



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη Σχήματος Μείωσης Κατανάλωσης Ενέργειας για  
Παθητικά Οπτικά Δίκτυα τύπου 10G-EPON  
(Development of Energy – Efficient Scheme for  
10G-EPON Passive Optical Networks)**

**Αναστασίου Κωνσταντίνος    Α.Ε.Μ. 286**

**Επιβλέποντες**

**Λούτα Μαλαματή, Επίκουρος Καθηγήτρια**

**Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης, Π.Δ. 407/80**

**Κοζάνη (Ιούνιος 2013)**



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στο βιβλιογραφικό της μέρος εστιάζει στην παρουσίαση λύσεων για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και κυρίως στα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks - PONs) και στο ερευνητικό της μέρος, στην ανάπτυξη ενός νέου σχήματος μείωσης κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα 10G-EPON. Οι λύσεις που παρουσιάζονται και το νέο σχήμα που προτείνεται, χρησιμοποιούν με αποδοτικό τρόπο την αλληλουχία καταστάσεων ύπνωσης, πλήρους ή μερικής και κανονικής, ώστε να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας των μονάδων οπτικού δικτύου (Optical Network Units - ONUs), όταν υπάρχει έλλειψη δικτυακής κίνησης ή υπολειτουργία των συσκευών. Το περιβάλλον μελέτης σε ότι αφορά το νέο σχήμα είναι ένα μονο-καναλικό 10G-EPON με μεταβαλλόμενο ρυθμό υποστηριζόμενων ONUs στην online έκδοση διαμοίρασης εύρους ζώνης. Οι στόχοι της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Μελέτη και παρουσίαση της βιβλιογραφίας στο επιστημονικό πεδίο της μείωσης ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα.
- Ανάπτυξη ενός νέου σχήματος μείωσης κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα 10G-EPON.
- Αποτίμηση του προτεινόμενου σχήματος με προσομοίωση.
- Συγκριτικά συμπεράσματα και προτάσεις.

Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης που κατασκευάστηκε από την αρχή σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (event-driven programming). Τα συγκριτικά συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης. Οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs, αποδοτικότητα ενέργειας, μέση καθυστέρηση πακέτου και ρυθμοαπόδοση.

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει συνολικά πέντε κεφάλαια: το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια αναφορά στα τηλεπικοινωνιακά οπτικά δίκτυα και την απόδοση ενέργειας σε αυτά, το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα PONs, στους τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτά και στην ανάλυση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας στα WDM-PONs, το τρίτο κεφάλαιο έχει σαν θέμα την εξέλιξη από το 1G-EPON στο 10G-EPON και την εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτά, στο τέταρτο κεφάλαιο και σημαντικότερο γίνεται η ανάπτυξη και η αποτίμηση με προσομοίωση καθώς και η μέτρηση της απόδοσης του νέου σχήματος μείωσης ενέργειας στα δίκτυα 10G-EPON και τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συγκριτικά συμπεράσματα και η μελλοντική εργασία.

## **Abstract**

This thesis in the bibliographic part focuses to the presentation of solutions to reduce energy consumption to the telecommunication networks and especially to the passive optical networks (PONs) and in the research part, in developing a new scheme to reduce energy consumption in networks 10G-EPON. The solutions presented and the new scheme proposed, use in an efficient way the sequence of sleep states, full or partial and normal, to reduce the energy consumption of optical network units (ONUs), when there is a lack of network traffic or underactive of the devices. The study environment in terms of the new scheme is a single-channel 10G-EPON with variable rate of the supported ONUs in the online version sharing bandwidth. The objectives of the work are summarized as follows:

- Study and presentation of bibliography in the scientific field of energy reduction in passive optical networks.
- Developing a new scheme to reduce energy consumption in networks 10G-EPON.
- Evaluation of the proposed scheme with simulation.
- Comparative conclusions and proposals.

The evaluation of the analytical approach achieved through a simulation tool which was constructed from the beginning in MATLAB programming language, with the use of event-driven programming. The comparative results obtained through performance graphs based on the results of specific simulation scenarios. The performance metrics include: mean power consumption of ONUs, energy efficiency, mean packet delay and throughput.

This thesis includes a total of five chapters: the first chapter includes a reference to the telecommunication optical networks and energy efficiency in these, the second chapter refers to the PONs, to the power saving modes in these and in the analysis of the cost and energy consumption in WDM- PONs, the third chapter has as theme the evolution from 1G-EPON to 10G-EPON and energy savings in these, in the fourth chapter and most important, becomes the development and evaluation by simulation as well as the measurement of the performance of the new scheme energy reduction in networks 10G-EPON and finally, in the fifth chapter are presented the comparative conclusions and the future work.



## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα την Επίκουρο καθηγήτρια κ. Λούτα Μαλαματή για την βοήθεια και την εμπιστοσύνη της και τον καθηγητή (Π.Δ. 407/80) κ. Σαρηγιαννίδη Παναγιώτη για την υπομονή, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της οικογένειας μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την βοήθεια και την υποστήριξη τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, τους καθηγητές και το προσωπικό του Τμήματος και όλους όσους ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησαν να φέρω εις πέρας τους στόχους μου και να πραγματοποιήσω αυτή μου την επιθυμία.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	σελ 3
Abstract.....	σελ 4
Ευχαριστίες.....	σελ 6
<b>1. Απόδοση ενέργειας στα Τηλεπικοινωνιακά Οπτικά Δίκτυα (Telecom Optical Networks).....</b>	<b>σελ 11</b>
1.1 Εισαγωγή.....	σελ 11
1.2 Τομείς Δικτύου (Network Domains).....	σελ 11
1.3 Διαχείριση Ενέργειας σε Δίκτυα Κορμού (Core Networks).....	σελ 15
1.4 Διαχείριση ενέργειας στα Δίκτυα Πρόσβασης (Access Networks) και στα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metro Networks).....	σελ 19
1.5 Κέντρα Δεδομένων (Data Centers).....	σελ 20
<b>2. Διαχείριση ενέργειας στα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs).....</b>	<b>σελ 23</b>
2.1 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs).....	σελ 23
2.1.1 Εισαγωγή.....	σελ 23
2.1.2 Αρχιτεκτονική PON.....	σελ 23
2.1.3 Δυναμική Ανάθεση Εύρους Ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA)....	σελ 25
2.1.4 Multipoint Control Protocol (MPCP).....	σελ 26
2.1.5 Grant Sizing.....	σελ 26
2.1.6 Grant Scheduling (Inter ONU Scheduling) – ONU Queue Scheduling (Intra ONU scheduling).....	σελ 29
2.1.7 WDM Dynamic Bandwidth Allocation.....	σελ 31
2.2 Τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας στα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks).....	σελ 34
2.2.1 PON και κατανάλωση ενέργειας.....	σελ 34
2.2.2 Προσεγγίσεις για εξοικονόμηση ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα - PONs.....	σελ 35
2.2.3 Θεμελιώδεις παράμετροι που επηρεάζουν την Εξοικονόμηση Ενέργειας σε EPONs.....	σελ 37
2.3 Ανάλυση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας στα WDM-PONs.....	σελ 39
2.3.1 Κόστος και κατανάλωση ενέργειας των σύνθετων WDM-PONs.....	σελ 39
2.3.2 Συμπέρασμα.....	σελ 44



<b>3. Εξοικονόμηση ενέργειας στα 1G-EPON και 10G-EPON.....</b>	<b>σελ 46</b>
3.1 Gigabit Ethernet Passive Optical Networks (1G-EPON και 10G-EPON).....	σελ 46
3.1.1 Εισαγωγή.....	σελ 46
3.1.2 Εξέλιξη από το 1G-EPON στο 10G-EPON.....	σελ 47
3.2 Προκλήσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας στα 1G-EPON και 10G-EPON.....	σελ 49
3.2.1 Ενημέρωση για τον έλεγχο αναμονής MAC και χρονοπρογραμματισμός.....	σελ 51
3.2.2 Συμπέρασμα.....	σελ 53
3.3 Μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας και ανάλυση απόδοσης για συστήματα οπτικών παθητικών δικτύων τάξης 10 Gigabit.....	σελ 53
3.3.1 Περίληψη.....	σελ 53
3.3.2 Λειτουργία “ύπνου” με σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας σε σύστημα PON.....	σελ 54
3.3.3 Το μοντέλο αναλυτικά.....	σελ 58
3.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	σελ 60
3.3.5 Συμπεράσματα.....	σελ 62
3.4 Μελέτη και παρουσίαση των μηχανισμών αναμονής και ελέγχου προσαρμογής του ρυθμού σύνδεσης για ενεργειακή απόδοση στα 10G-EPON δίκτυα.....	σελ 62
3.4.1 Περίληψη.....	σελ 62
3.4.2 Έννοια του Υβριδικού Μηχανισμού.....	σελ 63
3.4.3 Λειτουργίες Εξοικονόμησης Ενέργειας.....	σελ 63
3.4.4 Αξιολόγηση απόδοσης.....	σελ 67
3.4.5 Πειραματική επαλήθευση.....	σελ 70
3.4.6 Σενάριο Υπηρεσίας.....	σελ 74
3.4.7 Συμπέρασμα.....	σελ 74
<b>4. Νέο Σχήμα Μείωσης Κατανάλωσης Ενέργειας για Παθητικά Οπτικά Δίκτυα τύπου   10G-EPON.....</b>	<b>σελ 75</b>
4.1 Εισαγωγή.....	σελ 75
4.2 Αριθμητικό Παράδειγμα 10G-EPON (online scheduling).....	σελ 75
4.3 Αναλυτική προσέγγιση και ανάπτυξη του νέου σχήματος.....	σελ 82
4.3.1 Πεδίο εφαρμογής και κίνητρο.....	σελ 82
4.3.2 Αλγόριθμος διαχείρισης της ενέργειας (Energy Management Algorithm).....	σελ 82
4.3.3 Ανάπτυξη και βασικά σημεία του κώδικα.....	σελ 85
4.4 Αξιολόγηση απόδοσης και αποτελέσματα.....	σελ 96

4.4.1	Πρώτο σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις απόδοσης και αποτελέσματα.....σελ	98
4.4.2	Δεύτερο σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις απόδοσης και αποτελέσματα.....σελ	113
4.5	Σύγκριση - Μετρήσεις απόδοσης και αποτελέσματα σύγκρισης.....σελ	118
<b>5.</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....σελ</b>	<b>128</b>
5.1	Συμπεράσματα.....σελ	128
5.2	Μελλοντική εργασία.....σελ	130
<b>Βιβλιογραφία.....σελ</b>		<b>132</b>

