρξης με GPON στο ίδιο ODN καθιστά το XGS-PON ιδανική επιλογή για σταδιακή αναβάθμιση, χωρίς εκτεταμένες αλλαγές στην παθητική

υποδομή. Παράλληλα, η αυξημένη διαθέσιμη χωρητικότητα συμβάλλει στη βελτίωση του σχεδιασμού, ωστόσο δεν αναιρεί τη σημασία των πολιτικών DBA για τη διατήρηση χαμηλής καθυστέρησης και σταθερής συμπεριφοράς υπό μεταβαλλόμενα φορτία (Horvath et al., 2020; Memon et al., 2025).

Η NG-PON2 επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητες μέσω της υβριδικής αρχιτεκτονικής TWDM, καθώς συνδυάζει τον διαχωρισμό χρόνου και μήκους κύματος. Η παραπάνω προσέγγιση προσφέρει αυξημένη ευελιξία στη διαχείριση πόρων καθώς και δυνατότητες κλιμάκωσης, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται λειτουργικός διαχωρισμός ομάδων χρηστών ή υπηρεσιών. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος των πομπών δεν βοηθούν την ευρεία εμπορική υιοθέτησή του, καθιστώντας την τεχνολογία καταλληλότερη σε πιο εξειδικευμένα ή μεταβατικά σενάρια υψηλών απαιτήσεων (Dixit et al., 2012; Ruffini, 2020).

Τέλος, το WDM-PON διαφοροποιείται από τις TDM-based προσεγγίσεις, καθώς κάθε ONU εξυπηρετείται μέσω αποκλειστικού μήκους κύματος. Η απομόνωση του φάσματος προσφέρει υψηλό βαθμό προβλεψιμότητας απόδοσης και σταθερότητα καθυστέρησης, ειδικά σε εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις. Παρά τα πλεονεκτήματά του, το αυξημένο κόστος και η πολυπλοκότητα υλοποίησης περιορίζουν την εφαρμογή του κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις ή σε περιβάλλοντα όπου η λειτουργική απομόνωση υπερισχύει του κόστους (Ballesta & Boltimore, 2017; Aurzada et al., 2011).

Η επιλογή τεχνολογίας PON δεν αποτελεί ένα μονοδιάστατο ζήτημα ταχύτητας, αλλά έναν συνδυασμό παρεχόμενων υπηρεσιών, προφίλ κίνησης, απαιτήσεων καθυστέρησης και στρατηγικής εξέλιξης της υποδομής (Memon et al., 2025). Ειδικότερα σε περιβάλλοντα OLAN, η εν λόγω επιλογή οφείλει να λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά του upstream και τον ρόλο των μηχανισμών DBA, μολονότι από αυτούς καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό η πραγματική ποιότητα υπηρεσίας, καθώς και η βιωσιμότητα της αρχιτεκτονικής σε βάθος χρόνου (Memon et al., 2025).

2.8. Αξιολόγηση Μηχανισμών Κατανομής Εύρους Ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA) στα PON

Η αποδοτική κατανομή του εύρους ζώνης (bandwidth) αποτελεί σημαντικό παράγοντα ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών στα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON). Τα PON αποτελούν κατά βάση αρχιτεκτονικές με κοινό μέσο μετάδοσης και ως εκ τούτου απαιτούνται μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης στο μέσο MAC, οι οποίοι υλοποιούνται μέσω τεχνικών DBA. Η αποτελεσματικότητα των εν λόγω τεχνικών καθορίζει τη συνολική απόδοση του δικτύου, την καθυστέρηση, την απόκριση, και την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών και υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Πρακτικά, το DBA αποτελεί έναν μηχανισμό ο οποίος μετατρέπει την ονομαστική χωρητικότητα σε μια πραγματική εμπειρία για τον χρήστη, καθορίζοντας τον τρόπο διαμοιρασμού του upstream πόρου, όταν πολλοί χρήστες ενεργοποιούνται συγχρόνως (Memon et al., 2025).

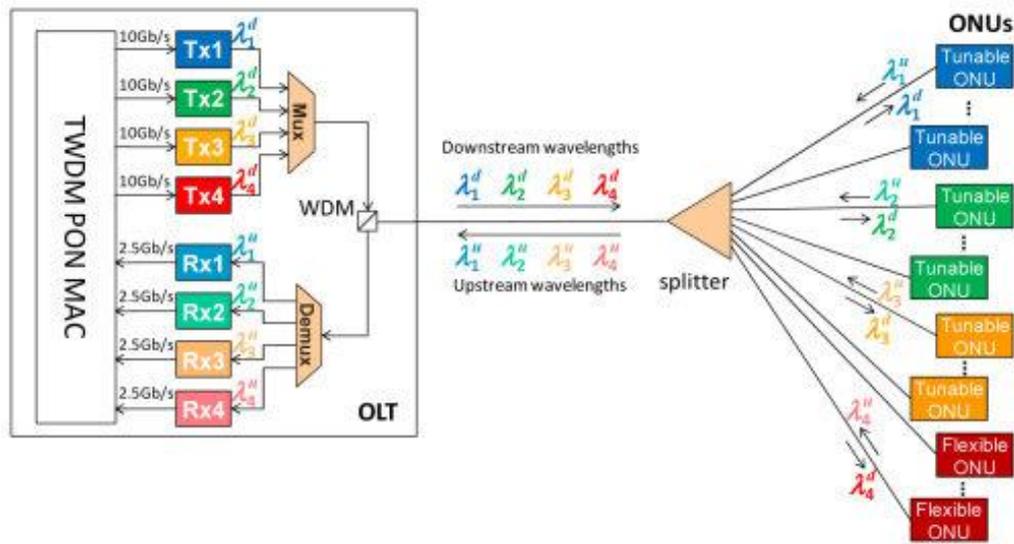
Στα πρότυπα GPON και XGS-PON, η ITU-T έχει ορίσει τον μηχανισμό T-CONT (Traffic Containers), ο οποίος επιτρέπει την ταξινόμηση των υπηρεσιών με βάση την προτεραιότητά τους. Πιο ειδικά, το OLT λαμβάνει περιοδικές αναφορές Buffer Occupancy Reports από τις ONUs και αποδίδει δυναμικά χρονοθυρίδες (time slots) στους χρήστες, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες (Zhang et al., 2020; Memon et al., 2025). Μολονότι, η ανωτέρω προσέγγιση υποστηρίζει QoS, οι πραγματικές επιδόσεις επηρεάζονται τόσο από το πόσο γρήγορα το OLT μπορεί να λάβει και να επεξεργαστεί όσο και να μετατρέψει τις πληροφορίες ζήτησης σε αποτελεσματικές αποφάσεις προγραμματισμού (Aurzada et al., 2011).

Τα κύρια προβλήματα των συμβατικών DBA αφορούν την αργή αντίδραση στις δυναμικές αλλαγές της κυκλοφορίας, την αδυναμία πρόβλεψης αιχμών ζήτησης, και τις καθυστερήσεις συγχρονισμού ανάμεσα στο OLT και τις ONUs. Οι εν λόγω περιορισμοί εντείνονται στα δίκτυα επόμενης γενιάς, όπως το NG-PON2 ή σε περιπτώσεις εφαρμογής 5G/6G-τύπου fronthaul, στις οποίες οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση και αξιοπιστία είναι αυστηρότερες και η ανοδική κίνηση συχνά παρουσιάζει υψηλή μεταβλητότητα (Memon et al., 2025). Επιπλέον, ο προγραμματισμός οφείλει να λαμβάνει αποφάσεις όχι μόνο για τον χρόνο αλλά και για το μήκος κύματος, όταν η αρχιτεκτονική γίνεται πολυκαναλική (TWDM),

αυξάνοντας έτσι τη συνδυαστική πολυπλοκότητα (Dixit et al., 2012; Ganguli & Ruffini, 2025).

Σε σύγχρονες μελέτες προτείνεται η χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI), όπως η μηχανική μάθηση και η ομοσπονδιακή/κατανεμημένη μάθηση, με σκοπό την πρόβλεψη της κίνησης και τη βελτιστοποίηση της κατανομής του εύρους ζώνης. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, η κεντρική ιδέα είναι ότι η καλύτερη πρόβλεψη της ζήτησης επιτρέπει στο OLT να προετοιμάσει μια πιο αποδοτική κατανομή χρονοθυρίδων, μειώνοντας έτσι τον χρόνο αναμονής και τα φαινόμενα συμφόρησης, κυρίως σε περιπτώσει συνύπαρξης ροών με διαφορετική προτεραιότητα (Memon et al., 2025). Όταν τα PON καλούνται να υποστηρίξουν υπηρεσίες με χαμηλή ανοχή στην καθυστέρηση, όπου ακόμη και μικρές αυξήσεις latency επηρεάζουν την ποιότητα υπηρεσίας, η κατεύθυνση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία (Ganguli & Ruffini, 2025).

Στην πρόσφατη μελέτη των Ganguli και Ruffini (2025), προτείνεται ένας μηχανισμός real-time ικανός για upstream scheduling σε περιβάλλον multi-tenant TWDM-PON, εισάγοντας αλγόριθμο Dynamic Time and Wavelength Allocation (DTWA) (Σχήμα 9). Το κρίσιμο σημείο της προσέγγισης είναι ότι το σύστημα εκτός από τον προγραμματισμό των time slots, συνδυάζει την επιλογή χρονοθυρίδας με επιλογή upstream μήκους κύματος, προκειμένου να βελτιστοποιήσει τη συμμόρφωση με Service Level Agreements (SLAs) σε πραγματικές συνθήκες κίνησης (Ganguli & Ruffini, 2025). Πρακτικά, τέτοιου είδους προσεγγίσεις αναδεικνύουν ότι η επόμενη γενιά DBA δεν θα αφορά μόνο την ταχύτητα εκτέλεσης, αλλά και το πόσο αποτελεσματικά ενσωματώνει πολλαπλές διαστάσεις πόρων, χωρίς να εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση λόγω υπολογιστικής πολυπλοκότητας.



Σχήμα 9 Αρχιτεκτονική TWDM PON

Παράλληλα, η μελέτη των Zou et al. (2025) εστιάζει στη σχεδίαση DBA για 100G coherent PON, αντιμετωπίζοντας προβλήματα που προκύπτουν όταν τα συστήματα λειτουργούν σε πολύ υψηλά data rates και σε μεγάλα split ratios (π.χ. έως 512 τελικούς χρήστες). Από τη μελέτη αποδεικνύεται ότι η μετάβαση σε coherent τεχνολογίες πρόσβασης προϋποθέτει νέα λογική στο MAC επίπεδο, διότι μικρές ασυμφωνίες χρονισμού ή αναποτελεσματική κατανομή πόρων ενδέχεται να οδηγήσουν σε αισθητή υποβάθμιση latency και αξιοποίησης (Zou et al., 2025). Έτσι, η κλιμάκωση χωρητικότητας προς τα 100G αποτελεί ζήτημα αποδοτικού DBA, ο οποίος διατηρεί την προβλεψιμότητα της υπηρεσίας.

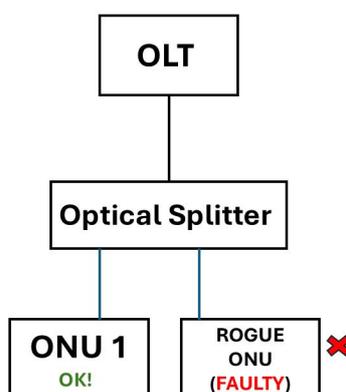
Συμπερασματικά, η συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών PON ανέδειξε την εξέλιξή τους από τις πρώτες υλοποιήσεις (EPON, GPON) προς πιο προηγμένα πρότυπα όπως XGS-PON, NG-PON2 και WDM-PON, τα οποία καλύπτουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε ταχύτητα, ευελιξία και απόδοση (Aurzada et al., 2011; Ballesta & Boltimore, 2021). Η λειτουργία των αντίστοιχων μηχανισμών DBA αποδείχθηκε καίρια όσον αφορά τη διατήρηση της ποιότητας της υπηρεσίας, κυρίως σε περιβάλλοντα υψηλής μεταβλητότητας ζήτησης, ενώ γίνεται απαιτητικότερη όσο το δίκτυο αποκτά πολυκαναλικές δυνατότητες ή καλείται να ικανοποιήσει αυστηρά latency constraints (Memon et al., 2025; Ganguli & Ruffini, 2025).

Ωστόσο, εκτός των τεχνολογικών δυνατοτήτων, η αξιοπιστία και ασφάλεια του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας κατέχουν καθοριστικό ρόλο στη

συνολική αποδοτικότητα ενός PON. Συγκεκριμένα, σε point-to-multipoint περιβάλλοντα, στα οποία πολλοί χρήστες μοιράζονται κοινό upstream κανάλι, η αστοχία ενός τερματικού μπορεί να έχει δυσανάλογα μεγάλο αντίκτυπο, καθιστώντας αναγκαία την εξέταση θεμάτων όπως rogue ONUs, καθώς και μηχανισμών ανίχνευσης και μετριασμού (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019). Η κατανόηση των εν λόγω πτυχών σχετίζεται φυσικά με την ενσωμάτωση PON σε τοπικά δίκτυα (OLAN), όπου η διαθεσιμότητα και η σταθερότητα έχουν πρακτικό επιχειρησιακό βάρος (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

2.9. Αξιοπιστία και Ασφάλεια σε Περιβάλλοντα PON: Rogue ONU

Μολονότι τα PON θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστα λόγω της παθητικής φύσης του ODN (ITU-T, 2022). Η αρχιτεκτονική point-to-multipoint παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις λειτουργικής ασφάλειας και σταθερότητας κυρίως στο upstream (ITU-T, 2022). Ένα χαρακτηριστικό και πρακτικά σημαντικό πρόβλημα είναι η περίπτωση “rogue” ή “babbling” Optical Network Unit (ONU), δηλαδή τερματικού εξοπλισμού που λόγω σφάλματος λογισμικού, σφάλματος MAC, ή βλάβης πομπού μπορεί να εκπέμπει εκτός της εκχωρημένης χρονοθυρίδας ή ακόμη και συνεχώς, προκαλώντας συγκρούσεις ή αυξημένο θόρυβο στο κανάλι (ITU-T, 2022) (Σχήμα 10).



Σχήμα 10 Rogue ONU σε Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

Απόρροια του παραπάνω είναι η υποβάθμιση της υπηρεσίας για πολλούς συνδρομητές του ίδιου δένδρου διανομής, καθώς το upstream είναι κοινό μέσο και η διαταραχή δεν περιορίζεται μόνο στον χρήστη που έχει πρόβλημα (ITU-T, 2022).

Πιο συγκεκριμένα, υφίστανται ορισμένες κύριες κατηγορίες αιτιών και αντίστοιχες προσεγγίσεις πρόληψης ή ανίχνευσης σφαλμάτων. Ορισμένα σφάλματα λογισμικού (software errors) και σφάλματα στο επίπεδο MAC μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένη συμπεριφορά εκπομπής, ενώ βλάβες στο υλικό του πομπού (transmitter hardware) ενδέχεται να καταστήσουν το laser μόνιμα σε κατάσταση ενεργοποίησης (on), δημιουργώντας συνεχή παρεμβολή (ITU-T, 2022). Με σκοπό τον εντοπισμό χαρακτηριστικών προτύπων σφαλμάτων σε επίπεδο bursts και την ενεργοποίηση διαδικασιών απομόνωσης και μετριάσμου, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η ύπαρξη μηχανισμών αυτοπαρακολούθησης στην ONU (autonomous monitoring), καθώς και μηχανισμών παρακολούθησης από την πλευρά του OLT (OLT-based monitoring) (ITU-T, 2022).

Το παραπάνω ζήτημα κατέχει μεγαλύτερες διαστάσεις στα επιχειρησιακά σενάρια POL/OLAN, επειδή η υποδομή PON μπορεί να εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό τελικών συσκευών (γραφεία, χώρους εργασίας, τμήματα ενός οργανισμού) (Gagnon, 2019). Έτσι, μια αστοχία τερματικού ενδέχεται να οδηγήσει σε δυσανάλογα μεγάλη επίδραση στη λειτουργία του οργανισμού, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη θέσπιση διαδικασιών ανίχνευσης και αποκατάστασης, καθώς και ορθών πρακτικών εγκατάστασης και ελέγχου της οπτικής υποδομής (Gagnon, 2019). Παρόμοια, σύμφωνα με τον Gagnon (2019) η σημασία των πρακτικών ελέγχου (inspection/OTDR/activation testing) αποτελεί προϋπόθεση για υψηλή αξιοπιστία σε POL εγκαταστάσεις, ενώ τονίζεται ότι οι μη ποιοτικές φυσικές συνδέσεις αποτελούν τις συχνότερες αιτίες προβλημάτων σε οπτικά δίκτυα. Όπως φαίνεται, η αξιολόγηση των τεχνολογιών PON δεν πρέπει να περιορίζεται σε ονομαστικές ταχύτητες ή split ratios, αλλά να περιλαμβάνει και τη λειτουργική ανθεκτικότητα του συστήματος έναντι σφαλμάτων τερματικών και αποκλίσεων συμπεριφοράς (Gagnon, 2019; ITU-T, 2022; Mechdyne, 2022). Η ενσωμάτωση των εν λόγω παραμέτρων είναι απαραίτητη, ιδιαίτερα όταν το PON αποτελεί την κύρια υποδομή πρόσβασης ή οπτικό τοπικό δίκτυο, όπου πρακτικά η διαθεσιμότητα και η προβλεψιμότητα υπηρεσίας είναι απαραίτητη (ITU-T, 2022; Mechdyne, 2022).

3.Οπτικά Τοπικά Δίκτυα (OLAN): Αρχιτεκτονικές και Εφαρμογές

3.1 Ορισμός και Χαρακτηριστικά των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)

Τα Οπτικά Τοπικά Δίκτυα (Optical Local Area Networks – OLANs), συχνά αποκαλούνται και Passive Optical LAN (POL) και αποτελούν την εξέλιξη της τοπικής δικτύωσης μέσω της αξιοποίησης αρχιτεκτονικών Παθητικών Οπτικών Δικτύων (Passive Optical Networks – PON) σε περιβάλλοντα κτιρίων ή campus (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022; Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Η τεχνολογία πρόσβασης, η οποία αρχικά σχεδιάστηκε για μαζική ευρυζωνική διανομή (π.χ. GPON/EPON), μεταφέρεται σε οργανισμούς με σκοπό την παροχή υψηλής χωρητικότητας, κλιμάκωσης και απλουστευμένης διαχείρισης, μειώνοντας την ανάγκη για εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ενεργών μεταγωγέων πρόσβασης στα επίπεδα ενός κτιρίου (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022; Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011).

Σχετικά με το ζήτημα της αρχιτεκτονικής, ένα OLAN εδράζεται σε τοπολογία point-to-multipoint. Συγκεκριμένα, ένας Οπτικός Τερματικός Σταθμός (Optical Line Terminal – OLT) συνδέεται μέσω παθητικού δικτύου διανομής (Optical Distribution Network – ODN) με παθητικούς διαχωριστές (splitters) και καταλήγει σε Οπτικές Μονάδες και Τερματικά Δικτύου (Optical Network Units/Terminals – ONU/ONT) κοντά στις τελικές συσκευές (Zhang et al., 2020; Horváth et al., 2020; Mechdyne, 2022; Kramer, 2002). Η δομή του είναι κοινή με τις PON υλοποιήσεις πρόσβασης, όμως το OLAN εφαρμόζεται ως η βάση για τις υπηρεσίες τοπικής δικτύωσης, επιτρέποντας διασύνδεση τερματικών, Wi-Fi access points, Voice over Internet Protocol (VoIP), Internet Protocol Television (IPTV) και Internet of Things (IoT) πάνω σε ένα ενιαίο οπτικό υπόστρωμα (Zhang et al., 2020; Horváth et al., 2020; Mechdyne, 2022; Kramer & Pesavento, 2002).

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του OLAN είναι ότι μεταξύ OLT και ONU/ONT δεν παρεμβάλλονται ενεργές συσκευές πεδίου, μειώνοντας έτσι τις ανάγκες τροφοδοσίας, τις απαιτήσεις ψύξης, καθώς και τα σημεία πιθανής αστοχίας (Ballesta

& Boltimore, 2017; Aurzada et al., 2011; Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Η παθητική φύση της διανομής αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα των PON, καθώς μειώνει τόσο το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure - OPEX – Λειτουργικό Κόστος) όσο και τη διαχειριστική πολυπλοκότητα, κυρίως σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπου το πλήθος των ενδιάμεσων switches αυξάνει το ρίσκο βλαβών και τον χρόνο αποκατάστασης (Ballesta & Boltimore, 2017; Aurzada et al., 2011; Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Στη λειτουργία μετάδοσης τα OLAN κατέχουν την κοινόχρηστη φύση των PON, δηλαδή στο downstream το σήμα διανέμεται προς όλες τις ONU/ONTs και φιλτράρεται στον κατάλληλο τερματικό, ενώ στο upstream απαιτείται συντονισμός (π.χ. TDMA) και μηχανισμοί δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (DBA), με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων και την εξασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας. Το παραπάνω κατέχει κεντρικό ρόλο σε επιχειρησιακά enterprise περιβάλλοντα όπου οι εφαρμογές δεν είναι ομοιόμορφες, μολονότι άλλες απαιτούν υψηλό throughput, ενώ άλλες χαμηλό latency ή σταθερότητα (jitter control) (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025).

Σχετικά με τη φυσική τους υποδομή, τα OLAN στηρίζονται σε οπτική ίνα (συνήθως single-mode) για να εξασφαλίσουν μεγάλες αποστάσεις και δυνατότητα αναβάθμισης (Mechdyne, 2022). Η οπτική καλωδίωση θεωρείται ως μια επένδυση μακράς διάρκειας, μολονότι σε παραδοσιακά LAN αναβαθμίσεις ταχύτητας συχνά επιβάλλονται αλλαγές της καλωδίωσης ή των ενεργών σημείων ανά όροφο, στο OLAN ποικίλες αναβαθμίσεις μεταφέρονται στον κεντρικό εξοπλισμό και στα άκρα (OLT/ONT), διατηρώντας έτσι το παθητικό δίκτυο (Mechdyne, 2022; Horváth et al., 2020; Ruffini, 2020). Η εν λόγω στρατηγική είναι συμβατή με την εξέλιξη από GPON σε XGS-PON ή και σε NG-PON2 σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογής (Mechdyne, 2022; Horváth et al., 2020; Ruffini, 2020).

Τέλος, τα OLAN οφείλουν να αντιμετωπίζονται ως μια αρχιτεκτονική πλατφόρμα, καθώς αφενός μειώνουν τον αριθμό ενεργών στοιχείων στο πεδίο, διευκολύνουν την κεντρική πολιτική διαχείριση και αφετέρου επιτρέπουν την ευκολότερη κλιμάκωση. Η ωριμότητα των προτύπων PON και οι τεκμηριωμένες πρακτικές εγκατάστασης και ελέγχου τους (π.χ. οπτικές μετρήσεις, διαδικασίες ενεργοποίησης) αποτελούν

ισχυρούς παράγοντες ενίσχυσης της αξιοπιστίας του μοντέλου σε πραγματικά δίκτυα οργανισμών (Gagnon, 2019).

3.2 Σύγκριση Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLAN) με Παραδοσιακά Ethernet LAN

Τα δίκτυα OLAN διαφέρουν με τα Ethernet LAN στη φιλοσοφία σχεδίασής τους. Πιο συγκεκριμένα, το παραδοσιακό Ethernet LAN βασίζεται σε ιεραρχική δομή (access-distribution-core) σύμφωνα με την οποία η κλιμάκωση επιτυγχάνεται με περισσότερους switches, uplinks και τηλεπικοινωνιακούς χώρους. Αντίθετα, το OLAN μεταφέρει τη συγκέντρωση του ενεργού εξοπλισμού και της λειτουργικής πολυπλοκότητας στο κεντρικό σημείο (OLT), ενώ μετατρέπει τη διανομή σε παθητικό δένδρο, μειώνοντας σημαντικά τον αριθμό των ενδιάμεσων ενεργών κόμβων. Έτσι, συμβάλλει θετικά τόσο στη διαχειριστική πολυπλοκότητα όσο και στον αριθμό των πιθανών σημείων βλάβης (Mechdyne, 2022; Horváth et al., 2020; Aurzada et al., 2011).

Σε επίπεδο φυσικών περιορισμών, το Ethernet LAN με χαλκό έχει τυπικό όριο 100 μέτρα ανά σύνδεση, οδηγώντας σε πολλαπλούς ενδιάμεσους κατανομητές και ενεργό εξοπλισμό ανά κτίριο και όροφο σε campus περιβάλλοντα (Zhang et al., 2020; Ballesta & Boltimore, 2017; Gagnon, 2019).. Από την άλλη μεριά, το OLAN είναι βασισμένο σε οπτική ίνα και μπορεί να καλύψει τυπικά έως ~20 km χωρίς ενεργό ενδιάμεσο εξοπλισμό (ανάλογα με οπτικό budget και split ratio), ενώ έτσι επιτρέπει τη σχεδίαση μεγάλων συγκροτημάτων και εγκαταστάσεων με με λιγότερα κατανομημένα σημεία ενεργού εξοπλισμού (Zhang et al., 2020; Ballesta & Boltimore, 2017; Gagnon, 2019).

Ως προς την απόδοση, ένα Ethernet LAN δύναται να παρέχει αφιερωμένη χωρητικότητα ανά port, ενώ σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν το oversubscription (υπερδέσμευση χωρητικότητας) και η φόρτιση των uplinks (συνδέσεων ανόδου). Η χωρητικότητα στο OLAN, μοιράζεται μέσω της PON λογικής, δηλαδή από τη μία πλευρά τα πρότυπα (π.χ. GPON, XGS-PON, NG-PON2) προσφέρουν υψηλή ακαθάριστη χωρητικότητα, ενώ από την άλλη η πραγματική εξυπηρέτηση ανά χρήστη εξαρτάται από πολιτικές προγραμματισμού και DBA (Kramer, 2002; Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025). Το παραπάνω δεν αποτελεί

μειονέκτημα, αλλά ένα διαφορετικό μοντέλο, που λειτουργεί ιδιαίτερα αποδοτικά σε περιπτώσεις στατιστικής πολυπλεξίας και όχι σε ταυτόχρονη πλήρη χρήση από όλους (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025).

Τα OLAN κατέχουν σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά το λειτουργικό κόστος και την ενεργειακή κατανάλωση λόγω μείωσης ενεργών συσκευών πεδίου. Σε Ethernet LAN, κάθε τηλεπικοινωνιακός χώρος απαιτεί τροφοδοσία, UPS, ψύξη και συντήρηση για switches (Gagnon, 2019). Ωστόσο, σε OLAN η παθητική διανομή μειώνει τις παραπάνω απαιτήσεις και συμβάλλει στη μετρήσιμη εξοικονόμηση ενέργειας και χώρου, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε οργανισμούς που επιδιώκουν μείωση ενεργειακού αποτυπώματος και πιο απλή κτιριακή υποδομή δικτύου (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Επίσης, η επεκτασιμότητα διαφοροποιείται ουσιαστικά, καθώς σε Ethernet LAN η αύξηση των τερματικών σημείων δικτύου (endpoints) συχνά απαιτεί νέους switches/ports και πιθανώς νέο uplink σχεδιασμό. Αντίθετα, σε OLAN η επέκταση γίνεται κυρίως με προσθήκη ONTs/ONUs και κατάλληλη διαχείριση splitters/ports στο OLT, διατηρώντας το παθητικό δίκτυο σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η εν λόγω λογική ταιριάζει ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα που αριθμός endpoints αυξάνεται λόγω IoT, Wi-Fi densification ή νέων υπηρεσιών (Horváth et al., 2020; Mechdyne, 2022; Ballesta & Boltimore, 2017).

Αναφορικά με το ζήτημα της ασφάλειας, η οπτική ίνα είναι πιο δύσκολο να υποκλαπεί χωρίς φυσική επέμβαση, ενώ υπάρχουν και μηχανισμοί κρυπτογράφησης και ελέγχου που εφαρμόζονται στα συστήματα PON (ITU-T, 2022; Kramer & Pesavento, 2002; Gagnon, 2019). Παράλληλα, όμως, η point-to-multipoint φύση χρήζει προσοχής σε θέματα όπως τον ορθό έλεγχο πρόσβασης και την αντιμετώπιση κακόβουλης ή ελαττωματικής συμπεριφοράς τερματικών (π.χ. rogue ONU) (ITU-T, 2022; Kramer & Pesavento, 2002; Gagnon, 2019).

Το OLAN λοιπόν διακρίνεται για τη χρήση του σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπου η μείωση των ενεργών στοιχείων και η κεντρική διαχείριση προσφέρουν πολλαπλά οφέλη, ενώ το Ethernet LAN αποτελεί ακόμη ένα ισχυρό μοντέλο σε μικρότερες εγκαταστάσεις ή σε περιβάλλοντα όπου η αφιερωμένη χωρητικότητα ανά σύνδεση

και η απλότητα της point-to-point αρχιτεκτονικής καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες (Mechdyne, 2022).. Τέλος, η επιλογή είναι ζήτημα θέματος κλίμακας, προφίλ χρήσης και στρατηγικής αναβάθμισης της υποδομής (Mechdyne, 2022).

3.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)

Ένα κύριο και εμφανές πλεονέκτημα των OLAN, το οποίο ενισχύει τον αποδοτικό και αξιόπιστο χαρακτήρα του στη μαζική διανομή υπηρεσιών είναι η αρχιτεκτονική απλοποίηση (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002; Mechdyne, 2022). Συγκεκριμένα, η μετάβαση από πολλαπλούς access switches σε παθητική διανομή με splitters συμβάλλει στη μείωση του αριθμού των ενεργών συσκευών σε τηλεπικοινωνιακούς χώρους. Ως αποτέλεσμα, μειώνονται τα σημεία αστοχίας και η ανάγκη συντήρησης στο πεδίο (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002; Mechdyne, 2022).

Η προσέγγιση αυτή εδράζεται στο ευρύτερο πλεονέκτημα των PON αρχιτεκτονικών που έχουν αναλυθεί στη βιβλιογραφία ω (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002; Mechdyne, 2022).

Ένα επιπλέον κύριο πλεονέκτημά του είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Σε μεγάλα δίκτυα κτιρίων, η ηλεκτρική κατανάλωση και η ψύξη πολλών switches και closets μπορεί να αποτελεί σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους. Ειδικότερα, τα OLAN μεταφέρουν ένα μεγάλο μέρος της λειτουργίας σε κεντρικό εξοπλισμό, ενώ μειώνουν τη διάσπαρτη κατανάλωση, αποτελώντας ουσιαστική πηγή εξοικονόμησης, ειδικά σε οργανισμούς με στόχο την ανάπτυξη οικολογικών υποδομών (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Αναφορικά με την απόδοση, δύνανται να αξιοποιήσουν σύγχρονα πρότυπα PON (π.χ. XGS-PON, NG-PON2), με σκοπό την παροχή υψηλής συνολικής χωρητικότητας και ευελιξίας στην εξυπηρέτηση διαφορετικών υπηρεσιών. Ωστόσο, επειδή αποτελεί ένα κοινόχρηστο μέσο, το πραγματικό throughput και η καθυστέρηση καθορίζονται σημαντικά από τους μηχανισμούς DBA και τις QoS πολιτικές. Σύμφωνα με ποικίλες μελέτες αποδεικνύεται ότι η αποδοτική κατανομή upstream είναι κύριος παράγοντας επιδόσεων και οι αλγόριθμοι DBA διαφοροποιούν σημαντικά την καθυστέρηση και

την εμπειρία εφαρμογών υπό δυναμικά φορτία (Sapundzhi et al., 2025; Memon et al., 2025; Aurzada et al., 2011).

Μολονότι η ασφάλεια αποτελεί πλεονέκτημα, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή. Συγκεκριμένα, από τη μία πλευρά το οπτικό μέσο δυσχεραίνει την παθητική υποκλοπή και υποστηρίζονται τεχνικές κρυπτογράφησης και ελέγχου, ενώ από την άλλη πολλοί χρήστες μοιράζονται κοινή υποδομή και συνεπώς χρειάζεται προσοχή σε θέματα όπως απομόνωση υπηρεσιών (π.χ. VLANs) και αντιμετώπιση προβληματικών τερματικών που μπορεί να διαταράξουν το upstream (rogue/babbling ONU) (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019; Kramer & Pesavento, 2002). Σε μελέτες των Gagnon (2019) και Kramer (2002) έχουν αναδειχθεί τα παραπάνω σενάρια ως πρακτικό θέμα λειτουργικής ασφάλειας και αξιοπιστίας, ενώ προτείνονται κατευθύνσεις ανίχνευσης και μετριασμού των εν λόγω θεμάτων.

Αναφορικά με τους περιορισμούς, κύριο ρόλο κατέχει το αρχικό κόστος και η ανάγκη σωστής μελέτης. Ειδικότερα, αν και το OLAN συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής, η αρχική προμήθεια OLT/ONT εξοπλισμού και η οπτική εγκατάσταση ενδέχεται να είναι υψηλότερη από μία Ethernet αναβάθμιση, κύριως σε μικρές εγκαταστάσεις. Κατά τους Gagnon (2019), Mechdyne (2022) και Ballesta & Boltimore (2017) η οικονομική υπεροχή τείνει να αναδεικνύεται κατά κύριο λόγο σε μεσαίες έως μεγάλες κλίμακες, στις οποίες η μείωση των closets και των switches έχει ουσιαστική βαρύτητα.

Η εξάρτηση από σωστή παραμετροποίηση και επάρκεια τεχνικού προσωπικού αποτελεί έναν επίσης κύριο περιορισμό. Δηλαδή, μολονότι μειώνονται οι ενεργές συσκευές, αυξάνεται η ανάγκη κατανόησης οπτικών μετρήσεων, διαδικασιών ενεργοποίησης, και διαχείρισης πολιτικών μέσω OLT (Gagnon, 2019). Επιπλέον, η εμπειρία από εγκαταστάσεις οπτικών δικτύων καθιστά φανερό ότι πρακτικά προβλήματα (π.χ. απώλειες, κακή καθαριότητα συνδέσμων, λάθη σε split ratios) επιδρούν τελικά περισσότερο στην πραγματική απόδοση (Gagnon, 2019).

Επιπρόσθετα, ένας ακόμη περιορισμός, που έχει ιδιαίτερη σημασία σε απαιτητικές εφαρμογές, είναι η συμπεριφορά καθυστέρησης και συμφόρησης σε περιπτώσεις έντονης πίεσης του δικτύου (Poonam & Rani, 2013; Sapundzhi et al., 2025; Horváth et al., 2020). Σε ποικίλες μελέτες τονίζεται ότι η κατανομή εύρους ζώνης και οι

μηχανισμοί αντιμετώπισης αστοχιών και αναδρομολόγησης επηρεάζουν καθοριστικά το end-to-end delay, ειδικά σε τοπολογίες δένδρου ή σε σενάρια με υψηλή μεταβλητότητα κίνησης. Συγκεκριμένα, σε τέτοια περιβάλλοντα η αξιολόγηση καθυστέρησης και χωρητικότητας αποτελεί κύριο παράγοντα για την καταλληλότητα μιας λύσης (Poornam & Rani, 2013; Sapundzhi et al., 2025; Horváth et al., 2020).