## 1. Απόδοση ενέργειας στα Τηλεπικοινωνιακά Οπτικά Δίκτυα (Telecom Optical Networks)

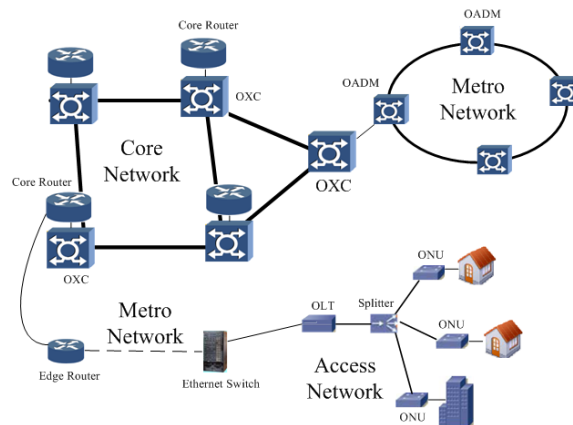
### 1.1 Εισαγωγή

Δεδομένου ότι η ενεργειακή κρίση και η προστασία του περιβάλλοντος αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία τα τελευταία χρόνια, νέα ερευνητικά θέματα για εκπόνηση τεχνολογικών λύσεων με βάση την εξοικονόμηση ενέργειας ερευνώνται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους. Συγκεκριμένα, λόγω της ταχείας αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας στις Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών (Information and Communication Technologies - ICT), δίνεται ιδιαίτερη προσοχή προς την “πράσινη” κατεύθυνση των λύσεων σε αυτές τις τεχνολογίες. Έχουν ήδη λάβει χώρα αλλά και συνεχίζουν με αυξανόμενο ρυθμό, σημαντικές ερευνητικές δραστηριότητες για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, με ιδιαίτερη έμφαση σε εκείνα που χρησιμοποιούν οπτικές τεχνολογίες και ερευνώνται συνεχώς οι ευκαιρίες ενεργειακής ελαχιστοποίησης που προκύπτουν από αυτές τις τεχνολογίες [1].

### 1.2 Τομείς Δικτύου (Network Domains)

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα (Σχήμα 1.1) μπορούν να χωριστούν σε τρεις τομείς (domains):

α) Δίκτυα Κορμού (Core Networks), β) Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metro Networks), και γ) Δίκτυα Πρόσβασης (Access Networks), προκειμένου να υποστηρίξουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και πιο αποδοτική μεταφορά δεδομένων.



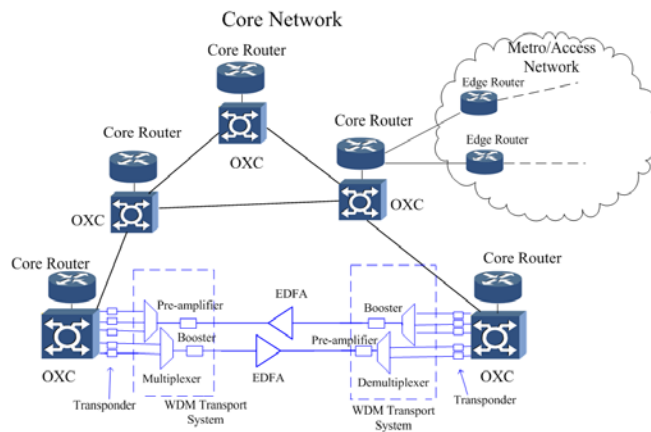
Σχήμα 1.1: Ιεραρχία τηλεπικοινωνιακού δικτύου

Τα πιο σημαντικά στοιχεία του δικτύου του κάθε τομέα απεικονίζονται στο Σχήμα 1.2 και στο Σχήμα 1.3. Για καθένα από αυτά τα στοιχεία του δικτύου, παρέχονται επίσης αντιπροσωπευτικά δεδομένα και αναφορές σχετικά με την ενεργειακή τους κατανάλωση (Πίνακας 1.1) [1].

## A. Δίκτυο Κορμού (Core Network)

Ο όρος δίκτυο κορμού συνήθως αναφέρεται στην υποδομή κορμού ενός δικτύου τηλεπικοινωνιών, το οποίο δια-συνδέει μεγάλες πόλεις (ως κόμβους του δικτύου) και καλύπτει εθνικά, ηπειρωτικά και ακόμη και διηπειρωτικά επίπεδα αποστάσεων. Το δίκτυο κορμού κατά κανόνα βασίζεται σε ένα πλέγμα ενός μοτίβου διασύνδεσης και μεταφέρει τεράστιες ποσότητες κίνησης που συλλέγονται μέσα από τις απομακρυσμένες περιοχές του δικτύου. Έτσι, είναι απαραίτητο να είναι εξοπλισμένο με τις κατάλληλες διεπαφές για τη διασύνδεση με τα μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα πρόσβασης που είναι επιφορτισμένα για τη συλλογή και τη διανομή της κίνησης, έτσι ώστε οι χρήστες που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του δικτύου κορμού.

Στο δίκτυο κορμού (Σχήμα 1.2), χρησιμοποιούνται ευρέως οπτικές τεχνολογίες για την υποστήριξη της βασικής φυσικής υποδομής και την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, μεγάλης χωρητικότητας, επεκτασιμότητας, κλπ. Για τον έξυπνο έλεγχο και τη διαχείριση του οπτικού δικτύου έχουν αναπτυχθεί διάφορες υψηλού επιπέδου διαχειρίσεις εξοπλισμού και τεχνολογίες [1].