3.4 Περιπτώσεις Εφαρμογής των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)

Τα OLAN εφαρμόζονται σε σημαντικό βαθμό σε πανεπιστημιούπολεις και εκπαιδευτικά ιδρύματα, όπου υπάρχουν πολλαπλά κτίρια και αυξημένη ανάγκη για κεντρική διαχείριση και γρήγορη κλιμάκωση λόγω συνεχούς αύξησης χρηστών και συσκευών (εργαστήρια, Wi-Fi, e-learning, IoT) (Mechdyne, 2022). Η δυνατότητα κάλυψης μεγάλων αποστάσεων με παθητική διανομή και η μείωση των ενδιάμεσων τηλεπικοινωνιακών χώρων λειτουργεί ως ένα πρακτικό πλεονέκτημα κυρίως σε περιπτώσεις αναβάθμιση της υποδομής χωρίς εκτεταμένες παρεμβάσεις (Mechdyne, 2022; Zhang et al., 2020; Horváth et al., 2020).

Ακόμη, στον χώρο της υγείας τα OLAN υποστηρίζουν εφαρμογές που χρήζουν σταθερότητας και πολιτικών απομόνωσης υπηρεσιών, όπως τον διαχωρισμό δικτύου ανά τμήμα (VLAN segmentation), την υποστήριξη συστημάτων εικόνας και δεδομένων και την αξιόπιστη σύνδεση 24 ώρες ανά 24ωρο. Επειδή το δίκτυο μεταφέρει κρίσιμη πληροφορία, η διαθεσιμότητα και η λειτουργική ασφάλεια είναι απαραίτητες και επομένως ζητήματα όπως ο κεντρικός έλεγχος των πολιτικών, η ανίχνευση προβληματικών τερματικών και οι καλές πρακτικές εγκατάστασης οπτικού μέρους γίνονται βασικά κριτήρια (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019; Kramer & Pesavento, 2002).

Επίσης, η ανάγκη για υψηλή πυκνότητα endpoints (Wi-Fi APs, IPTV, VoIP, smart-room συστήματα) και η απαίτηση για απλοποίηση καλωδίωσης στον τουρισμό και συγκεκριμένα στις μεγάλες ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις καθιστούν το OLAN πολύ σημαντικά. Μολονότι η εγκατάσταση πρέπει να λειτουργεί χωρίς διακοπές, η δυνατότητα κεντρικής διαχείρισης και η μείωση ενεργών σημείων στο πεδίο ενισχύουν την επιχειρησιακή αξιοπιστία, ενώ μέσω της οπτικής ίνας υποστηρίζονται

οι μελλοντικές αυξήσεις χωρητικότητας χωρίς δομικές αλλαγές στην καλωδίωση (Mechdyne, 2022; Gagnon, 2019).

Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα και εγκαταστάσεις Industry 4.0, τα OLAN καλύπτουν ορισμένες κύριες ανάγκες όπως την ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και την κάλυψη μεγάλων χώρων παραγωγής και αποθηκών, καθώς και την ικανότητα υποστήριξης αισθητήρων, αυτοματισμών και συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (Poonam & Rani, 2013; Horváth et al., 2020; Ballesta & Boltimore, 2017). Στα εν λόγω περιβάλλοντα η καθυστέρηση και η συμπεριφορά σε αστοχίες και συμφόρηση είναι σημαντικοί παράμετροι και ως εκ τούτου η αξιολόγηση delay/capacity και η ύπαρξη μηχανισμών ανθεκτικότητας κατέχουν κομβικό ρόλο πριν την υιοθέτηση (Poonam & Rani, 2013; Horváth et al., 2020; Ballesta & Boltimore, 2017).

Σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις, αεροδρόμια και γενικότερα σημαντικές υποδομές φαίνεται ότι το OLAN αξιολογείται κυρίως ως προς τη διαθεσιμότητα, τη δυνατότητα αυστηρού διαχωρισμού υπηρεσιών και την επιχειρησιακή ασφάλεια (Gagnon, 2019). Συγκεκριμένα, η χρήση παθητικής διανομής περιορίζει τα «ευαίσθητα» ενεργά σημεία σε διάσπαρτους χώρους, ενώ η κεντρική εποπτεία επιτρέπει πιο ελεγχόμενες πολιτικές πρόσβασης (ITU-T, 2022; Mechdyne, 2022; Gagnon, 2019). Παράλληλα, ζητήματα όπως rogue ONU ή μη εξουσιοδοτημένη συμπεριφορά τερματικών οφείλουν να αντιμετωπίζονται με θεσμικά τεκμηριωμένες πρακτικές (ITU-T, 2022; Mechdyne, 2022; Gagnon, 2019).

3.5 Προκλήσεις Υλοποίησης και Μελλοντικές Τάσεις των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLANs)

Μια κύρια τεχνική πρόκληση είναι η σωστή διαστασιολόγηση της κοινόχρηστης χωρητικότητας, υποδηλώνοντας τον καθορισμό του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης και του τρόπου κατανομής του μεταξύ χρηστών και υπηρεσιών, σε συνδυασμό με την επιλογή κατάλληλων πολιτικών QoS/DBA, ώστε το OLAN να εξυπηρετεί τόσο εφαρμογές υψηλού ρυθμού μετάδοσης όσο και εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση χωρίς υποβάθμιση (Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025; Aurzada et al., 2011). Σε ποικίλες μελέτες έχει αναδειχθεί ότι οι μηχανισμοί DBA και οι κλάσεις υπηρεσίας επιδρούν άμεσα στην καθυστέρηση, στο jitter και στη δικαιοσύνη της κατανομής πόρων, ειδικά σε περιπτώσεις χρήσης ενός PON ως

υποδομή τοπικού δικτύου, όπου οι χρήστες αναμένουν συμπεριφορά αντίστοιχη ενός LAN (Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025; Aurzada et al., 2011).

Επείγουσας σημασίας είναι επίσης η αξιολόγηση καθυστέρησης και χωρητικότητας σε μεγάλες τοπολογίες, κυρίως σε campus ή βιομηχανικά περιβάλλοντα με πολλά κλαδιά και ενδεχόμενες αστοχίες (Memon et al., 2025; Zou et al., 2025). Σε μελέτες που εστιάζουν σε delay/capacity καθίσταται φανερό ότι η συμπεριφορά του δικτύου και συγκεκριμένα η τοπολογία, το φορτίο και οι μηχανισμοί επαναδρομολόγησης και ανθεκτικότητας μπορούν να μεταβάλλουν ουσιαστικά το end-to-end delay (Aurzada et al., 2011; Poonam & Rani, 2013; Memon et al., 2025; Zou et al., 2025). Συνεπώς, η επιλογή OLAN οφείλει να συνδυάζεται με συστηματική ποσοτική αξιολόγηση και όχι αποκλειστικά με γενικές συγκρίσεις με Ethernet (Aurzada et al., 2011; Poonam & Rani, 2013; Memon et al., 2025; Zou et al., 2025).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η λειτουργική ασφάλεια και η ανθεκτικότητα έναντι της προβληματικής συμπεριφοράς τερματικών (π.χ. rogue ή babbling ONU), καθώς η κοινόχρηστη φύση του upstream μπορεί να οδηγήσει σε γενικευμένη υποβάθμιση της υπηρεσίας (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019). Για τον λόγο αυτό, σε ποικίλες μελέτες προβλέπονται μηχανισμοί ανίχνευσης, απομόνωσης και περιορισμού τέτοιων τερματικών. Ειδικότερα, η αντιμετώπιση τέτοιων συμβάντων σε οργανωσιακά περιβάλλοντα προϋποθέτει την υιοθέτηση λειτουργικών διαδικασιών παρακολούθησης και απόκρισης, καθώς οι επιπτώσεις δεν περιορίζονται σε έναν μοναδικό χρήστη (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019).

Μια επιπλέον πρόκληση αφορά την ωριμότητα των εγκαταστάσεων και το operational model που τις συνοδεύει (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Μολονότι το OLAN εδράζεται σε οπτική υποδομή, ιδιαίτερη σημασία έχουν πρακτικές όπως η καθαριότητα των συνδέσμων, οι μετρήσεις απωλειών, η τεκμηρίωση του οπτικού budget και οι συστηματικές δοκιμές ενεργοποίησης (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Η εμπειρία από εγκαταστάσεις POL/OLAN καταδεικνύει ότι ένα μεγάλο ποσοστό προβλημάτων οφείλεται σε φυσικές αστοχίες της εγκατάστασης και όχι στο ίδιο το πρότυπο (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Κατά συνέπεια, η επιτυχία αποτελεί τεχνικό και οργανωσιακό ζήτημα και δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε επιλογή εξοπλισμού (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Στις μέρες μας η πορεία των OLAN συνδέεται με την εξέλιξη των PON τεχνολογιών προς υψηλότερες συμμετρικές ταχύτητες (π.χ. XGS-PON) και πολυκαναλικές-πολυμήκους κύματος προσεγγίσεις (π.χ. NG-PON2/TWDM) (Ruffini, 2020; Horváth et al., 2020). Η συνύπαρξη (coexistence) και η δυνατότητα αναβάθμισης χωρίς αντικατάσταση ODN αποτελούν ένα στρατηγικό πλεονέκτημα για τους οργανισμούς, επιτρέποντας τη σταδιακή μετάβαση ανάλογα με την πραγματική ζήτηση υπηρεσιών (Ruffini, 2020; Horváth et al., 2020).

Παράλληλα, οι πρόσφατες έρευνες μελετούν πολύ υψηλές ταχύτητες (π.χ. 100G coherent PON), αποδεικνύοντας ότι ο ρόλος των μηχανισμών DBA και η διαχείριση καθυστέρησης κατέχουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο, κυρίως σε περιπτώσεις συστημάτων που οφείλουν να υποστηρίζουν μεγάλα split ratios και ετερογενή traffic patterns (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025). Το παραπάνω επιδρά άμεσα στο OLAN οικοσύστημα, επειδή τα enterprise δίκτυα θα περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά και τις βελτιώσεις των PON προτύπων, καθιστώντας την ποσοτική αξιολόγηση επιδόσεων (throughput/latency) ένα αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025; Sapundzhi et al., 2025).

Από την ανάλυση των OLAN καθίσταται φανερό ότι δεν πρόκειται απλώς για εναλλακτική καλωδίωση, αλλά για μια αλλαγή αρχιτεκτονικής που επηρεάζει τόσο την απόδοση και την καθυστέρηση όσο και την αξιοπιστία και τη διαχειριστική πρακτική (Zhang et al., 2020; Aurzada et al., 2011; Poonam & Rani, 2013). Επειδή η λειτουργία έχει τη βάση της σε κοινόχρηστα κανάλια και αλγορίθμους κατανομής πόρων, η τελική καταλληλότητα ενός OLAN για έναν οργανισμό αποτιμάται εφόσον συνδυαστεί η αρχιτεκτονική περιγραφή με την ποσοτική αξιολόγηση απόδοσης και καθυστέρησης (Zhang et al., 2020; Aurzada et al., 2011; Poonam & Rani, 2013). Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές μετρικές απόδοσης (performance metrics), με σκοπό την τεκμηρίωση των οφελών και των περιορισμών των OLAN σε ρεαλιστικά σενάρια φόρτου και τοπολογίας (Zhang et al., 2020; Aurzada et al., 2011; Poonam & Rani, 2013).

4.Αξιολόγηση Απόδοσης Παθητικών Οπτικών Δικτύων σε Αρχιτεκτονικές OLAN

4.1 Εισαγωγή στην αξιολόγηση απόδοσης PON σε περιβάλλον OLAN

Η μετάβαση από την περιγραφή των αρχιτεκτονικών των Οπτικών Τοπικών Δικτύων (Optical Local Area Networks – OLANs) στην αξιολόγηση της απόδοσής τους αποτελεί ένα αναγκαίο βήμα προκειμένου να ολοκληρωθεί η κατανόηση της λειτουργίας τους σε πραγματικές συνθήκες. Μολονότι οι παθητικές οπτικές αρχιτεκτονικές παρέχουν πληθώρα σαφών πλεονεκτημάτων ως προς την απλοποίηση της υποδομής και τη μείωση του λειτουργικού κόστους, η αποδοτικότητά τους εξαρτάται άμεσα από τη συμπεριφορά του δικτύου υπό διαφορετικά φορτία κίνησης, από τους μηχανισμούς κατανομής εύρους ζώνης και από τις καθυστερήσεις που εισάγονται λόγω της κοινής χρήσης του μέσου μετάδοσης (Aurzada et al., 2012; Ballesta & Boltimore, 2017). Το παραπάνω αποκτά μεγαλύτερη βαρύτητα σε περιβάλλον OLAN, διότι η ίδια υποδομή καλείται να εξυπηρετήσει ετερογενείς υπηρεσίες (δεδομένα, φωνή, βίντεο, IoT/αισθητήρες, εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης), οι οποίες συνήθως συνυπάρχουν σε ένα κοινό φυσικό κανάλι (Aurzada et al., 2011; Ballesta & Boltimore, 2017; Horváth et al., 2020; Sapundzhi et al., 2025; Memon et al., 2025; Zou et al., 2025).

Η αξιολόγηση της απόδοσης των Παθητικών Οπτικών Δικτύων (Passive Optical Networks – PONs) εστιάζει σε μετρικές όπως η καθυστέρηση μετάδοσης (end-to-end delay), η αξιοποίηση της χωρητικότητας, η απώλεια πακέτων και η δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων μεταξύ των χρηστών (Aurzada et al., 2011). Οι εν λόγω μετρικές είναι καίριες σε OLAN αρχιτεκτονικές, καθώς το PON λειτουργεί ως η βάση πρόσβασης για ποικίλους τελικούς κόμβους και εφαρμογές, ενώ η συμπεριφορά του upstream (όπου απαιτείται χρονοπρογραμματισμός και αναθέσεις χρονοθυρίδων) επηρεάζει δυσανάλογα την εμπειρία του χρήστη σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Aurzada et al., 2011). Επιπλέον, σε campus, νοσοκομεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις οι απαιτήσεις εκτός του υψηλού throughput αφορούν και την προβλέψιμη καθυστέρηση, το μικρό jitter και τη σταθερή απόδοση υπό μεταβλητά φορτία (Aurzada et al., 2011).

Ποικίλες μελέτες αναφέρουν ότι η αξιολόγηση της απόδοσης των PON πραγματοποιείται κυρίως μέσω προσομοιώσεων και αναλυτικών μοντέλων (π.χ. μοντέλα ουρών - rolling systems), τα οποία συμβάλλουν στη μελέτη του δικτύου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, καθώς και στην απομόνωση του ρόλου ορισμένων επιμέρους παραγόντων όπως το split ratio, οι χρόνοι φύλαξης (guard times), οι καθυστερήσεις γύρου (round-trip time – RTT) και οι στρατηγικές χρονοπρογραμματισμού (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002). Σύμφωνα με τους Aurzada et al. (2011) οι λεπτομέρειες του report/grant μηχανισμού και η διαδοχή των upstream μεταδόσεων επιδρούν τόσο στην αξιοποίηση του καναλιού όσο και στην καθυστέρηση.

Οι Skubic et al. (2009) παρουσιάζουν μια αναλυτική αξιολόγηση της αποδοτικότητας των MAC μηχανισμών σε EPON/GPON, καταδεικνύοντας ότι η αύξηση του split ratio και του αριθμού ενεργών ONUs μειώνει το ωφέλιμο throughput και αυξάνει την καθυστέρηση λόγω MAC overhead. Αντίστοιχα, οι Rawshan et al. (2024) υποστηρίζουν ότι οι σχεδιαστικές επιλογές και το προφίλ κίνησης επηρεάζουν άμεσα τη βιωσιμότητα της απόδοσης σε σύγχρονες PON υλοποιήσεις ιδιαίτερα σε σενάρια εκρηκτικής κίνησης (bursty traffic).

Παρόμοια, όσον αφορά τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση οι μετρικές απόδοσης οφείλουν να αντιμετωπίζονται ως αλληλοεξαρτώμενες μεταβλητές και όχι απομονωμένα (Memon et al., 2025; Zou et al., 2025). Στην πράξη, ένα PON/OLAN μπορεί να εμφανίζει υψηλό μέσο throughput, αλλά χαμηλή αντιληπτή ποιότητα, εφόσον οι καθυστερήσεις και το jitter αυξάνονται σε ροές πραγματικού χρόνου ή η κατανομή πόρων είναι άδικη για συγκεκριμένες κλάσεις υπηρεσίας (Memon et al., 2025; Zou et al., 2025). Σε OLAN περιβάλλοντα, στα οποία η ίδια υποδομή εξυπηρετεί ταυτόχρονα «κρίσιμες» και «μη κρίσιμες» ροές, η εν λόγω αντίληψη είναι ιδιαίτερα σημαντική και συνεπώς η αξιολόγηση οφείλει να συνδέει τις μετρικές με το προφίλ υπηρεσιών και τις πολιτικές QoS (Memon et al., 2025; Zou et al., 2025).

Σχετικά με την απόδοση των PONs ιδιαίτερη σημασία κατέχει ο ρόλος των μηχανισμών Dynamic Bandwidth Allocation (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA), οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο που το διαθέσιμο upstream εύρος ζώνης κατανέμεται δυναμικά μεταξύ των Οπτικών Μονάδων Δικτύου (Optical Network Units – ONUs) (Memon et al., 2025; Kramer & Pesavento, 2002). Η αποτελεσματικότητα των DBA αλγορίθμων εξηγεί συχνά γιατί δύο υλοποιήσεις με

ίδια θεωρητική χωρητικότητα παρουσιάζουν διαφορετική καθυστέρηση, διαφορετική δικαιοσύνη και διαφορετική σταθερότητα σε ώρες αιχμής (Memon et al., 2025; Kramer & Pesavento, 2002). Οι Memon et al. (2025) συγκρίνουν αλγορίθμους διπλού προτύπου (ITU-T και IEEE) και αναδεικνύουν ότι οι επιλογές στον χρονοπρογραμματισμό επιδρούν καθοριστικά σε latency/fairness trade-offs.

Επιπλέον, σε σύγχρονες έρευνες αναλύονται υψηλότερα split ratios και νεότερες τεχνολογίες (TWDM-PON, συνεκτικά 100G PON), όπου το πρόβλημα της καθυστέρησης εντείνεται λόγω αυξημένου ελέγχου, μεγαλύτερων ομάδων χρηστών και νέων μορφών overhead (πρόσθετης επιβάρυνσης πρωτοκόλλου) (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025). Στη μελέτη των Zou et al. (2025) καθίσταται φανερό ότι σε 100G coherent PON με έως 512 χρήστες εμφανίζονται νέα φαινόμενα, όπως το temporal misalignment(χρονική ασυγχρονία), τα οποία δύνανται να αυξήσουν το latency ακόμη και όταν η ονομαστική χωρητικότητα του φυσικού επιπέδου είναι πολύ υψηλή.

Τέλος, στις αρχιτεκτονικές OLAN η αξιολόγηση απόδοσης δεν περιορίζεται στις μέσες τιμές throughput ή καθυστέρησης, αλλά εστιάζει κυρίως στη προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς του δικτύου όταν συνυπάρχουν εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (Service Level Agreements - SLA) (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020). Ειδικότερα, σε κοινόχρηστες ή πολυλειτουργικές υποδομές, όπως είναι τα συγκροτήματα κτιρίων ή οι μεγάλοι οργανισμοί, η σύγχρονη βιβλιογραφία αναδεικνύει τη σημασία των τεχνικών εικονικοποίησης σε επίπεδο PON, όπως τα virtualized PON (vPON) και οι virtual DBA (vDBA)(Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020). Στα εν λόγω σχήματα, πολλαπλοί λογικοί μηχανισμοί προγραμματισμού συνυπάρχουν πάνω στην ίδια φυσική υποδομή και συνδυάζονται σε έναν κοινό bandwidth map, επηρεάζοντας άμεσα την κατανομή πόρων και τη συνολική απόδοση του συστήματος (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020).

Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σχετικό με τα OLAN σενάρια, όπου διαφορετικές υπηρεσίες ή τμήματα ενός οργανισμού ανταγωνίζονται για πόρους στο ίδιο φυσικό PON, έχοντας ανάγκη σαφή διαχωρισμό και τήρηση προτεραιοτήτων (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020).

4.2 Μετρικές Αξιολόγησης Απόδοσης Παθητικών Οπτικών Δικτύων

Η αξιολόγηση της απόδοσης των Παθητικών Οπτικών Δικτύων (Passive Optical Networks – PONs) εδράζεται στη μελέτη συγκεκριμένων ποσοτικών μετρικών, οι οποίες επιτρέπουν την αντικειμενική αποτίμηση της συμπεριφοράς του δικτύου υπό διαφορετικά σενάρια φόρτου και αρχιτεκτονικών επιλογών (Aurzada et al., 2011). Οι εν λόγω μετρικές κατέχουν ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο των OLANs, επειδή η κοινή χρήση του μέσου στο upstream προϋποθέτει τον προγραμματισμό του χρόνου και συνεπώς δημιουργεί δυναμικά φαινόμενα καθυστέρησης τα οποία δεν παρουσιάζονται με την ίδια μορφή σε καθαρά point-to-point τοπολογίες (Aurzada et al., 2011).

Μία από τις σημαντικότερες μετρικές είναι η **καθυστέρηση μετάδοσης (end-to-end delay)**, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά ενός πακέτου από την πηγή στον προορισμό (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002). Η καθυστέρηση σε PON προκύπτει τόσο από τη διάδοση στο οπτικό μέσο (propagation delay), όσο και από τη λειτουργία του upstream MAC (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002). Πιο ειδικά, το ONU μεταδίδει όταν λάβει grant για συγκεκριμένη χρονοθυρίδα και όσο αυξάνεται ο αριθμός των ενεργών ONUs ή όσο πιο bursty γίνεται η κίνηση, τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα αναμονής για επόμενη ανάθεση, ενισχύοντας το delay και το jitter (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002). Σύμφωνα με τους Aurzada et al. (2011) και Kramer & Pesavento (2002) ο σχεδιασμός DBA, τα guard times και η αλληλουχία polling επηρεάζουν άμεσα τον χρόνο αναμονής και την αντιλαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας.

Στα OLANs η καθυστέρηση κατέχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς πολλές εφαρμογές δεν επηρεάζονται από τη μέση τιμή delay, αλλά από τα άκρα (tail latency) και τη διακύμανση (jitter) (Memon et al., 2025). Σε απαιτητικά περιβάλλοντα όπως νοσοκομεία, βιομηχανίες ή campus με υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης-VoIPVoIP (Voice over Internet Protocol – Τηλεφωνία μέσω IP) μια αύξηση jitter μπορεί να υποβαθμίσει σημαντικά την εμπειρία, οδηγώντας σε αστάθεια, ακόμη και αν το μέσο throughput είναι επαρκές (Memon et al., 2025). Η διαχείριση του upstream μέσω DBA είναι καθοριστική στο εν λόγω φαινόμενο, μολονότι οι αποφάσεις ανάθεσης

καθορίζουν την σταθερή αποσυμφόρηση των ουρών ή τη δημιουργία κυμάτων αναμονής (Memon et al., 2025).

Η **χωρητικότητα (capacity)** και ο **ρυθμός μετάδοσης (throughput)** συνδέεται άμεσα με την καθυστέρηση (Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024). Η χωρητικότητα εκφράζει το θεωρητικό μέγιστο bandwidth του συστήματος, ενώ το throughput είναι το πραγματικό ωφέλιμο φορτίο που μεταφέρεται, αφαιρώντας overheads (π.χ. προοίμια bursts, guard times, REPORT/GATE μηνύματα, framing overhead, κ.λπ.) (Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024). Το πραγματικό throughput μειώνεται όσο αυξάνει το split ratio στα PON συστήματα, καθώς περισσότερες ONUs μοιράζονται το ίδιο upstream κανάλι, αυξάνοντας το MAC overhead λόγω polling, guard times και ελέγχου πρόσβασης (Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024). Η επίδραση αυτή έχει τεκμηριωθεί τόσο σε συγκριτικές αναλύσεις EPON/GPON όσο και σε νεότερα σενάρια υψηλής χωρητικότητας, όπου οι μηχανισμοί κατανομής πόρων και ο χρονοπρογραμματισμός επηρεάζουν άμεσα την αποδοτικότητα αξιοποίησης του καναλιού (Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024).

Σε πρακτικό επίπεδο OLAN, το throughput αξιολογείται συχνά ως προς το επίπεδο της εμπειρίας από την υπηρεσία και όχι αποκλειστικά σε επίπεδο ακαθάριστων Mbps (Aurzada et al., 2011; Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024). Για παράδειγμα, μια υποδομή μπορεί να φαίνεται επαρκής για web/office χρήση, αλλά να παρουσιάζει κορεσμό σε ώρες αιχμής λόγω ταυτόχρονων uploads (cloud backups, video surveillance, εργαστηριακά δεδομένα) (Aurzada et al., 2011; Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024). Σε ποικίλες μελέτες σχεδιασμού και αξιολόγησης αναφέρεται ότι οι προσομοιώσεις οφείλουν να εξετάζουν πολλαπλά προφίλ κίνησης (σταθερή, bursty, μικτή), με σκοπό ένα throughput να μην αποκρύπτει προβλήματα QoS σε συγκεκριμένες κλάσεις (Aurzada et al., 2011; Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024).

Ακόμη, καίρια μετρική είναι η **απώλεια πακέτων (packet loss)**. Σε επίπεδο PON, οι απώλειες προκύπτουν όταν οι ουρές (buffers) στα ONUs ή και στον OLT είναι γεμάτες λόγω καθυστέρησης εξυπηρέτησης ή όταν ο DBA αδυνατεί να κατανείμει επαρκές εύρος ζώνης σε απότομα αυξανόμενες ροές (Memon et al., 2025). Αναφορικά με τα OLAN περιβάλλοντα, η packet loss είναι ιδιαίτερα επιζήμια για εφαρμογές βίντεο και φωνής, καθώς και για επιχειρησιακές λειτουργίες που

βασίζονται σε συνεχή ροή δεδομένων (Memon et al., 2025). Επίσης, συχνά αποκρύπτει ορισμένα υποκείμενα προβλήματα στρατηγικής DBA ή ρύθμισης προτεραιοτήτων (QoS) (Memon et al., 2025).

Επιπλέον, η **δικαιοσύνη κατανομής πόρων (fairness)** αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης. Ειδικότερα, στα PON έχει ιδιαίτερη σημασία ο διαμοιρασμός μεταξύ ONUs και υπηρεσιών, κυρίως σε περιπτώσεις ύπαρξης κλάσεων προτεραιότητας και δεσμεύσεων SLA, όπου δεν αρκεί μόνο ένα συνολικά υψηλό throughput (Memon et al., 2025; Ganguli & Ruffini, 2025). Όπως υποστηρίζεται από τους Memon et al. (2025) και τους Ganguli & Ruffini (2025), οι διαφορετικοί αλγόριθμοι DBA (status-reporting, predictive, SLA-aware) επιτυγχάνουν διαφορετικές ισορροπίες μεταξύ fairness και latency, και η επιλογή πολιτικής μπορεί να ευνοήσει συγκεκριμένους τύπους κίνησης εις βάρος άλλων. Ωστόσο, σε περιβάλλοντα OLAN, όπου το δίκτυο εξυπηρετεί οργανισμούς με διαφορετικές απαιτήσεις, η fairness σχετίζεται άμεσα με τη διαφάνεια και την αποδοχή της υποδομής ως κοινόχρηστης πλατφόρμας (Memon et al., 2025; Ganguli & Ruffini, 2025).

Εντούτοις, σε μεγάλης κλίμακας ή κρίσιμες εφαρμογές αξιολογείται η **ανθεκτικότητα του δικτύου σε κατάσταση συμφόρηση και οι αστοχίες (resilience under congestion/failures)** (Poonam & Rani, 2013; Aurzada et al., 2011). Δηλαδή, η χωρητικότητα δεν εγγυάται μια καλή εμπειρία χρήστη, εφόσον η τοπολογία ή οι μηχανισμοί ανάκαμψης δεν μπορούν να αποτρέψουν καταρρεύσεις καθυστέρησης (Poonam & Rani, 2013; Aurzada et al., 2011). Το delay μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά σε συνθήκες σφάλματος και αναδρομολόγησης και επομένως η απόδοση οφείλει να αξιολογείται και σε μη ιδανικές συνθήκες λειτουργίας (Poonam & Rani, 2013; Aurzada et al., 2011).

Τέλος, στις νεότερες γενιές PON φαίνεται ότι η ίδια η **κλίμακα των χρηστών** αποτελεί τον παράγοντα απόδοσης. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλώνει ο **αριθμός ONUs ανά θύρα**, τόσο αυξάνεται το MAC control overhead, ενώ τόσο δυσκολότερο είναι να διατηρηθεί χαμηλή η καθυστέρηση (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025). Οι Zou et al. (2025) υποστηρίζουν ότι σε 100G coherent PON με έως 512 χρήστες, ο σχεδιασμός DBA οφείλει να λαμβάνει υπόψη φαινόμενα χρονικής ασυμφωνίας (misalignment), ειδάλλως αποκρύπτονται ορισμένες καθυστερήσεις οι οποίες δεν εξηγούνται από τη μέση κίνηση. Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικό για OLANs

που εξελίσσονται προς μεγάλη συγκέντρωση τερματικών (π.χ. IoT, έξυπνα κτίρια, βιομηχανία).

4.3 Μηχανισμοί Dynamic Bandwidth Allocation και η επίδρασή τους στην απόδοση

Στα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs), λόγω της κοινής χρήσης του upstream καναλιού από πολλαπλές Οπτικές Μονάδες Δικτύου (Optical Network Units – ONUs) καθίσταται απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμών δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Οι μηχανισμοί DBA στην πράξη υλοποιούν τον προγραμματισμό του χρόνου της upstream μετάδοσης, μεταφράζοντας αιτήματα ζήτησης (requests) σε grants χρονοθυρίδων, προκειμένου να επιτευχθεί η αποδοτική χρήση των πόρων και η διατήρηση της ποιότητας της υπηρεσίας (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Στην κλασική λογική report-grant, το ONU ενημερώνει το OLT για το buffer occupancy και το OLT προχωρά στον καταμερισμό με βάση ορισμένες πολιτικές προτεραιοτήτων και περιορισμών (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011).

Το ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στη σχεδίαση DBA αλγορίθμων είναι η ταυτόχρονη ικανοποίηση αντικρουόμενων στόχων, όπως η χαμηλή καθυστέρηση, το υψηλό throughput, η δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων και η διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας (Memon et al., 2025). Στα OLAN, το πρόβλημα καθίσταται πιο σύνθετο, καθώς διαφορετικές υπηρεσίες ενός οργανισμού μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή και απαιτούν διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας και εγγυήσεων (Memon et al., 2025). Οι DBA αλγόριθμοι περιορισμένης πολυπλοκότητας, οι οποίοι βασίζονται σε βασική αναφορά κατάστασης, δίχως να λαμβάνουν υπόψη την ετερογένεια της κίνησης ή τις κλάσεις υπηρεσιών, αποδίδουν ικανοποιητικά σε συνθήκες ομοιόμορφου φορτίου (Memon et al., 2025). Ωστόσο παρουσιάζουν σημαντικές αδυναμίες σε περιπτώσεις έντονα μεταβαλλόμενης (bursty) ή πολυκλασικής κίνησης με αποτέλεσμα αυξημένο delay και packet loss (Memon et al., 2025).

Αναφορικά με τη θεμελιώδη προβληματική των μηχανισμών DBA σε περιβάλλοντα GPON, ο Chang (2008) εξετάζοντας τη συμπεριφορά των μηχανισμών κατανομής εύρους ζώνης σε συστήματα κοινής χρήσης του upstream καναλιού αναδεικνύει ότι η αύξηση του αριθμού των ενεργών χρηστών και του split ratio επιβαρύνει σημαντικά την καθυστέρηση, ενώ μειώνει τη δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων. Συνεπώς, καθίσταται φανερό ότι οι κλασικοί status-reporting DBA αλγόριθμοι εμφανίζουν εγγενείς περιορισμούς ως προς την ταχύτητα απόκρισης σε απότομες μεταβολές της κίνησης (Chang, 2008).

Σύμφωνα με τον Chang (2008), σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου η απόσταση του χρόνου μεταξύ της αναφοράς ζήτησης από τις ONUs και της τελικής εκχώρησης χρονοθυρίδων από το OLT παρουσιάζει αναπόφευκτο latency. Επιπλέον, τονίζεται ότι οι μηχανισμοί κατανομής εύρους ζώνης οφείλουν να προσαρμόζονται δυναμικά στη μεταβαλλόμενη ζήτηση, ενώ δεν αρκεί η απλή αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητας για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης. Τα παραπάνω θέτουν το θεωρητικό υπόβαθρο των μεταγενέστερων βελτιστοποιήσεων των DBA αλγορίθμων, οι οποίες πλέον αξιοποιούνται στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές OLAN (Chang, 2008; Memon et al., 2025).

Στο EPON έχει ιστορικά μελετηθεί αναλυτικά ο Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time (IPACT), ο οποίος αποτελεί θεμελιώδη προσέγγιση δυναμικής ανάθεσης σε polling-based συστήματα (Kramer, 2002; Cobos Melià, 2011). Συγκεκριμένα, μέσω της ιδέας του interleaving μειώνεται ο κενός χρόνος μεταξύ των διαδοχικών upstream bursts, ενώ βελτιώνεται η αξιοποίηση του καναλιού (Kramer & Pesavento, 2002; Cobos Melià, 2011). Ωστόσο, η συμπεριφορά του σε έντονες διαφοροποιήσεις κίνησης και πολλαπλές κλάσεις QoS προϋποθέτει την ύπαρξη επιπλέον μηχανισμών ιεράρχησης και προτεραιοτήτων (Kramer & Pesavento, 2002; Cobos Melià, 2011). Το υλικό “Design and Performance Evaluation of Passive Optical Networks” (Cobos Melià, 2011) παρουσιάζει ορισμένες ταξινομιές DBA (στατιστική πολυπλεξία έναντι QoS-aware), αναδεικνύοντας ότι δεν υπάρχει ορθότερο σχήμα, μολονότι το βέλτιστο εξαρτάται από τους στόχους (delay bounds, SLA, fairness, complexity) (Kramer & Pesavento, 2002; Cobos Melià, 2011).

Στα πρότυπα ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector), όπως τα GPON και XG(S)-PON, οι έννοιες των T-CONT

(Transmission Container – Δοχείο Μετάδοσης) και οι μηχανισμοί status-reporting (μηχανισμός αναφοράς κατάστασης) αποτελούν ένα διαφορετικό πλαίσιο σε σχέση με το EPON, ωστόσο υπάρχουν ορισμένες ουσιαστικές ομοιότητες (Aurzada et al., 2011; Kramer, 2002). Συγκεκριμένα, οι αποφάσεις DBA καθορίζουν το πόσο γρήγορα «αδειάζουν» τα buffers (ουρές προσωρινής αποθήκευσης), καθώς και τη σταθερότητα εξυπηρέτησης των πραγματικών ροών χρόνου (Aurzada et al., 2011; Kramer & Pesavento, 2002). Οι Aurzada et al. (2012) υποστηρίζουν ότι και στα δύο οικοσυστήματα (IEEE/ITU-T) τα overheads (guard times, REPORT/GRANT, framing) επιδρούν σημαντικά στην αποδοτικότητα, ενώ η μοντελοποίηση των correlated transmissions (συσχετισμένες μεταδόσεις) αναδεικνύεται απαραίτητη για ρεαλιστικές εκτιμήσεις της καθυστέρησης.

Η επίδραση των DBA αλγορίθμων στην απόδοση επιβεβαιώνεται από σύγχρονες μελέτες (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Ganguli & Ruffini, 2025). Όπως υποστηρίζεται στις παραπάνω έρευνες, μολονότι αυξάνεται ο αριθμός των ενεργών ONUs και ο συνολικός φόρτος, η χρήση απλοϊκών ή μη προσαρμοστικών πολιτικών DBA, κυρίως σε απαιτητικές συνθήκες, αυξάνει σημαντικά την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων. Παράλληλα, τονίζεται ότι η βιωσιμότητα του σχεδιασμού σε περιβάλλοντα OLAN σχετίζεται άμεσα από την επιλογή QoS-aware και SLA - συμμορφούμενων μηχανισμών κατανομής εύρους ζώνης, οι οποίοι κατέχουν τη δυνατότητα να διατηρούν τη σταθερότητα και την προτεραιότητα κρίσιμων υπηρεσιών υπό υψηλό φορτίο (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Ganguli & Ruffini, 2025).