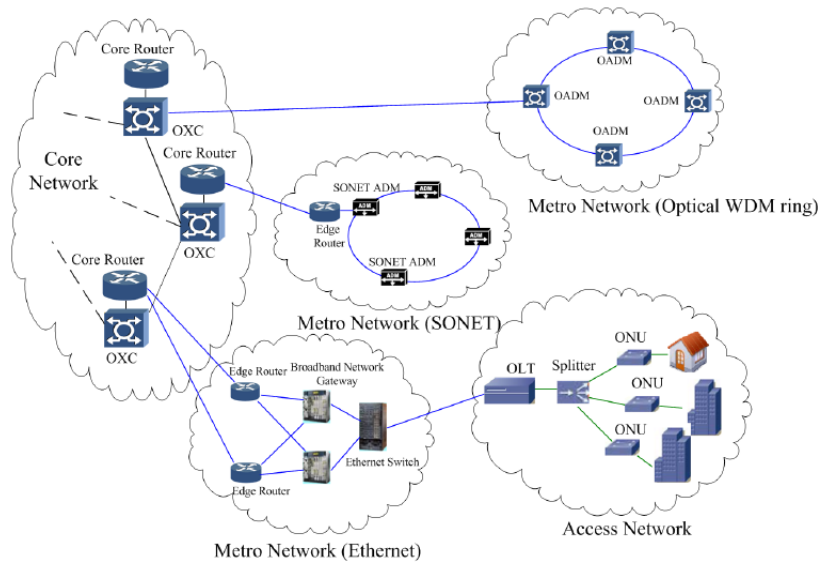


Σχήμα 1.2: Δίκτυο Κορμού (Core Network).

## B. Μητροπολιτικό Δίκτυο (Metro Network)

Το μητροπολιτικό δίκτυο είναι το τμήμα ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου που κατά κανόνα καλύπτει τις μητροπολιτικές περιοχές. Συνδέει τον εξοπλισμό για τη συγκέντρωση της κίνησης των οικιακών συνδρομητών (π.χ., παρέχει διεπαφές προς το διάσπαρτο δίκτυο πρόσβασης, όπως Digital Subscriber Line (xDSL) και Fiber to the Home ή Fiber to the x (FTTx)) και παρέχει απευθείας συνδέσεις με το δίκτυο κορμού για σύνδεση στο Internet. Διαφορετικές τεχνολογίες

δικτύωσης έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες μητροπολιτικές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, SONET (Synchronous Optical Networking), Οπτικοί δακτύλιοι WDM (Optical WDM ring) και Metro Ethernet είναι οι τρεις κυρίαρχες τεχνολογίες στα μητροπολιτικά δίκτυα [1].



**Σχήμα 1.3:** Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metro Networks) και Δίκτυο Πρόσβασης (Access Network).

### Γ. Δίκτυο Πρόσβασης (Access Network)

Το δίκτυο πρόσβασης γνωστό και ως το “τελευταίο μίλι” (“last mile”) του τηλεπικοινωνιακού δικτύου είναι αυτό που συνδέει το κτίριο τηλεπικοινωνιών CO (Central Office) του παρόχου με τους τελικούς χρήστες. Το δίκτυο πρόσβασης περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου τηλεπικοινωνιών. Είναι επίσης ένας σημαντικός καταναλωτής ενέργειας λόγω της παρουσίας ενός τεράστιου αριθμού ενεργών στοιχείων.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης που έχουν προταθεί και αναπτυχθεί στην αγορά των τηλεπικοινωνιών, όπως xDSL (Digital Subscriber Line), CM (Modem Cable), ασύρματα και κυψελοειδή δίκτυα, Fiber to the x (FTTx), WOBAN (Wireless Optical Broadband Access Network), κλπ.

Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- (α) Ενσύρματες (όπως xDSL, CM, FTTx, κλπ.) και
- (β) Ασύρματες.

Τα συστήματα βελτιωμένου χαλκού ή xDSL, καλύπτουν διάφορες τεχνολογίες όπως το ADSL (Asymmetric DSL), VDSL (very high speed DSL) και HDSL (high bit rate DSL). Οι τεχνολογίες xDSL χρησιμοποιούν την υφιστάμενη υποδομή του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταγωγής

(PSTN - Public Switched Telephone Network) για την παροχή υπηρεσιών Internet. Η τεχνολογία CM (Cable Modem) χρησιμοποιεί ομοαξονικό καλώδιο για την παροχή υπηρεσιών Internet μαζί με την ψηφιακή τηλεόραση (digital TV). Το Fiber to the x (FTTx) έχει διαφορετικές βασικές τεχνολογίες, όπως απευθείας ίνα (direct fiber), μοιραζόμενη ίνα (shared fiber) και η πιο επικρατέστερη είναι το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON – Passive Optical Network).

Το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON) είναι η κορυφαία επιλογή για την ανάπτυξη δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών γιατί έχει μόνο παθητικά στοιχεία στο πεδίο της ίνας (βλ. Σχήμα 1.3).

Ο Πίνακας 1.1 παραθέτει τα δεδομένα της κατανάλωσης ενέργειας για τα δυο κύρια στοιχεία του δικτύου σε μια αρχιτεκτονική PON:

- Το Οπτικό Τερματικό Γραμμής (OLT – Optical Line Terminal), που βρίσκεται στο κτίριο τηλεπικοινωνιών CO (Central Office) του παρόχου και την
- Μονάδα Οπτικού Δικτύου (ONU – Optical Network Unit), που βρίσκεται στον (ή κοντά στον) τελικό χρήστη.

Οι ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης περιλαμβάνουν το WiFi (Wireless Fidelity), το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) και την Κυψελοειδή υπηρεσία δεδομένων (όπως το LTE (Long Term Evolution), κλπ.). Το WOBAN είναι μια αρχιτεκτονική διασύνδεσης, η οποία αποτελείται από ένα ασύρματο δίκτυο στο μπροστινό άκρο (front – end), υποστηριζόμενη από ένα οπτικό backhaul δίκτυο και μπορεί να παρέχει υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης [1].