Σε σύγχρονες έρευνες εξετάζονται SLA-aware και multi-tenant DBA, σε TWDM-PON περιβάλλοντα κυρίως, στα οποία κρίνεται απαραίτητη η συνύπαρξη πολλών «λογικών» δικτύων πάνω στο ίδιο φυσικό μέσο (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020). Οι Ganguli και Ruffini (2025) προτείνουν ορισμένους μηχανισμούς συγχώνευσης (merging) για virtual DBAs, προκειμένου ποικίλες υπηρεσίες να μπορούν να μοιράζονται το ίδιο φυσικό bandwidth map με δυνατότητες πραγματικού χρόνου (real-time) και ελεγχόμενη επιπλέον καθυστέρηση. Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σχετικό με τα OLAN, καθώς σε έναν οργανισμό διαφορετικά τμήματα ή εφαρμογές χρησιμοποιούν κοινή υποδομή δικτύου, ενώ απαιτούνται διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Συνεπώς, το DBA περιλαμβάνει τόσο τη δίκαιη

κατανομή πόρων, όσο και τη διατήρηση συμφωνημένων επιπέδων απόδοσης σε κύριες υπηρεσίες (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020).

Η εξέλιξη προς συνεκτικά 100G PON (coherent PON) γεννά νέες απαιτήσεις στο DBA. Ειδικότερα, η αύξηση χρηστών και η αυστηροποίηση latency απαιτήσεων αναδεικνύει φαινόμενα που δεν ήταν σημαντικά σε 32–64 χρήστες (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025). Κατά τους Zou et al. (2025) η χρονική ασυμφωνία (temporal misalignment) μεταξύ των αποφάσεων DBA και των πραγματικών συνθηκών κίνησης μπορεί να αυξήσει τις καθυστερήσεις. Ως εκ τούτου, προτείνουν τις εναλλαγές στρατηγικών ανάλογα με το φορτίο (Hybrid-Switch DBA), με σκοπό τον περιορισμό του latency ακόμη και σε μεγάλους πληθυσμούς ONUs (Zou et al., 2025). Κατά συνέπεια, τα μελλοντικά OLANs με πολύ υψηλή συγκέντρωση endpoints, θα χρήζουν ενός προσαρμοστικού DBA και δεν θα μπορούν να καλυφθούν από στατικές πολιτικές (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025).

Όπως αναδεικνύεται από τα παραπάνω, οι μηχανισμοί DBA αποτελούν τη βάση της απόδοσης ενός PON-βασισμένου OLAN (Kramer & Pesavento, 2002; Memon et al., 2025). Δηλαδή, δεν καθορίζουν μόνο την ποσότητα του διαθέσιμου bandwidth κάθε χρήστη, αλλά και τον τρόπο της εξέλιξης των ουρών, τη σταθερότητα του delay και την ταχύτητα που απορροφώνται οι αιχμές, μολονότι οι υπηρεσίες προτεραιότητας διατηρούν τις εγγυήσεις τους (Kramer & Pesavento, 2002; Memon et al., 2025). Έτσι, φαίνεται ότι η αξιολόγηση απόδοσης ενός OLAN οφείλει να αντιμετωπίζει το DBA ως ένα δομικό στοιχείο του σχεδιασμού και όχι ως μια δευτερεύουσα ρυθμιστική παράμετρο (Kramer & Pesavento, 2002; Memon et al., 2025).

4.4 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών PON και μηχανισμών DBA σε OLAN σενάρια

Με σκοπό την ερμηνεία της συμπεριφοράς ενός OLAN σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, καθίσταται απαραίτητη η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών Παθητικών Οπτικών Δικτύων (PON), καθώς και των μηχανισμών DBA (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Horvath et al., 2020). Διαφορετικά πρότυπα PON παρουσιάζουν διαφορετικές οροφές χωρητικότητας, επίπεδα MAC overhead και βαθμούς ευελιξίας στη διαχείριση πόρων και ως εκ τούτου η επιλογή τεχνολογίας επηρεάζει άμεσα την καθυστέρηση, το throughput ανά χρήστη και την ικανότητα

τήρησης QoS σε περιβάλλοντα μεικτής και μεταβαλλόμενης κίνησης (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025; Horvath et al., 2020).

Οι πρώιμες τεχνολογίες (π.χ. BPON/GPON) σχεδιάστηκαν για ευρυζωνική πρόσβαση με συγκεκριμένες παραδοχές για τον αριθμό χρηστών και τις υπηρεσίες (Aurzada et al., 2011). Παρά το γεγονός ότι το GPON καθιερώθηκε ευρέως λόγω της ωριμότητας και της υποστήριξης QoS, η κοινή χρήση του καναλιού σε υψηλά split ratios, σε συνδυασμό με ακατάλληλες πολιτικές DBA, αυξάνει την καθυστέρηση και τη μείωση ωφέλιμου throughput ανά ONU σε απαιτητικές ώρες (Aurzada et al., 2011). Η επίδοση αποτελεί τόσο ένα ζήτημα ονομαστικής ταχύτητας όσο και του τρόπου διαχείρισης του MAC όσον αφορά το upstream κανάλι και τα bursts (Aurzada et al., 2011).

Η μετάβαση σε XGS-PON συμβάλλει καθοριστικά τη βελτίωση του πλαισίου για OLAN εφαρμογές, επειδή η συμμετρική παροχή υψηλού ρυθμού μετάδοσης (upstream/downstream) ελαττώνει τη συμφόρηση σε σενάρια με αυξημένες ανάγκες αποστολής (π.χ. cloud backups, τηλεδιάσκεψη, βίντεο από συστήματα επιτήρησης, βιομηχανικά δεδομένα) (Memon et al., 2025). Ωστόσο, ο ρόλος του DBA παραμένει καθοριστικός, ακόμη και σε υψηλά επίπεδα χωρητικότητας, μολονότι ο προγραμματισμός του χρόνου επηρεάζει την καθυστέρηση και το jitter που στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Σύμφωνα με τη μελέτη των Rawshan et. Al. (2024) η σωστή παραμετροποίηση και η επιλογή μηχανισμών εξυπηρέτησης και κατανομής είναι ιδιαίτερα σημαντικές, κυρίως όταν το split ratio είναι μεγάλο και η κίνηση είναι ετερογενής.

Η τεχνολογία NG-PON2 και τα σχήματα TWDM-PON έχουν αναδιαμορφώσει την κατανομή πόρων, με αποτέλεσμα να μην γίνεται αποκλειστικά στο χρόνο, αλλά και στο μήκος κύματος (Ruffini, 2020; Memon et al., 2025). Το παραπάνω βοηθά στην καλύτερη απομόνωση ροών, στην πιθανή μείωση συγκρούσεων των υπηρεσιών, καθώς και σε ορισμένα σενάρια στην καλύτερη συμπεριφορά υπό συμφόρηση, επειδή διαφορετικές κατηγορίες κίνησης εξυπηρετούνται μέσω διαφορετικών μηκών κύματος, ενώ μειώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των υπηρεσιών, βελτιώνοντας τη συμπεριφορά υπό συμφόρηση (Ruffini, 2020).

Παρόμοια, οι Dixit et al. (2012) προτείνουν μια υβριδική αρχιτεκτονική WDM/TDM (TWDM) χρησιμοποιώντας Wavelength Selective Switches (WSS) και εστιάζοντας τόσο στην χωρητικότητα όσο και σε ιδιότητες όπως η ευελιξία, η ασφάλεια και η απομόνωση, καθώς και στα reach/cost trade-offs. Σχετικά με τα OLAN περιβάλλοντα, όπως campus ή μεγάλα συγκροτήματα κτιρίων, σημαντικό είναι ότι η απόδοση δεν μετρείται μόνο ως throughput, αλλά και ως δυνατότητα τμηματοποίησης υπηρεσιών, περιορισμού αλληλεπίδρασης μεταξύ τμημάτων και υποστήριξης αναβαθμίσεων δίχως αλλαγή παθητικής υποδομής (Dixit et al., 2012).

Παράλληλα με την τεχνολογία PON, η επιλογή του DBA αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ο οποίος επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική απόδοση του δικτύου (Memon et al., 2025; Kramer & Pesavento, 2002). Οι Memon et al. (2025) παρουσιάζουν μια συστηματική αξιολόγηση αλγορίθμων ITU-T και IEEE και υποστηρίζουν ότι οι πολιτικές κατανομής συμβάλλουν στη βελτίωση latency και fairness, χωρίς ωστόσο συχνά τη μείωση της αυξημένης πολυπλοκότητας ή πρόσθετου overhead σηματοδοσίας. Συνεπώς, στον σχεδιασμό ενός OLAN εκτός από την επιλογή προτύπου (π.χ. XGS-PON), απαιτείται και μια συνειδητή επιλογή πολιτικής DBA ανάλογα με το προφίλ κίνησης και των απαιτήσεων των υπηρεσιών (Memon et al., 2025; Kramer & Pesavento, 2002).

Η έρευνα σε multi-tenant περιβάλλοντα τονίζει τη σημασία του DBA ως μηχανισμού κεντρικού ελέγχου και κατανομής πόρων (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020).. Σύμφωνα με τους Ganguli και Ruffini (2025) όταν οι πολλαπλές υπηρεσίες μοιράζονται κοινή PON υποδομή, το DBA οφείλει να υποστηρίζει λειτουργία συμβατή με SLA, καθώς και να παράγει bandwidth maps σε πραγματικό χρόνο. Στα OLANs η εσωτερική πολυ-υπηρεσιακή μορφή του οργανισμού (φωνή, βίντεο, δεδομένα, IoT) δημιουργεί ανάλογη ανάγκη, ακόμη και αν δεν υπάρχει εξωτερικός μισθωτής. Ειδικότερα, το δίκτυο οφείλει να κατανέμει τους πόρους με σταθερό και προβλέψιμο τρόπο ανά κλάση υπηρεσίας (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020).

Τέλος, οι τεχνολογίες επόμενης γενιάς, όπως το 100G coherent PON, εξακολουθούν να παρουσιάζουν το πρόβλημα της απόδοσης (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025). Πιο συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται ο αριθμός χρηστών (π.χ. έως 512 ONUs), συχνά αυξάνεται και η καθυστέρηση γιατί ο DBA κύκλος και οι χρονικές ασυμφωνίες δημιουργούν μεγαλύτερη αναμονή από το αναμενόμενο (Zou et al., 2025; Memon et

al., 2025). Το παραπάνω υποστηρίζεται από τους Zou et al. (2025), οι οποίοι προτείνουν προσαρμοστική εναλλαγή των στρατηγικών DBA, ώστε να περιορίζεται το latency υπό διαφορετικά traffic regimes. Αυτό αποτελεί ισχυρή ένδειξη για τον OLAN σχεδιασμό ότι οι αλγόριθμοι κατανομής θα πρέπει να γίνονται πιο ευφυείς και προσαρμοστικοί όσο αυξάνεται η συγκέντρωση endpoints και οι απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης (Zou et al., 2025; Memon et al., 2025).

Όπως φαίνεται, η αξιολόγηση απόδοσης αποδεικνύει ότι η επιτυχία ενός OLAN εξαρτάται από τη συνεργασία τεχνολογίας, πολιτικών MAC/DBA, split ratio, λειτουργικών overheads και προφίλ κίνησης και όχι μόνο από την επιλογή του ταχύτερου PON (Aurzada et al., 2011; Horvath et al., 2020; Memon et al., 2025). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων οφείλει να σχετίζεται άμεσα με το εκάστοτε σενάριο χρήσης (π.χ. πανεπιστημιούπολη, νοσοκομείο, βιομηχανική εγκατάσταση) και τις υπηρεσίες που θεωρούνται καίριες, με σκοπό τη δημιουργία τεκμηριωμένων επιλογών σχεδιασμού (Aurzada et al., 2011; Horvath et al., 2020; Memon et al., 2025). Συνεπώς, στο επόμενο κεφάλαιο συζητώνται και ερμηνεύονται τα ευρήματα, ενώ συνδέονται με τις αρχιτεκτονικές επιλογές OLAN και τα ρεαλιστικά μοτίβα κίνησης που παρατηρούνται σε πραγματικές εγκαταστάσεις (Aurzada et al., 2011; Horvath et al., 2020; Memon et al., 2025).

4.5 Ζητήματα αξιοπιστίας και λειτουργικών αστοχιών σε OLAN/PON περιβάλλοντα

OLAN (Optical Local Area Network) είναι η συνολική οπτική υποδομή πρόσβασης (ίνα, παθητικά στοιχεία, κέντρα συγκέντρωσης). **To PON segment** μπορεί να είναι μία από τις ακόλουθες τεχνολογίες: **GPON / XGS-PON / 10G / 25G / 50G / 100G Coherent PON**. Δηλαδή το OLAN είναι η αρχιτεκτονική πρόσβασης, ενώ το PON είναι η τεχνολογία υλοποίησης μέσα στο OLAN.

Εκτός από τις κλασικές μετρικές απόδοσης (delay, throughput, packet loss, fairness), η λειτουργική αξιοπιστία ενός OLAN επηρεάζεται και από τις ενδεχόμενες αστοχίες των επιμέρους τερματικών ή τις αποκλίσεις του συγχρονισμού της upstream μετάδοσης (Aurzada et al., 2011). Στα PON-βασισμένα OLANs, το παραπάνω αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα μολονότι το μέσο μετάδοσης είναι κοινόχρηστο και ένα προβληματικό τερματικό μπορεί να λειτουργήσει επιβαρυντικά ως προς τη

λειτουργία πολλών χρηστών ταυτόχρονα, ακόμη και αν οι υπόλοιποι κόμβοι λειτουργούν κανονικά. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση της λειτουργικής ανθεκτικότητας λειτουργεί συμπληρωματικά στην κλασική αξιολόγηση της απόδοσης, κυρίως σε οργανισμούς με απαιτήσεις συνεχούς λειτουργίας (Arzada et al., 2011).

Ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο είναι το rogue Optical Network Unit (rogue ONU) (ITU-T, 2022). Συγκεκριμένα, ως rogue ONU περιγράφεται μια ONU που εκπέμπει εκτός των εκχωρημένων χρονοθυρίδων ή με μη επιτρεπτά χαρακτηριστικά σήματος, λόγω σφάλματος υλικού, λογισμικού ή λανθασμένης λειτουργίας MAC/χρονισμού, ενώ προκαλεί παρεμβολές στο upstream κανάλι (ITU-T, 2022). Στις εν λόγω περιπτώσεις, η επίπτωση δεν αφορά έναν μόνο χρήστη, αλλά επειδή το upstream είναι κοινό, το rogue ONU ενδέχεται να αυξήσει τις απώλειες, να μεγιστοποιήσει την καθυστέρηση και να μειώσει το ωφέλιμο throughput για πολλαπλές ONUs ταυτόχρονα (ITU-T, 2022). Ουσιαστικά, δηλαδή να υποβαθμίσει την συνολική ποιότητα της υπηρεσίας σε OLAN εγκατάσταση (ITU-T, 2022).

Η αντιμετώπιση των ανωτέρω φαινομένων συνδέεται λειτουργικά με τη διαχείριση του OLT και με μηχανισμούς ανίχνευσης προβληματικών τερματικών, με σκοπό την προστασία του υπόλοιπου δίκτυο (Memon et al., 2025). Το rogue ONU δεν αποτελεί «DBA αλγόριθμο», ωστόσο επιδρά άμεσα στην αποτελεσματικότητα της upstream κατανομής (Memon et al., 2025). Πιο συγκεκριμένα, ακόμη και ο βέλτιστος DBA δε διατηρεί εγγυήσεις QoS σε περίπτωση που το φυσικό κανάλι διαταραχθεί από μη προβλέψιμες εκπομπές (ITU-T, 2022; Memon et al., 2025). Επομένως, για μια ολοκληρωμένη αποτίμηση OLAN η απόδοση πρέπει να ερμηνεύεται τόσο ως προς τις πολιτικές κατανομής, όσο και με βάση την επιχειρησιακή ικανότητα του δικτύου για εντοπισμό και ανίχνευση των λαθών που επηρεάζουν το κοινόχρηστο μέσο (ITU-T, 2022; Memon et al., 2025).

Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση απόδοσης σε OLAN σενάρια αποτελεί ζήτημα υψηλής ονομαστικής χωρητικότητας, αλλά κυρίως λειτουργικής σταθερότητας και διαχείρισης ανωμαλιών (ITU-T, 2022). Η ανάλυση της απόδοσης και η συγκριτική αξιολόγηση της αξιοπιστίας συμβάλλει στην πιο ρεαλιστική εκτίμηση της ποιότητας της υπηρεσίας. Αυτό είναι ιδιαίτερο σημαντικό σε δίκτυα όπου η συνεχής λειτουργία και η σταθερότητα είναι εξίσου σημαντικές με τη διαθέσιμη χωρητικότητα (ITU-T, 2022).

5. Σενάρια Παθητικών Δικτύων - Μελέτες

5.1. Σενάριο Μελέτης Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύου EPON

5.1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα μελέτη αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών τεχνολογίας EPON (Ethernet Passive Optical Network), με στόχο την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων σε τελικούς χρήστες (οικιακούς ή επαγγελματικούς).

Απαιτούμενες υπηρεσίες από το δίκτυο EPON: Πρόσβαση στο Διαδίκτυο υψηλών ταχυτήτων, Υπηρεσίες VoIP, IPTV / Video Streaming , VPN και εταιρικές συνδέσεις και Υπηρεσίες έξυπνων πόλεων (Smart City), όπου απαιτείται.