Network Domain	Component	Capacity	Energy Consumption
Core Network	Core Router (Cisco CRS-1 Multi-shelf System)	92 Tbps	1020 kW [26]
	Optoelectronic Switch (Alcatel-Lucent 1675 Lambda Unite MultiService Switch)	1.2 Tbps	2.5 kW [27]
	Optical Cross-Connect (MRV Optical Cross-Connect)	N/A	228 W [28]
	WDM Transport System (Ciena CoreStream Agility Optical Transport System)	3.2 Tbps	10.8 kW [24]
	WDM transponder (Alcatel-Lucent WaveStar OLS WDM Transponder)	40 Gbps	73 W [29]
	EDFA (Cisco ONS 15501 EDFA)	N/A	8 W [29]
Metro Network	Edge Router (Cisco 12816 Edge Router)	160 Gbps	4.21 kW [30], [31]
	SONET ADM (Ciena CN 3600 Intelligent Optical Multiservice Switch)	95 Gbps	1.2 kW [32]
	OADM (Ciena Select OADM)	N/A	450 W [33]
	Network Gateway (Cisco 10008 Router)	8 Gbps	1.1 kW [31]
	Ethernet Switch (Cisco Catalyst 6513 Switch)	720 Gbps	3.21 kW [26], [31]
Access Network	OLT (NEC CM7700S OLT)	1 Gbps	100 W [34]
	ONU (Wave7 ONT-E1000i ONU)	1 Gbps	5 W [34]

**Πίνακας 1.1:** Τυπικά δεδομένα της κατανάλωσης ενέργειας διαφορετικών στοιχείων σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα [1].

### **1.3 Διαχείριση Ενέργειας σε Δίκτυα Κορμού (Core Networks)**

Στα δίκτυα κορμού (Core Networks), η ενέργεια καταναλώνεται ως επί το πλείστον στο δίκτυο μετάδοσης και στον εξοπλισμό μεταγωγής, όπως δρομολογητές, OXCs (Optical Cross-Connect), EDFAs, και αναμεταδότες. Το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται από τα δίκτυα κορμού είναι τεράστιο. Ωστόσο, οι τρέχουσες αρχιτεκτονικές δικτύου και τα σχήματα λειτουργίας, γενικά δεν δίνουν μεγάλη προσοχή στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Ως εκ τούτου, πολλές πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου κορμού. Οι προσεγγίσεις για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε δίκτυα κορμού μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- (i) την επιλεκτική απενεργοποίηση στοιχείων του δικτύου,
- (ii) τον ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό του δικτύου,
- (iii) την ενεργειακά αποδοτική προώθηση των IP πακέτων, και
- (iv) την “πράσινη” δρομολόγηση [1].

#### ***A. Επιλεκτική απενεργοποίηση στοιχείων του δικτύου***

Η σημαντική προσέγγιση για την εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυο κορμού αποτελείται από την επιλεκτική απενεργοποίηση αδρανών στοιχείων του δικτύου, όταν ο φόρτος κίνησης μειώνεται (π.χ. τη νύχτα), ενώ εξακολουθούν να διατηρούνται οι ζωτικές λειτουργίες του δικτύου, προκειμένου να στηρίξουν την υπολειπόμενη κυκλοφορία. Αν θεωρηθεί μια αναπαράσταση της ιεραρχίας του δικτύου όπως αυτό στο Σχήμα 1.1, παρατηρείται ότι υπάρχει αρκετά συχνά πλεονασμός στο δίκτυο, έτσι ώστε μερικοί από τους κόμβους να μπορούν να απενεργοποιηθούν όταν δεν χρησιμοποιούνται ως πηγή ή προορισμός της κίνησης και δεν είναι απαραίτητοι επίσης ως κόμβοι μεταφοράς. Στο πλαίσιο αυτό, ένας κόμβος μπορεί να απενεργοποιηθεί (i) μόνο όταν είναι εντελώς αχρησιμοποίητος, (ii) όταν η κίνηση πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, αφήνοντας την ευθύνη για επαναδρομολόγηση της υπόλοιπης κίνησης σε ανώτερα επίπεδα, και (iii) μετά την προληπτική επαναδρομολόγηση της κίνησης κατά μήκος άλλων δρομολογητών, προκειμένου να αποφευχθεί η διακοπή της κίνησης. Αυτές οι τρεις προσεγγίσεις περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα βαρών όσον αφορά τον έλεγχο, τη διαχείριση και τη λειτουργία του δικτύου. Ενώ η πρώτη προσέγγιση δεν απαιτεί κανένα ή ελάχιστο πρόσθετο έλεγχο του δικτύου και η δεύτερη απαιτεί μόνο να συγκεντρώσει πληροφορίες «συμφόρησης», η τρίτη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ένα δίκτυο που έχει κάποια μορφή αυτόματης διάταξης και / ή αναδιάταξης στο χώρο.

Κατά παρόμοιο τρόπο, οι σύνδεσμοι μπορούν να απενεργοποιούνται όταν δεν υπάρχει κίνηση «πάνω» τους, ή όταν η κυκλοφορία πέφτει κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι, ή όταν είναι δυνατή η επαναδρομολόγηση της κίνησης που ρέει κατά μήκος τους. Δυστυχώς, τα περισσότερα από τα στοιχεία σε ένα δίκτυο κορμού, δεν μπορούν να κλείσουν μόνο χωρίς αυτό να επηρεάσει την απόδοση του δικτύου. Απενεργοποιώντας έναν ενδιάμεσο κόμβο κορμού μπορεί να προκληθεί επαναδρομολόγηση της σύνδεσης σε έναν μακρύτερο δρομολογητή, ο οποίος μερικές φορές μπορεί να μην είναι αποδεκτός για διάφορους λόγους: συμφόρηση, επιπλέον καθυστέρηση, κλπ.. Έτσι, η δυνατότητα απενεργοποίησης κόμβων ή συνδέσμων πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά σύμφωνα με περιορισμούς τη συνδεσιμότητα και την Ποιότητα Παροχής Υπηρεσιών (QoS – Quality of Service) [1].

### ***B. Ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός του δικτύου***

Ένας άλλος πιθανός τρόπος για να επιτευχθεί η ενεργειακή απόδοση είναι η επινόηση ενεργειακά αποδοτικών αρχιτεκτονικών άμεσα κατά το στάδιο του σχεδιασμού του δικτύου. Για παράδειγμα, στο άρθρο [2], θεωρείται η προσέγγιση του σχεδιασμού για ένα IP-over-WDM δίκτυο, όπου η κατανάλωση ενέργειας από IP δρομολογητές, EDFAs και αναμεταδότες από κοινού ελαχιστοποιείται. Τα αποτελέσματα απεικονίζουν ότι διαφορετικά σχήματα κίνησης έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ενεργειακά αποδοτική σχεδίαση [2]. Στο άρθρο αυτό, προτείνονται επίσης ικανές λύσεις για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από τον εξοπλισμό του δικτύου. Εξετάζονται δύο πιθανοί τρόποι για την εφαρμογή IP over WDM στα δίκτυα, δηλαδή, lightpath non-bypass και bypass, όπου το lightpath ορίζεται ως ένα point to point οπτικό κύκλωμα βασισμένο σε υποδιαιρέσεις μήκους κύματος ή πολυπλεξία χρονικών υποδιαιρέσεων με προσδιορισμένη συμπεριφορά και εγγυημένο bandwidth. Σε lightpath non-bypass, όλα τα lightpath που προσπίπτουν σε έναν κόμβο πρέπει να τερματιστούν, δηλαδή, όλα τα δεδομένα που μεταφέρονται από lightpath επεξεργάζονται και προωθούνται από δρομολογητές IP. Αλλά σε lightpath bypass προσέγγιση, επιτρέπεται η IP κίνηση, στην οποία ο προορισμός δεν είναι ο ενδιάμεσος κόμβος. Άμεσα παρακάμπτεται (bypass) ο ενδιάμεσος δρομολογητής μέσω ενός cut-through lightpath. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το lightpath με bypass μπορεί να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια από ότι με non-bypass, και το γεγονός αυτό απορρέει στο ότι ο αριθμός των IP δρομολογητών μπορεί να μειωθεί κατά τη χρήση του lightpath bypass σχήματος, στο σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικού δικτύου κορμού. Εκτός αυτού, υπολογίζεται επίσης η κατανάλωση ενέργειας των δρομολογητών, EDFAs, και αναμεταδοτών χωριστά. Φαίνεται ότι η συνολική

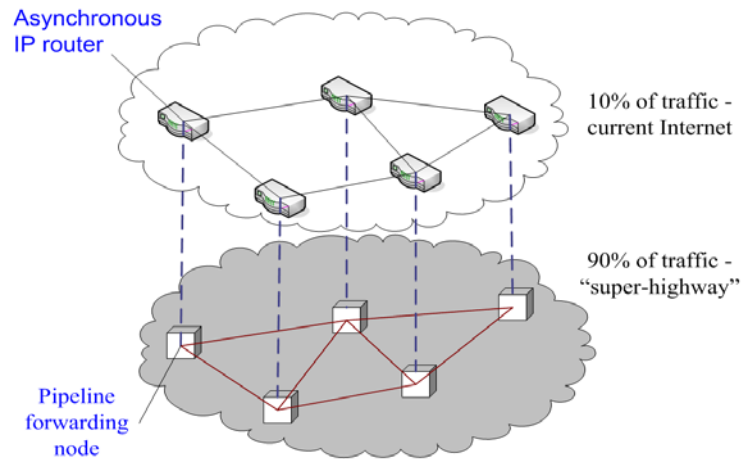


κατανάλωση ενέργειας των δρομολογητών (routers) είναι πολύ περισσότερη από ό, τι εκείνη των EDFAs και αναμεταδοτών σε IP-over-WDM δίκτυα.

### ***Γ. Ενεργειακά αποδοτική προώθηση των IP πακέτων***

Η Ενεργειακή επίγνωση προώθησης πακέτων έχει προταθεί για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε επίπεδο IP. Στο άρθρο [3], οι συγγραφείς δείχνουν ότι το μέγεθος των IP πακέτων επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας των δρομολογητών. Για σταθερό bit-rate σενάριο κίνησης, όσο μικρότερα είναι τα πακέτα IP που μεταφέρουν οι δρομολογητές, τόσο περισσότερη ενέργεια καταναλώνουν. Έτσι, τα νέα σχήματα προώθησης IP πακέτου μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικά. Το μέγεθος των πακέτων IP μπορεί να βελτιστοποιηθεί για εξοικονόμηση ενέργειας, όταν αυτά προωθούνται μέσω δρομολογητών. Ωστόσο, υπάρχει μια ανταλλαγή μεταξύ καθυστέρησης μεταγωγής πακέτου και ενεργειακά αποδοτικής προώθησης IP πακέτων.