5.1.2. Περιγραφή Τεχνολογίας EPON

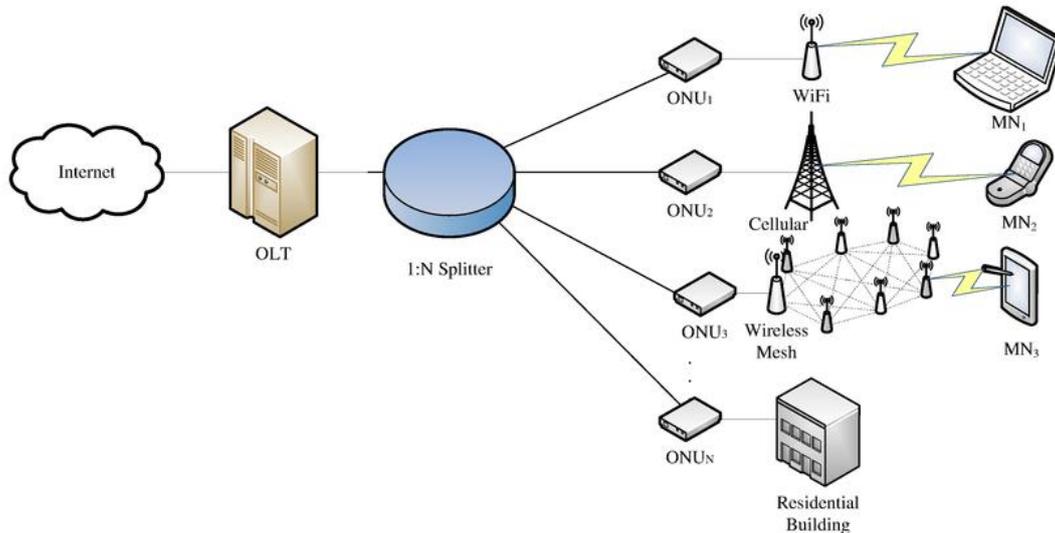
Το EPON βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.3ah και χρησιμοποιεί Ethernet πλαίσια για τη μετάδοση δεδομένων πάνω από οπτικές ίνες.

Βασικά χαρακτηριστικά: Downstream ταχύτητα: έως 1.25 Gbps, Upstream ταχύτητα: έως 1.25 Gbps, Μέγιστη απόσταση OLT – ONU: έως 20 km, Αναλογία διαχωρισμού (split ratio): 1:16 / 1:32 / 1:64

Η μετάδοση downstream γίνεται σε broadcast μορφή, ενώ η upstream επικοινωνία βασίζεται σε TDMA (Time Division Multiple Access).

5.1.3. Αρχιτεκτονική Δικτύου

Τοπολογία: Η τοπολογία είναι σημείο-προς-πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint), με: ένα OLT να εξυπηρετεί πολλαπλά ONU, και παθητικούς διαχωριστές σε ενδιάμεσα σημεία. Η αρχιτεκτονική του δικτύου φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα και το δίκτυο αυτό αποτελείται από τα βασικά στοιχεία τα οποία αναλύονται στην συνέχεια:



Σχήμα 11 Οπτικό Παθητικό δίκτυο EPON

5.1.3.1 OLT (Optical Line Terminal)

Η συσκευή αυτή, τοποθετείται στο κεντρικό σημείο (κέντρο δικτύου ή data center) και διαχειρίζεται την επικοινωνία με όλα τα ONU, κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, και παρέχει διασύνδεση με το core/backbone δίκτυο.

5.1.3.2 ODN (Optical Distribution Network)

Είναι το παθητικό δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει: μονότροπες οπτικές ίνες, παθητικούς οπτικούς διαχωριστές (splitters) και τους καταναμητές και οπτικά κουτιά.

Δεν απαιτεί τροφοδοσία ή ενεργή συντήρηση.

5.1.3.3 ONU / ONT (Optical Network Unit / Terminal)

Τοποθετείται στον τελικό χρήστη : μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό Ethernet και παρέχει θύρες LAN, Wi-Fi και, προαιρετικά, VoIP.

5.1.4 Οπτικός Προϋπολογισμός

Ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη: απώλειες οπτικής ίνας (~0.35 dB/km), απώλειες splitters, και απώλειες συγκολλήσεων και συνδέσεων.

Ο συνολικός οπτικός προϋπολογισμός ισχύος διατηρείται εντός των ορίων του εξοπλισμού EPON (τυπικά 28–30 dB).

5.1.5 Ασφάλεια και Διαχείριση

Η ασφάλεια διασφαλίζεται μέσω: κρυπτογράφησης downstream δεδομένων (AES), αυθεντικοποίησης ONU, και VLANs και QoS πολιτικών. Και η διαχείριση του δικτύου γίνεται μέσω: συστημάτων NMS, SNMP, και μέσω απομακρυσμένης παρακολούθησης και διάγνωσης.

5.1.6 Πίνακας Υλικών (Bill of Materials – BOM)

5.1.6.1 Ενεργός Εξοπλισμός

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	OLT EPON 4–8 θυρών	τεμ.	1
2	SFP EPON Transceivers	τεμ.	4
3	ONU / ONT για τελικούς χρήστες	τεμ.	64
4	Switch Aggregation (L2/L3)	τεμ.	1
5	UPS για OLT & ενεργό εξοπλισμό	τεμ.	1

5.1.6.2 Παθητικός Εξοπλισμός Οπτικών Ινών

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	Μονότροπη οπτική ίνα G.652D	m	5.000
2	Οπτικοί διαχωριστές 1:8	τεμ.	8
3	Οπτικοί διαχωριστές 1:16	τεμ.	4
4	Οπτικά κουτιά διανομής (ODF)	τεμ.	4
5	Οπτικά κουτιά διακλάδωσης	τεμ.	12
6	Patch cords οπτικών ινών	τεμ.	40
7	Pigtails & splice protectors	τεμ.	80

5.1.6.3 Εργασίες & Υπηρεσίες

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	Εγκατάσταση οπτικών ινών	m	5.000
2	Συγκολλήσεις οπτικών ινών	τεμ.	80
3	Εγκατάσταση & ρύθμιση OLT	τεμ.	1
4	Παραμετροποίηση ONU	τεμ.	64
5	Μετρήσεις & πιστοποίηση δικτύου	έργο	1
6	Τεκμηρίωση & as-built σχέδια	έργο	1

5.1.7. Ενδεικτικός Προϋπολογισμός Έργου

5.1.7.1 Ενδεικτικό Κόστος Εξοπλισμού

Κατηγορία	Κόστος (€)
Ενεργός εξοπλισμός	9.500
Παθητικός εξοπλισμός	7.200
ONU / ONT χρηστών	6.400
Σύνολο εξοπλισμού	23.100

5.1.7.2 Ενδεικτικό Κόστος Εργασιών

Κατηγορία	Κόστος (€)
Εγκατάσταση οπτικών ινών	7.500
Συγκολλήσεις & τερματισμοί	2.400
Παραμετροποίηση & δοκιμές	2.000
Τεκμηρίωση & πιστοποίηση	1.000
Σύνολο εργασιών	12.900

5.1.7.3 Ενδεικτικός Συνοπτικός Προϋπολογισμός

Περιγραφή	Κόστος (€)
Σύνολο εξοπλισμού	23.100
Σύνολο εργασιών	12.900
Απρόβλεπτα (10%)	3.600
Γενικό Σύνολο Έργου	39.600 €

(Τα ποσά δεν περιλαμβάνουν ΦΠΑ)

5.1.8. Συμπεράσματα

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, ασφάλεια και μεγάλη διάρκεια ζωής της επένδυσης

5.2 Σενάριο Μελέτης Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύου GPON

5.2.1. Αντικείμενο Μελέτης

Η παρούσα μελέτη αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών τεχνολογίας GPON (Gigabit Passive Optical Network), με στόχο την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων και αυξημένης αξιοπιστίας σε τελικούς χρήστες. Η προτεινόμενη λύση βασίζεται σε παθητική αρχιτεκτονική σημείο-προς-πολλαπλά σημεία και συμμορφώνεται με τα διεθνή πρότυπα της σειράς ITU-T G.984.

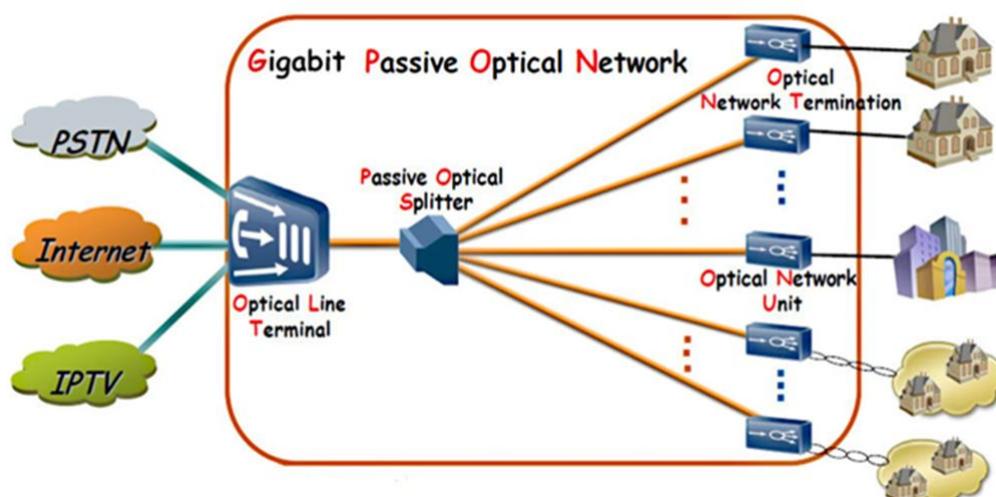
Απαιτούμενες Υπηρεσίες

Το δίκτυο GPON υποστηρίζει: Υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο Διαδίκτυο, Υπηρεσίες φωνής μέσω IP (VoIP), IPTV και υπηρεσίες πολυμέσων, Εταιρικές συνδέσεις και VPN καθώς και Υποδομές έξυπνων εφαρμογών (Smart City).

5.2.2. Σχεδιασμός Δικτύου - Τοπολογία

Η τοπολογία είναι Point-to-Multipoint, με ένα OLT να εξυπηρετεί πολλαπλά ONT μέσω παθητικών διαχωριστών. (Σχήμα 5.2.1) Το δίκτυο GPON αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

GPON Technology



Σχήμα 12 Οπτικό Παθητικό Δίκτυο GPON

5.2.3.1 OLT (Optical Line Terminal)

Το OLT εγκαθίσταται στο κεντρικό σημείο του δικτύου και: διαχειρίζεται και ελέγχει τα ONT, κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, διασυνδέεται με το δίκτυο κορμού (core network).

5.2.3.2 ODN (Optical Distribution Network)

Το ODN είναι πλήρως παθητικό και περιλαμβάνει: μονότροπες οπτικές ίνες, παθητικούς οπτικούς διαχωριστές (splitters), κουτιά διακλάδωσης και κατανεμητές.

5.2.3.3 ONT / ONU

Τοποθετούνται στον χώρο του τελικού χρήστη και παρέχουν: διεπαφές Ethernet, Wi-Fi, VoIP, υποστήριξη IPTV, όπου απαιτείται.

5.2.4 Οπτικός Προϋπολογισμός Ισχύος

Κατά τον σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη: απώλειες οπτικής ίνας (~0,35 dB/km), απώλειες splitters, απώλειες συγκολλήσεων και συνδέσεων. Ο συνολικός οπτικός προϋπολογισμός διατηρείται εντός των ορίων GPON (τυπικά 28 dB ή 32 dB, ανάλογα με την κλάση του εξοπλισμού).

5.2.5 Ασφάλεια και Διαχείριση

Η ασφάλεια εξασφαλίζεται μέσω: κρυπτογράφησης downstream δεδομένων (AES-128), αυθεντικοποίησης ONT, διαχωρισμού υπηρεσιών με VLANs. Η διαχείριση του δικτύου πραγματοποιείται μέσω συστημάτων NMS, με υποστήριξη: SNMP, απομακρυσμένης παραμετροποίησης, εποπτείας απόδοσης και βλαβών.

5.2.6 Πίνακας Υλικών (Bill of Materials – GPON)

Οι ποσότητες και τα κόστη είναι ρεαλιστικά και συντηρητικά, για ένα τυπικό έργο 64 τελικών χρηστών (split 1:32), και μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν.

5.2.6.1 Ενεργός Εξοπλισμός

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	OLT GPON (4–8 PON ports)	τεμ.	1
2	SFP GPON OLT Transceivers	τεμ.	4
3	ONT GPON τελικών χρηστών	τεμ.	64
4	Switch Aggregation L2/L3	τεμ.	1
5	UPS για OLT & ενεργό εξοπλισμό	τεμ.	1

5.2.6.2 Παθητικός Εξοπλισμός Οπτικών Ινών (ODN)

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	Μονότροπη οπτική ίνα G.652D	m	5.000
2	Οπτικοί διαχωριστές GPON 1:32	τεμ.	2
3	Οπτικοί κατανεμητές ODF	τεμ.	4
4	Οπτικά κουτιά διακλάδωσης	τεμ.	12
5	Patch cords οπτικών ινών	τεμ.	40
6	Pigtails & splice protectors	τεμ.	80

5.2.6.3 Εργασίες & Υπηρεσίες

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	Εγκατάσταση οπτικών ινών	m	5.000
2	Συγκολλήσεις οπτικών ινών	τεμ.	80

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
3	Εγκατάσταση & ρύθμιση OLT GPON	τεμ.	1
4	Παραμετροποίηση ONT	τεμ.	64
5	Μετρήσεις OTDR & πιστοποίηση	έργο	1
6	Τεκμηρίωση & as-built σχέδια	έργο	1

5.2.6.4. Ενδεικτικός Προϋπολογισμός Έργου GPON

Ενδεικτικό Κόστος Εξοπλισμού

Κατηγορία	Κόστος (€)
OLT & SFP GPON	11.500
ONT τελικών χρηστών	7.680
Παθητικός εξοπλισμός ODN	8.200
UPS & βοηθητικός εξοπλισμός	1.200
Σύνολο εξοπλισμού	28.580

5.2.6.5. Ενδεικτικό Κόστος Εργασιών

Κατηγορία	Κόστος (€)
Εγκατάσταση οπτικών ινών	7.500
Συγκολλήσεις & τερματισμοί	2.400
Παραμετροποίηση & δοκιμές	2.200
Πιστοποίηση & τεκμηρίωση	1.100
Σύνολο εργασιών	13.200

5.2.6.6. Συνοπτικός Προϋπολογισμός

Περιγραφή	Κόστος (€)
Σύνολο εξοπλισμού	28.580
Σύνολο εργασιών	13.200
Απρόβλεπτα (10%)	4.180
Γενικό Σύνολο Έργου	45.960 €

(Τα ανωτέρω ποσά δεν περιλαμβάνουν ΦΠΑ)

5.2.6.7. Συμπεράσματα

Η υλοποίηση δικτύου GPON αποτελεί μια ώριμη και αποδοτική λύση για την ανάπτυξη σύγχρονων ευρυζωνικών υποδομών. Καλύπτει τις σημερινές απαιτήσεις υψηλών ταχυτήτων και παρέχει τη βάση για μελλοντικές αναβαθμίσεις χωρίς σημαντικές αλλαγές στο παθητικό δίκτυο.

5.3 Σενάριο Μελέτης Σχεδιασμού και Υλοποίησης Δικτύου WDM-PON

5.3.1. Αντικείμενο Μελέτης

Η παρούσα μελέτη αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών **WDM-PON (Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network)**, με στόχο την παροχή υψηλών ταχυτήτων, εγγυημένου εύρους ζώνης και πλήρους απομόνωσης των χρηστών.

Απαιτούμενες Υπηρεσίες

Η τεχνολογία WDM-PON επιλέγεται για: ατομική ανάθεση μήκους κύματος σε κάθε χρήστη, πλήρη απομόνωση δεδομένων μεταξύ χρηστών, υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων (>10 Gbps) και υπηρεσιών νέας γενιάς (VoIP, IPTV, Cloud). Πρόσβαση στο Internet υψηλών ταχυτήτων (>10 Gbps), VoIP & Video conferencing, IPTV / Video on Demand, Εταιρικές υπηρεσίες VPN και Υποδομές έξυπνης πόλης (Smart City, IoT).

5.3.2. Τεχνολογική Περιγραφή WDM-PON

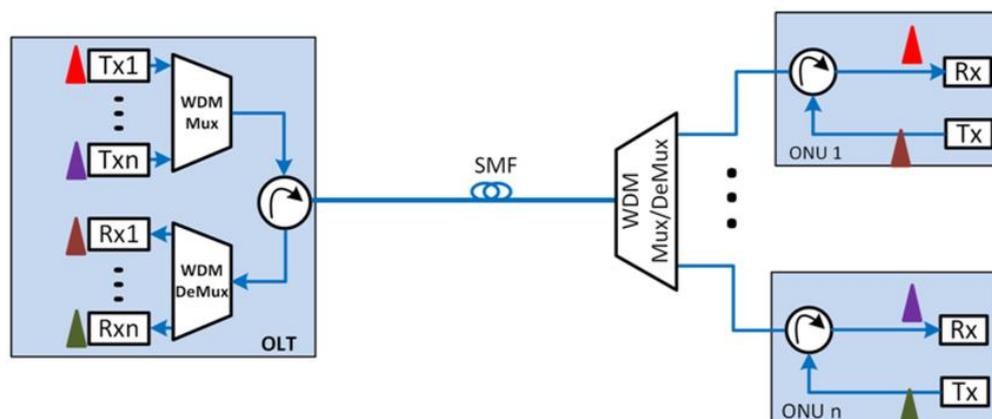
Το WDM-PON βασίζεται στην πολλαπλή διαίρεση με μήκη κύματος (**Wavelength Division Multiplexing**) πάνω σε μονότροπη οπτική ίνα. Κάθε τελικός χρήστης λαμβάνει αποκλειστικό μήκος κύματος, εξασφαλίζοντας: Ταχύτητα καθόδου: 1–10 Gbps (ανά χρήστη), Ταχύτητα ανόδου: 1–10 Gbps, Μέγιστη απόσταση OLT – ONU: 20–40 km, Χρήση CWDM / DWDM φίλτρων, και Υποστήριξη TDM ή TDMA για επιπλέον βελτιστοποίηση

Η αρχιτεκτονική είναι ατομική (point-to-point logical), αλλά χρησιμοποιεί παθητικά splitters και multiplexers για οικονομία ινών.