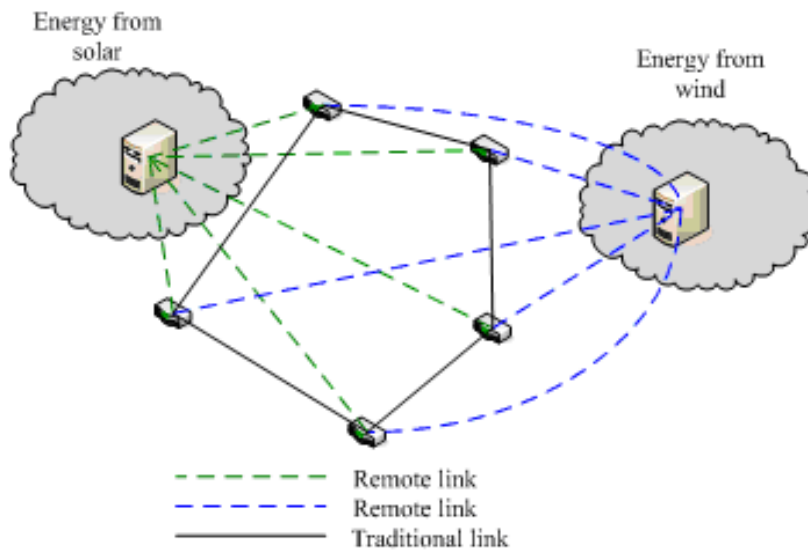
Μια άλλη προσέγγιση για την ενεργειακή απόδοση προώθησης IP πακέτων είναι η προώθηση pipeline [4]. Είναι ένα σχήμα μεταγωγής IP πακέτων, "με βάση το χρόνο" (που αναφέρεται επίσης ως μεταγωγή Time - Driven) και παρέχει τη δυνατότητα να παρατείνει την ενεργειακή απόδοση, με βάση το χρόνο μεταγωγής πακέτων IP, σε όλη τη διαδρομή προς τα άκρα του δικτύου. Με βάση την προώθηση pipeline, μια αρχιτεκτονική δικτύου η οποία περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητα παράλληλα υποδίκτυα εργασίας προτείνεται στην [5]. Τα δύο υποδίκτυα εργασίας είναι το τρέχον Internet και το «super - highway», όπου η προώθηση pipeline πακέτων IP έχει αναπτυχθεί (Σχήμα 1.4). Εκτός από την μεταφορά τυπικής κίνησης, όπως mail, χαμηλής προτεραιότητας web browsing και μεταφορά αρχείων, οι ασύγχρονοι δρομολογητές IP χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του σήματος, που απαιτείται για τη δημιουργία σύγχρονων εικονικών καναλιών στην προώθηση pipeline παράλληλου δικτύου, το οποίο μεταφέρει την κίνηση που απαιτεί η ντετερμινιστική υπηρεσία, όπως τηλεφωνικές κλήσεις, video on demand, video conferencing, και distributed gaming. Μεγάλο bandwidth απαιτείται από την πλειονότητα των εν λόγω video-based υπηρεσιών, οι οποίες είναι αναμενόμενη περίπτωση για πάνω από το 90% της μελλοντικής κίνησης του Internet. Η προώθηση pipeline παράλληλου δικτύου είναι ένα «super-highway», όπου μεταφέρει ένα μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας με ντετερμινιστική απόδοση. Παράδειγμα οπτικής εφαρμογής της Time-Driven μεταγωγής υπόσχεται ακόμη πιο σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [6].



**Σχήμα 1.4:** Παράλληλα δίκτυα με την ίδια οπτική υποδομή.

#### **Δ. “Πράσινη” δρομολόγηση**

Σε δίκτυα κορμού, προτείνεται η ενεργειακή δρομολόγηση ως ένα νέο σχήμα δρομολόγησης, το οποίο χρησιμοποιεί την κατανάλωση ενέργειας σε εξοπλισμό του δικτύου ως αντικείμενο προς βελτιστοποίηση (βλ. Σχήμα 1.5). Στο άρθρο [3] προτείνεται ένα ενεργειακό σχήμα δρομολόγησης που θεωρεί την αναδιαμόρφωση της γραμμής card/chassis, σε IP δρομολογητές. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή συντομότερη διαδρομή ή τη μη ενεργειακού σχήματος δρομολόγηση, η ενεργειακή δρομολόγηση αναμένεται να εξοικονομήσει ένα μεγάλο ποσό ενέργειας. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κάρτες και ο σκελετός γραμμής που είναι οι μεγάλοι καταναλωτές ενέργειας στο δίκτυο κορμού, δεν έχουν ρυθμιστεί για χρήση με ενεργειακή αποδοτικότητα σε παραδοσιακά σχήματα δρομολόγησης. Σε αυτό το ενεργειακό σχήμα δρομολόγησης, ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας από IP δρομολογητές σε δίκτυα κορμού. Επιπλέον, τα μελλοντικά ενεργειακά αποδοτικά σχήματα δρομολόγησης μπορεί να έχουν την τάση να είναι πιο δυναμικά, ώστε να μπορούν να αναδρομολογούν την κίνηση και να εξοικονομούν ενέργεια, σύμφωνα με τη διακύμανση της κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της περιόδου.



*Σχήμα 1.5: Πράσινη δρομολόγηση με δυνατότητα ανανεώσιμης ενέργειας.*

#### **1.4 Διαχείριση ενέργειας στα Δίκτυα Πρόσβασης (Access Networks) και στα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metro Networks)**

Μια πρόσφατη εκτίμηση [7] δείχνει ότι τα δίκτυα πρόσβασης (Access Networks), καταναλώνουν περίπου το 70% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του Internet (διαδικτύου). Ως εκ τούτου, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε δίκτυα πρόσβασης θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στο Internet.

Δεδομένου των απαιτήσεων αύξησης του εύρους ζώνης, τα δίκτυα πρόσβασης γίνονται όλο και πιο ετερογενή στη φύση, όπως οι διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης που συνδυάζονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, οι τρέχουσες εκδόσεις xDSL χρησιμοποιούν ίνες ως backhaul, και τα δίκτυα πρόσβασης CM (Cable Modem), χρησιμοποιούν HFC (Hybrid Fiber Coax) τεχνολογία, όπως το φυσικό δίκτυο. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών οπτικών ινών σε τεχνολογίες πρόσβασης θα οδηγήσει σε μελλοντικά ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα πρόσβασης.