5.3.3. Αρχιτεκτονική Δικτύου

Τοπολογία

Η αρχιτεκτονική είναι **Point-to-Point logical / Point-to-Multipoint physical**. Κάθε χρήστης λαμβάνει αποκλειστικό μήκος κύματος, αλλά η ίδια οπτική ίνα μπορεί να μεταφέρει πολλά μήκη κύματος μέσω WDM.



Σχήμα 13 Οπτικό Παθητικό Δίκτυο WDM-PON

Βασικά εξαρτήματα του δικτύου:

5.3.3.1 OLT / OLT Line Cards

Κεντρικός κόμβος διαχείρισης WDM-PON, Διασύνδεση με core/backbone δίκτυο, Εκπομπή πολλαπλών μήκων κύματος προς ONU και Υποστήριξη TDM/WDM διαχείρισης

5.3.3.2 ODN (Optical Distribution Network)

Περιλαμβάνει μονότροπες οπτικές ίνες, WDM multiplexers και splitters, Παθητικό δίκτυο χωρίς τροφοδοσία και χρήση CWDM/DWDM φίλτρων για κατεύθυνση ανά μήκος κύματος

5.3.3.3 ONU / ONT

Λαμβάνει αποκλειστικό μήκος κύματος, Παρέχει υπηρεσίες Ethernet, Wi-Fi, VoIP, IPTV, Υποστηρίζει QoS, VLAN, ασφάλεια AES

5.3.4. Οπτικός Προϋπολογισμός

Απώλειες οπτικής ίνας: ~0,35 dB/km, Απώλειες WDM MUX/DEMUX: 3–5 Db, Απώλειες splitters: 3–7 dB ανά βαθμίδα. Επομένως, συνολικός προϋπολογισμός: 25–30 dB (τυπικά)

5.3.5. Ασφάλεια και Διαχείριση

Κρυπτογράφηση AES για downstream/ upstream, Αποκλειστικό μήκος κύματος ανά χρήστη → πλήρης απομόνωση, Διαχείριση μέσω NMS, SNMP, απομακρυσμένης παρακολούθησης και QoS, VLAN και SLA monitoring.

5.3.6 Πίνακας Υλικών (BOM – WDM-PON)

5.3.6.1 Ενεργός Εξοπλισμός

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	OLT WDM-PON 4–8 PON ports	τεμ.	1
2	Tunable Transceivers (OLT)	τεμ.	4
3	ONU / ONT WDM-PON τελικών χρηστών	τεμ.	64
4	Switch Aggregation L2/L3	τεμ.	1
5	UPS για OLT & ενεργό εξοπλισμό	τεμ.	1

5.3.6.2 Παθητικός Εξοπλισμός Οπτικών Ινών (ODN)

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	Μονότροπη οπτική ίνα G.652D	m	5.000
2	WDM MUX / DEMUX (DWDM ή CWDM)	τεμ.	8
3	Οπτικοί διαχωριστές / Splitters	τεμ.	4
4	Οπτικά κουτιά διανομής (ODF)	τεμ.	4
5	Οπτικά κουτιά διακλάδωσης	τεμ.	12
6	Patch cords οπτικών ινών	τεμ.	64
7	Pigtails & splice protectors	τεμ.	80

5.3.6.3 Εργασίες & Υπηρεσίες

A/A	Περιγραφή	Μονάδα	Ποσότητα
1	Εγκατάσταση οπτικών ινών	m	5.000
2	Συγκολλήσεις οπτικών ινών	τεμ.	80
3	Εγκατάσταση & ρύθμιση OLT WDM	τεμ.	1
4	Παραμετροποίηση ONT	τεμ.	64
5	Μετρήσεις OTDR & πιστοποίηση	έργο	1
6	Τεκμηρίωση & as-built σχέδια	έργο	1

5.3.6.4. Ενδεικτικός Προϋπολογισμός Έργου WDM-PON

5.3.6.4.1 Ενδεικτικό Κόστος Εξοπλισμού

Κατηγορία	Κόστος (€)
OLT WDM-PON + Transceivers	18.000
ONU / ONT τελικών χρηστών	12.800
Παθητικός εξοπλισμός ODN (MUX, Splitters, ODF)	10.500
UPS & βοηθητικός εξοπλισμός	1.500
Σύνολο εξοπλισμού	42.800

5.3.6.4.2 Ενδεικτικό Κόστος Εργασιών

Κατηγορία	Κόστος (€)
-----------	------------

Κατηγορία	Κόστος (€)
Εγκατάσταση οπτικών ινών	8.000
Συγκολλήσεις & τερματισμοί	2.500
Παραμετροποίηση & δοκιμές	2.500
Πιστοποίηση & τεκμηρίωση	1.200
Σύνολο εργασιών	14.200

5.3.6.4.3 Συνοπτικός Προϋπολογισμός

Περιγραφή	Κόστος (€)
Σύνολο εξοπλισμού	42.800
Σύνολο εργασιών	14.200
Απρόβλεπτα (10%)	5.700
Γενικό Σύνολο Έργου	62.700 €

(Τα ποσά δεν περιλαμβάνουν ΦΠΑ)

5.3.7. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία WDM-PON προσφέρει **απόλυτη ασφάλεια, υψηλές ταχύτητες και εγγυημένο εύρος ζώνης ανά χρήστη**, καθιστώντας την ιδανική για: επιχειρησιακούς πελάτες, δημόσιες υπηρεσίες υψηλής ασφάλειας και για υποδομές έξυπνων πόλεων. Η αρχιτεκτονική WDM-PON είναι οικονομικά βιώσιμη και μελλοντικά επεκτάσιμη, παρέχοντας αξιόπιστη και ευέλικτη πλατφόρμα.

6. Συζήτηση

Η παρούσα εργασία εξετάζει τις τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (PON) και την αξιοποίησή τους ως υποδομή Οπτικών Τοπικών Δικτύων (OLAN/POL), εστιάζοντας τόσο στις αρχιτεκτονικές ιδιαιτερότητες όσο και στην απόδοση υπό διαφορετικά σενάρια φόρτου, σχεδιαστικών επιλογών και λειτουργικών περιορισμών. Από τη σύγχρονη βιβλιογραφία καθίσταται φανερό ότι η καταλληλότητα μιας λύσης OLAN δεν καθορίζεται μόνο από την επιλογή προτύπου (π.χ., GPON ή XGS-PON) (Kramer, 2002; Aurzada et al., 2011; Mechdyne, 2022; Gagnon, 2019). Συγκεκριμένα, επηρεάζεται σημαντικά αλλά από την αρχιτεκτονική point-to-multipoint, τους μηχανισμούς πρόσβασης στο upstream και τις πολιτικές κατανομής εύρους ζώνης (DBA), καθώς και από παραμέτρους εγκατάστασης και λειτουργικής αξιοπιστίας στο πεδίο (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011; Mechdyne, 2022; Gagnon, 2019).

Η εξέλιξη των τεχνολογιών PON, από τις πρώιμες υλοποιήσεις EPON/GPON έως τις νεότερες XGS-PON και NG-PON2, καθιστά φανερή την ανάγκη για αναδιαμόρφωση των σύγχρονων απαιτήσεων πρόσβασης προς την αναζήτηση υψηλότερης συνολικής χωρητικότητας και μεγαλύτερης συμμετρίας upstream/downstream (Hajomer et al., 2024; Sapundzhi et al., 2025; Memon et al., 2025). Η εν λόγω ανάγκη σχετίζεται άμεσα με τη σύγχρονη χρήση υπηρεσιών cloud και συνεργατικών εφαρμογών και τηλεδιάσκεψης, στις οποίες ο τελικός χρήστης λειτουργεί συγχρόνως ως καταναλωτής και παραγωγός περιεχομένου (Hajomer et al., 2024; Sapundzhi et al., 2025; Memon et al., 2025). Έτσι, οι τεχνολογικές επιλογές οφείλουν να μην αξιολογούνται μόνο βασισμένες στην ονομαστική ταχύτητα, αλλά βασισμένες κυρίως στον τρόπο που ο upstream πόρος μετατρέπεται σε πραγματική εμπειρία χρήστη, ιδίως σε περιπτώσεις μεταβλητότητας της κίνησης και αιχμών στιγμιαίου φόρτου (bursty traffic)(Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025).

Σε ποικίλες μελέτες αναδεικνύεται ότι το upstream σε PON, μολονότι αποτελεί κοινόχρηστο μέσο, η απόδοση εξαρτάται δυσανάλογα από τους μηχανισμούς MAC/DBA (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Ειδικότερα, σε πρώιμες θεωρητικές και αναλυτικές προσεγγίσεις υποστηρίζεται ότι τα overheads

(guard times, report/grant ανταλλαγές, framing) και η δομή του polling επιδρούν τόσο στην αξιοποίηση του καναλιού όσο και στη μέση καθυστέρηση και στη διακύμανσή της (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011). Σε OLAN περιβάλλοντα, όπου ένα PON δεν λειτουργεί απλά ως ένα δίκτυο πρόσβασης, αλλά ως μια εσωτερική υποδομή οργανισμού, το παραπάνω γίνεται εμφανές (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Συνεπώς, αυξάνονται οι απαιτήσεις σε προβλεψιμότητα, χαμηλό jitter και σταθερή συμπεριφορά (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Από τη σύγκριση OLAN με παραδοσιακά Ethernet LAN φαίνεται ότι τα οφέλη της παθητικής αρχιτεκτονικής διανομής είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην απλοποίηση της υποδομής και στη μείωση των ενεργών σημείων στο πεδίο, επιδρώντας στην κατανάλωση, στις ανάγκες ψύξης χώρων καθώς και στο λειτουργικό κόστος (Aurzada et al., 2011; Ballesta & Boltimore, 2017; Mechdyne, 2022). Ωστόσο, η αρχιτεκτονική point-to-multipoint διαφοροποιεί ουσιαστικά τη συμπεριφορά απόδοσης, καθώς στο upstream η μετάδοση δεν είναι συνεχώς διαθέσιμη όπως σε ένα point-to-point Ethernet link, αλλά εξαρτάται από χρονοπρογραμματισμό και grants, δηλαδή από μια διαδικασία αναμονών όταν αυξάνεται η ταυτόχρονη δραστηριότητα των χρηστών, προκαλώντας καθυστέρηση και jitter (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011).

Όσον αφορά το επίπεδο του σχεδιασμού, φαίνεται ότι οι παράμετροι όπως split ratio, μήκος οπτικής ζεύξης, απώλειες ODN και προφίλ ταυτόχρονης δραστηριότητας είναι καθοριστικές και καθιστούν αναγκαίο όλες οι επιλογές να αξιολογούνται (Skubic et al. 2009; Rawshan et al. 2024; Aurzada et al., 2011). Η επίδραση του split ratio δεν αποτελεί αποκλειστικά ένα ζήτημα loss budget αλλά και συγκέντρωσης ζήτησης, αφού περισσότερες ONUs σε μία θύρα αυξάνουν την πιθανότητα συμφόρησης και το MAC overhead και επηρεάζουν το throughput και την καθυστέρηση (Skubic et al. 2009; Rawshan et al. 2024; Aurzada et al., 2011). Το παραπάνω έχει ιδιαίτερες επιπτώσεις στα OLAN, όπου αυξάνεται η πυκνότητα endpoints λόγω Wi-Fi densification, IoT και πολλαπλών υπηρεσιών ανά χώρο, καθιστώντας συχνά τη στατιστική πολυπλεξία λιγότερο ευνοϊκή από ό,τι σε σενάρια οικιακής χρήσης (Mechdyne, 2022; Horváth et al., 2020).

Σχετικά με τον τεχνολογικό τομέα, η EPON αποτελεί μια απλούστερη λύση η οποία εστιάζει στην εγγενή Ethernet μεταφορά, αλλά κατέχει συγκριτικά ασθενέστερη

ενσωμάτωση μηχανισμών QoS συγκριτικά με την GPON (Sapundzhi et al., 2025; Aurzada et al., 2011). Έτσι, μειώνεται η καταλληλότητά της όταν απαιτούνται εγγυήσεις ή μια πιο αυστηρή διαφοροποίηση υπηρεσιών (Sapundzhi et al., 2025; Aurzada et al., 2011). Αντίθετα, η GPON, με GEM και μηχανισμούς όπως οι T-CONTs, παρέχει ένα ισχυρότερο πλαίσιο κατηγοριοποίησης και πολιτικών εξυπηρέτησης και ως εκ τούτου έχει πλέον καθιερωθεί στις μέρες μας ως ευρέως διαδεδομένη βάση για FTTH (ITU-T, 2008; Sapundzhi et al., 2025; Ballesta & Boltimore, 2017). Ωστόσο, η ασυμμετρία ταχυτήτων της αποτελεί περιορισμό κυρίως σε περιβάλλοντα με υψηλή upstream απαίτηση, καθώς υπάρχει γενικότερα η ανάγκη μετατόπισης της κίνησης προς μεγαλύτερη συμμετρία (Hajomer et al., 2025; Horváth et al., 2020).

Η μετάβαση σε XGS-PON αποκτά ιδιαίτερη σημασία για OLAN χρήσεις, επειδή παρέχει συμμετρικά 10 Gbps και δυνατότητα συνύπαρξης με GPON στο ίδιο ODN μέσω WDM, ενώ επιτρέπει σταδιακές αναβαθμίσεις χωρίς την αντικατάσταση της παθητικής υποδομής (ITU-T, 2022; Ruffini, 2020; Horváth et al., 2020). Ακόμη και όταν η διαθέσιμη χωρητικότητα είναι υψηλή, βασικό ζήτημα δεν αποτελεί το συνολικό bandwidth, αλλά ο τρόπος που αυτό κατανέμεται δυναμικά στο upstream κατά τη μεταβαλλόμενη ή μεικτή κίνηση (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Η καθυστέρηση, το jitter και η αντιλαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoE) των χρηστών φαίνεται να επηρεάζεται άμεσα από την εν λόγω κατανομή (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Επομένως, μέσω της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης παρέχονται μεγαλύτερα περιθώρια σχεδιασμού, χωρίς όμως να αντικαθίσταται η ανάγκη κατάλληλων μηχανισμών DBA και σωστής παραμετροποίησης του συστήματος (Memon et al., 2025).

Η NG-PON2 μετατοπίζει το πλαίσιο διαχείρισης πόρων από μονοδιάστατο (χρόνος) σε δισδιάστατο (χρόνος και μήκος κύματος) μέσω TWDM-PON και παρέχει ορισμένες δυνατότητες κλιμάκωσης χωρητικότητας και ευελιξίας, όπως τη δυναμική μετακίνηση χρηστών σε διαφορετικά wavelengths για αποσυμφόρηση ή ανθεκτικότητα (Dixit et al., 2012; Ruffini et al., 2020; ITU-T, 2022). Σε σενάρια στρωματοποιημένης αναβάθμισης, όπου ποικίλες ομάδες χρηστών κατέχουν διαφορετικές ανάγκες, η ευελιξία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη (Ruffini, 2020; Ballesta & Boltimore, 2017). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και το κόστος του ενεργού

εξοπλισμού (π.χ. tunable transceivers) συχνά αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα μαζικής υιοθέτησης (Ruffini, 2020; Ballesta & Boltimore, 2017). Παρόμοια, η WDM-PON λογική παρέχει ισχυρή απομόνωση και προβλεψιμότητα, παραμένοντας όμως ακριβή και πολυσύνθετη για ευρεία εφαρμογή, γεγονός που οδηγεί στη μελέτη τεχνικών μείωσης κόστους όπως τα “colorless ONUs” (Ballesta & Boltimore, 2017; Horváth et al., 2020).

Αναφορικά με τον μηχανισμό που μετατρέπει την ονομαστική χωρητικότητα σε πραγματική συμπεριφορά δικτύου (DBA) φαίνεται ότι η κλασική λογική report/grant δημιουργεί αναπόφευκτη χρονική υστέρηση ανάμεσα στη ζήτηση (buffer occupancy) και στην εκχώρηση χρονοθυρίδων, ειδικά σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου και σε περιόδους αιχμής (Kramer & Pesavento, 2002; Chang, 2008). Παρόμοια, στις σύγχρονες μελέτες των Memon et al. (2025) και Aurzada et al. (2011) αναδεικνύεται ότι διαφορετικοί αλγόριθμοι DBA παράγουν διαφορετικά trade-offs μεταξύ latency, fairness και πολυπλοκότητας, τόσο στα οικοσυστήματα ITU-T όσο και IEEE.

Στο OLAN πλαίσιο, όπου η ίδια υποδομή εξυπηρετεί πολλαπλές υπηρεσίες με διαφορετικές προτεραιότητες, η επιλογή DBA και QoS πολιτικών κατέχει χαρακτηριστικά «διακυβέρνησης» πόρων (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020). Πιο συγκεκριμένα, σε εργασίες που δίνουν έμφαση σε multi-tenant ή SLA-aware scheduling καθίσταται φανερό ότι σε περιβάλλοντα TWDM/vPON η δημιουργία bandwidth maps οφείλει να γίνεται με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου, με σκοπό την τήρηση συμφωνιών σε επίπεδο υπηρεσίας χωρίς υπερβολική πρόσθετη καθυστέρηση (Ganguli & Ruffini, 2025; Ruffini, 2020). Αν και ένα OLAN δεν είναι υποχρεωτικά ακριβώς multi-tenant, η εσωτερική πολυ-υπηρεσιακή φύση ενός οργανισμού (φωνή/βίντεο/δεδομένα/IoT) αποκτά και την αντίστοιχη ανάγκη SLA-like συμπεριφοράς, καθιστώντας τις εν λόγω προσεγγίσεις ιδιαίτερα σχετικές ως σχεδιαστικό πλαίσιο (Ganguli & Ruffini, 2025; Gagnon, 2019).

Η εξέλιξη στην επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων split ratios φανερώνει νέα φαινόμενα τα οποία δεν εξηγούνται μόνο από «έλλειψη bandwidth». Σε coherent PON σενάρια (π.χ. 100G), κατά τους Zou et al. (2025) temporal misalignment και επιλογές scheduling αυξάνουν σημαντικά το latency ακόμη και όταν η χωρητικότητα είναι υψηλή, απαιτώντας προσαρμοστικές στρατηγικές DBA που εναλλάσσονται ανάλογα με το regime φορτίου. Αυτό είναι εξίσου καίριο και για την προοπτική των

OLAN, διότι η αύξηση endpoints (ιδίως IoT) αυξάνει τη συγκέντρωση τερματικών και σε νέα traffic patterns, με αποτέλεσμα το DBA να αποτελεί ολοένα και πιο κρίσιμο παράγοντα διατήρησης της προβλεψιμότητας (Memon et al., 2025; Zou et al., 2025).

Επιπλέον, σε PON/OLAN κρίσιμη διάσταση αποτελεί η λειτουργική αξιοπιστία, καθώς η κοινόχρηστη upstream φύση καθιστά το δίκτυο ιδιαίτερα ευάλωτο σε αστοχίες τερματικών επηρεάζοντας πολλούς χρήστες (ITU-T, 2022). Η θεσμική τεκμηρίωση για rogue ή babbling ONUs αναφέρει πως τα σφάλματα λογισμικού, MAC ή hardware οδηγούν σε εκπομπές εκτός χρονοθυρίδων ή σε συνεχή παρεμβολή, γεγονός που υποβαθμίζει τη συνολική υπηρεσία στο δένδρο διανομής (ITU-T, 2022). Σε τέτοιου τύπου σενάρια, ακόμη και ο βέλτιστος DBA αδυνατεί να διατηρήσει QoS εγγυήσεις, αν το φυσικό κανάλι διαταράσσεται συστηματικά (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019). Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι η απαίτηση μηχανισμών παρακολούθησης και απομόνωσης από πλευράς OLT, σε συνδυασμό με σωστές πρακτικές εγκατάστασης και ελέγχου της οπτικής υποδομής (ITU-T, 2022; Gagnon, 2019).

Επίσης, η πρακτική εμπειρία από POL/OLAN εγκαταστάσεις φανερώνει ότι οι φυσικοί παράγοντες εγκατάστασης, όπως η καθαριότητα συνδέσμων, οι απώλειες, ο σωστός έλεγχος μέσω OTDR/activation testing και γενικότερα η πειθαρχία στη διαδικασία commissioning, επηρεάζουν καθοριστικά την αξιοπιστία εξηγώντας προβλήματα που σε θεωρητικό επίπεδο αποδίδονταν στο πρότυπο (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022). Κατά συνέπεια, η επιτυχία ενός OLAN είναι ταυτόχρονα ένα τεχνικό και οργανωτικό ζήτημα. Από τη μια πλευρά η μείωση ενεργών κόμβων στο πεδίο δεν αναιρεί την ανάγκη της ωριμότητας, αλλά από την άλλη μεριά μετατοπίζει μεγάλο μέρος της πολυπλοκότητας στον κεντρικό σχεδιασμό, στη διαχείριση πολιτικών OLT και στη διαδικασία εγκατάστασης (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, τονίζεται ότι τα OLAN αποτελούν μια ισχυρή αρχιτεκτονική επιλογή για μεσαίες και μεγάλες εγκαταστάσεις, ειδικά όπου κύριοι παράγοντες αποτελούν το κόστος κύκλου ζωής, η κατανάλωση και η διαχειριστική απλοποίηση (Mechdyne, 2022; Ballesta & Boltimore, 2017). Παράλληλα, αναδεικνύεται ότι ο σχεδιασμός πρέπει να βασίζεται σε ρεαλιστική αξιολόγηση μετρικών όπως end-to-end delay, jitter, throughput, packet loss και fairness, δίνοντας έμφαση στη συμπεριφορά του upstream υπό μεικτή κίνηση και σε πολιτικές

DBA/QoS που ταιριάζουν στο προφίλ υπηρεσιών του οργανισμού (Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Η τεχνολογική αναβάθμιση προς XGS-PON και NG-PON2 αναδιαμφισβήτητα παρέχει πλεονεκτήματα, ωστόσο δεν υποκαθιστά τη σημασία της σωστής διαστασιολόγησης, της λειτουργικής παρακολούθησης και της αντιμετώπισης αστοχιών όπως το rogue ONU, που σε point-to-multipoint αρχιτεκτονικές έχουν δυσανάλογο αντίκτυπο (Ruffini, 2020; ITU-T, 2022).

Παρακάτω παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη βιβλιογραφική ανάλυση της παρούσας εργασίας σχετικά με την καταλληλότητα των τεχνολογιών PON ως υποδομή Οπτικών Τοπικών Δικτύων.

7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάστηκαν συστηματικά οι τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων (Passive Optical Networks – PONs) και η αξιοποίησή τους ως υποδομή Οπτικών Τοπικών Δικτύων (Optical Local Area Networks – OLANs), με στόχο την κατανόηση τόσο των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών όσο και της συμπεριφοράς απόδοσης σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας. Μέσω της βιβλιογραφικής ανάλυσης αναδείχθηκε ότι τα OLANs αποτελούν μία ώριμη και τεχνολογικά εδραιωμένη λύση για οργανισμούς με αυξημένες απαιτήσεις σε χωρητικότητα, διαθεσιμότητα και απλοποίηση υποδομών, υπό την προϋπόθεση ότι ο σχεδιασμός και η διαχείρισή τους βασίζονται στις ιδιαιτερότητες της αρχιτεκτονικής point-to-multipoint (Gagnon, 2019; Mechdyne, 2022).

Από τη σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών PON φάνηκε ότι η μετάβαση από πρώιμες υλοποιήσεις, όπως GPON και EPON, προς τις νεότερες γενιές, όπως XGS-PON και NG-PON2, δεν σχετίζεται μόνο με την αύξηση της ονομαστικής χωρητικότητας αλλά και με τη βελτίωση της συμμετρίας και της ευελιξίας στην κατανομή πόρων. Η αυξημένη upstream χωρητικότητα των XGS-PON και οι δυνατότητες πολυπλεξίας σε χρόνο και μήκος κύματος των TWDM-PON αρχιτεκτονικών δύνανται να μειώσουν τα προβλήματα συμφόρησης και να βελτιώσουν την ποιότητα υπηρεσίας, κυρίως σε περιβάλλοντα με ετερογενή και bursty κίνηση (Ruffini, 2020; Dixit et al., 2012; Horváth et al., 2020). Ωστόσο, τα εν λόγω οφέλη εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο το upstream κανάλι χρονοπρογραμματίζεται και διαχειρίζεται σε επίπεδο MAC.

Ένα κύριο συμπέρασμα είναι ότι οι μηχανισμοί Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) αποτελούν τον καθοριστικό παράγοντα που μετατρέπει τη θεωρητική χωρητικότητα ενός PON σε πραγματική απόδοση. Από τις πρώιμες αναλυτικές μελέτες έως τις σύγχρονες συγκριτικές αξιολογήσεις, προκύπτει με συνέπεια ότι η καθυστέρηση, το jitter, η απώλεια πακέτων και η δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων επηρεάζονται άμεσα από τον σχεδιασμό και την παραμετροποίηση των DBA αλγορίθμων (Kramer & Pesavento, 2002; Aurzada et al., 2011; Memon et al., 2025). Όσον αφορά τα OLANs, όπου η ίδια υποδομή εξυπηρετεί εφαρμογές με διαφορετικά

SLA, ο DBA λειτουργεί ως ένα εργαλείο διασφάλισης της ποιότητας της υπηρεσίας και της λειτουργικής ισορροπίας μεταξύ ανταγωνιστικών απαιτήσεων και όχι απλώς ως μηχανισμός βελτιστοποίησης απόδοσης (Ganguli & Ruffini, 2025).

Επίσης, οι σχεδιαστικές επιλογές όπως το split ratio, το μήκος οπτικής διαδρομής και το προφίλ ταυτόχρονης δραστηριότητας των χρηστών επηρεάζουν καθοριστικά τη συμπεριφορά του δικτύου (Aurzada et al., 2011). Σε μελέτες αξιολόγησης της απόδοσης καταδεικνύεται ότι η αύξηση του αριθμού ONUs ανά θύρα οδηγεί συχνά σε σημαντική αύξηση της καθυστέρησης και μείωση του throughput ανά χρήστη, ακόμη και όταν η συνολική χωρητικότητα φαίνεται επαρκής. Ως εκ τούτου, η σχεδίαση OLAN δεν βασίζεται αποκλειστικά σε ονομαστικές ταχύτητες ή θεωρητικά budgets, αλλά προϋποθέτει συνδυαστική αξιολόγηση αρχιτεκτονικής, traffic patterns και πολιτικών κατανομής πόρων (Aurzada et al., 2011; Skubic et al., 2009; Rawshan et al., 2024).

Ιδιαίτερα σημαντικό αποτελεί και το ζήτημα της λειτουργικής αξιοπιστίας. Από σχετικές μελέτες υποστηρίζεται ότι η κοινόχρηστη φύση του upstream καναλιού καθιστά τα PON ευάλωτα σε αστοχίες τερματικών, όπως rogue ή babbling ONUs, οι οποίες συχνά υποβαθμίζουν τη λειτουργία ολόκληρου του δένδρου διανομής (ITU-T, 2022). Στις ανωτέρω περιπτώσεις, ακόμη και οι αποδοτικότεροι DBA αλγόριθμοι δεν καταφέρνουν να διατηρήσουν τα αποδεκτά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, τονίζοντας την ανάγκη για μηχανισμούς επιτήρησης, απομόνωσης και ορθές πρακτικές εγκατάστασης και ελέγχου της οπτικής υποδομής (Gagnon, 2019; ITU-T, 2022; Aurzada et al., 2011; Zou et al., 2025).

Τέλος, στην παρούσα εργασία καθίσταται φανερό ότι τα Οπτικά Τοπικά Δίκτυα (OLANs) εδράζονται σε τεχνολογίες Παθητικών Οπτικών Δικτύων και μπορούν να παρέχουν ορισμένες αποδοτικές, επεκτάσιμες και ενεργειακά βιώσιμες λύσεις τοπικής δικτύωσης, υπό ορισμένες προϋποθέσεις όπως τον ολιστικό σχεδιασμό τους. Η συνολική απόδοση ενός OLAN δεν εξαρτάται μονοδιάστατα από την ονομαστική χωρητικότητα της τεχνολογίας PON, αλλά από έναν συνδυασμό παραγόντων όπως την αρχιτεκτονική επιλογής, του split ratio, των μηχανισμών Dynamic Bandwidth Allocation και του προφίλ κίνησης των εξυπηρετούμενων εφαρμογών (Aurzada et al., 2011). Επιπλέον, οι σύγχρονες εξελίξεις σε XGS-PON, NG-PON2 και TWDM-PON φανερώνουν ότι η αποτελεσματική διαχείριση του upstream καναλιού και η τήρηση

εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας είναι κρίσιμοι παράγοντες για τη βιώσιμη υλοποίηση OLAN σε περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις (Ruffini, 2020; Memon et al., 2025). Συνεπώς, η κατανόηση και η ενσωμάτωση των ανωτέρω παραμέτρων στον σχεδιασμό και τη λειτουργία των δικτύων είναι καθοριστική προϋπόθεση για την επιτυχή μετάβαση από τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές Ethernet σε σύγχρονες υποδομές οπτικής πρόσβασης (Gagnon, 2019).

8. Περιορισμοί

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να επισημανθούν. Αρχικά, η εργασία βασίζεται αποκλειστικά σε βιβλιογραφική ανάλυση και δεν περιλαμβάνει πειραματική υλοποίηση ή προσομοίωση συγκεκριμένων σεναρίων OLAN. Πιο συγκεκριμένα, οι αξιολογήσεις απόδοσης και τα συμπεράσματα αντλούνται από δημοσιευμένες μελέτες, οι οποίες κυρίως εδράζονται σε συγκεκριμένες παραδοχές σχετικά με το προφίλ κίνησης, τον αριθμό χρηστών και τις πολιτικές DBA. Τέλος, στην ανάλυση δεν μελετώνται vendor-specific υλοποιήσεις, οι οποίες πρακτικά ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά εξαιτίας ιδιόκτητων βελτιστοποιήσεων ή περιορισμών (Aurzada et al., 2011).

9. Προτάσεις

Με βάση τα παραπάνω, απορρέουν ορισμένες σαφείς προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Η υλοποίηση πειραματικών ή προσομοιωτικών σεναρίων OLAN με μελέτη διαφορετικών DBA αλγορίθμων υπό ρεαλιστικά πρότυπα κίνησης δεδομένων (traffic patterns), θα μπορούσε να επαληθεύσει και να αναλύσει ποσοτικά περαιτέρω τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, η διερεύνηση SLA-aware και virtualized DBA μηχανισμών σε TWDM-PON περιβάλλοντα, όπως προτείνεται από πρόσφατες μελέτες, ταιριάζει σε οργανισμούς με πολυ-υπηρεσιακή και πολυ-τμηματική λειτουργία (Ganguli & Ruffini, 2025; Memon et al., 2025). Τέλος, η μελέτη της συμπεριφοράς OLAN σε σενάρια πολύ υψηλής συγκέντρωσης endpoints, όπως αυτά που προκύπτουν από την ενσωμάτωση IoT και βιομηχανικών εφαρμογών, αποτελεί καίρια, καθώς τα φαινόμενα καθυστέρησης και χρονικής ασυμφωνίας θεωρούνται μελλοντικά πολύ σημαντικά (Zou et al., 2025).

10. Βιβλιογραφία

Aurzada, F., Scheutzow, M., Reisslein, M., Ghazisaidi, N., & Maier, M. (2011). Capacity and delay analysis of next-generation passive optical networks (NG-PONs). *IEEE Transactions on Communications*, 59(5), 1378–1388. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2011.030411.100418>

Ballesta, J. C., & Boltimore, J. (2017). Passive optical network (PON): Features and benefits. *Revista Antioqueña de las Ciencias Computacionales y de la Ingeniería del Software*, 7(2), 4–9. Available: <http://www.fundacioniai.org/raccis/v7n2/n13a1.pdf>

Chang, C.-H. (2008). *Dynamic bandwidth allocation MAC protocols for gigabit-capable passive optical networks* (Doctoral dissertation). University of Hertfordshire, United Kingdom.

Cobos Melià, J. (2011). *Design and performance evaluation of passive optical networks* (Doctoral dissertation).

Dixit, A., Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2012). Wavelength switched hybrid TDMA/WDM (TWDM) PON: A flexible next-generation optical access solution. In *Proceedings of the 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2012)*. Coventry, UK. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2012.6253746>

Gagnon, J. (2019). *Passive Optical LAN* (White Paper No. WPAPER116.1EN). EXFO Inc. https://www.exfo.com/contentassets/5bae20c086ac4c2594f7d9f05c000479/exfo_wpaper116_passive-optical-lan_en.pdf

Ganguli, D., & Ruffini, M. (2025). Merging virtual dynamic bandwidth allocations for multi-tenant PONs. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2506.12118>

Hajomer, A. A. E., Derkach, I., Filip, R., Andersen, U. L., Usenko, V. C., & Gehring, T. (2024). Continuous-variable quantum passive optical network. *Light: Science & Applications*, 13, 291. <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01633-9>

Horvath, T., Munster, P., Oujezsky, V., & Bao, N.-H. (2020). Passive optical networks progress: A tutorial. *Electronics*, 9(7), 1081. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS9071081>

ITU-T Study Group 15. (2022). *G. Suppl.49: Rogue ONU considerations* [Supplement]. International Telecommunication Union. https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2022-2024/15/Documents/flyers/Flyer_ITU-T_G.Suppl.49.pdf

Kramer, G., & Pesavento, G. (2002). Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network. *IEEE Communications Magazine*, 40(2), 66–73. <https://doi.org/10.1109/35.983910>

Mechdyne. (2022). *Optical LAN: The what, how, and why* [White paper]. <https://www.mechdyne.com/wp-content/uploads/2023/01/Optical-LAN-The-What-How-and-Why-Mechdyne-White-Paper.pdf>

Memon, K. A., Jaffer, S. S., Qureshi, M. A., & Qureshi, K. K. (2025). Dynamic bandwidth allocation in time division multiplexed passive optical networks: A dual-standard analysis of ITU-T and IEEE standard algorithms. *PeerJ Computer Science*, 11, e2863. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2863>

Poonam, & Rani, V. (2013). Analyzing delay and capacity in passive optical network. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*, 1(1), 54–56. <https://www.ijser.in/archives/v1i1/MDExMzA5MTM=.pdf>

Rawshan, R., Ahmed, T., & Rahman, M. (2024). Resource allocation and performance evaluation in high-speed passive optical networks. *Results in Engineering*, 21, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103151>

Ruffini, M. (2020). *NG-PON2 and TWDM architectures* [Presentation]. ITU-T Workshop. https://marcoruffini.com/wp-content/uploads/2020/02/lecture_feb_21_2020_disseminate.pdf

Sapundzhi, F., Valkanov, K., & Petrov, P. (2025). Design and implementation of a passive optical network for a small town. *Engineering Proceedings*, 100, 40. <https://doi.org/10.3390/engproc2025100040>

Skubic, B., Chen, J., Ahmed, S., & Wosinska, L. (2009). A comparison of dynamic bandwidth allocation for EPON, GPON, and next-generation TDM PON. *IEEE Communications Magazine*, 47(3), 40–48. https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DI469/papers/access%20-%20wired/A_comparison_of_dynamic_bandwidth_allocation_for_EPON_GPON_and_next-generation_TDM_PON.pdf

Zhang, D., Liu, D., Wu, X., & Nettet, D. (2020). Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(10), D99–D108. <https://doi.org/10.1364/JOCN.391830>

Zou, R., Zhang, H., Sundaresan, K., Jia, Z., & Subramaniam, S. (2025). A novel dynamic bandwidth allocation design for 100G coherent passive optical network. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2506.14221>