Η κοινότητα ασύρματης δικτύωσης έχει αναπτύξει ενεργειακά αποδοτικές ασύρματες τεχνολογίες, για αρκετό χρονικό διάστημα. Η επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας σε μια ασύρματη συσκευή αποτελεί πολύ σημαντικό πρόβλημα. Αυτές οι ερευνητικές προσπάθειες μπορούν να συνοψιστούν ως χωριστή μελέτη. Η στόχευση επομένως επικεντρώνεται κυρίως στις οπτικές τεχνολογίες δικτύωσης για ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα πρόσβασης.

### ***Εκτίμηση Κατανάλωσης Ενέργειας:***

Υπάρχουν διάφορες δημοσιεύσεις που παρέχουν κατά προσέγγιση εκτιμήσεις της κατανάλωσης ενέργειας σε διάφορους τύπους των δικτύων πρόσβασης. Στο [8] παρουσιάζεται ένα βασικό μοντέλο κατανάλωση ενέργειας για γενικά δίκτυα πρόσβασης. Χρησιμοποιείται το μοντέλο για σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας σε σημείο-προς-σημείο οπτικές συνδέσεις, PON, FTTN (Fiber To The Node), και WiMAX.

Η αποτελεσματικότητα ενός δικτύου πρόσβασης μπορεί να ορίζεται ως η ενέργεια που καταναλώνεται ανά bit, για μεταφορά των δεδομένων [8]. Σε δίκτυα πρόσβασης βασικής ίνας, η ενέργεια ανά bit πέφτει καθώς ο μέσος όρος του ρυθμού των δεδομένων αυξάνεται. Τα δεδομένα για κατανάλωση ενέργειας ανά χρήστη δείχνουν ότι, για ρυθμούς πρόσβασης κάτω από 300 Mbps, το PON είναι το πιο ενεργειακά αποδοτικό δίκτυο πρόσβασης. Δίκτυα πρόσβασης με τεχνολογίες FTTN και VDSL (όπου ο ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη περιορίζεται στα 100 Mbps) καταναλώνουν δύο έως τρεις φορές περισσότερη ενέργεια από ότι το PON, λόγω της παρουσίας των ενεργών απομακρυσμένων κόμβων στην εγκατάσταση. Το WiMAX έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα σε όλες αυτές τις τεχνολογίες πρόσβασης με ρυθμό πρόσβασης πάνω από 1 Mbps, και ημερήσιο ρυθμό που περιορίζεται σε περίπου 20 Mbps ανά χρήστη. Για ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων άνω των 300 Mbps, το σημείο-προς-σημείο (point to point), δίκτυο πρόσβασης ίνας γίνεται όλο και πιο ενεργειακά αποδοτικό σε σύγκριση με το PON καθώς το κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας σε PON δεν παρέχεται πλέον. Ως εκ τούτου, συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα PON και point to point οπτικά δίκτυα είναι τα πιο εναλλακτικά ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα πρόσβασης.

### **1.5 Κέντρα δεδομένων (Data Centers)**

Σήμερα τα κέντρα δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη μεγάλου όγκου δεδομένων σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών. Το τεράστιο πλήθος των δεδομένων που διαχειρίζονται αυτές οι εφαρμογές έχουν θέσει ζητήματα κλιμάκωσης για τις υποδομές στα κέντρα δεδομένων και οι οπτικές τεχνολογίες αποτελούν βασικό παράγοντα στα κέντρα δεδομένων για την υποστήριξη όλης αυτής της κίνησης.

Συγκεκριμένα, τα οπτικά δίκτυα παίζουν σημαντικό ρόλο και στα δύο κέντρα δεδομένων : διασυνδέσεων (inter-connections) και ενδοσυνδέσεων (intra-connections). Σε επίπεδο inter-connection κίνησης και παράδοσης η διαρκώς αυξανόμενη ποσότητα κίνησης υποστηρίζεται από τα κέντρα δεδομένων αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας ευέλικτα οπτικά δίκτυα. Σημειώνεται ότι η ευελιξία του σχεδίου διασύνδεσης του δικτύου μεταφοράς κορμού, θα είναι ένα σημαντικό μέσο

για μεταφορά φόρτου δεδομένων μεταξύ διάφορων θέσεων, στα περισσότερα από τα άρθρα που εξετάζονται σε αυτή την ενότητα [9], [10].

Σε επίπεδο intra-connection (connecting boards, chips και memories των διακομιστών δεδομένων μέσα στο κέντρο δεδομένων), η οπτική τεχνολογία μπορεί επίσης να διαδραματίσει βασικό ρόλο για την κλιμάκωση του κέντρου δεδομένων. Η οπτική που θα μπορούσε να λύσει πολλά φυσικά προβλήματα των intra-connections, συμπεριλαμβάνει την ακρίβεια διανομής ρολογιού, τον συγχρονισμό του συστήματος (επιτρέποντας μεγαλύτερες σύγχρονες ζώνες, τόσο on-chip και μεταξύ των τσιπ), το εύρος ζώνης και την πυκνότητα των μεγάλων διασυνδέσεων, καθώς και την μείωση της απώλειας ισχύος. Η οπτική μπορεί να απαλείψει ένα ευρύ φάσμα των προβλημάτων σχεδιασμού, όπως το crosstalk, την απομόνωση τάσης, την ανάκλαση κύματος, το ταίριασμα impedance, και την καρφίτσα επαγωγή. Μπορεί να επιτρέψει συνεχή κλιμάκωση των υφιστάμενων αρχιτεκτονικών και ενεργοποίηση σε νέες υψηλά συνδεδεμένες ή υψηλού εύρους ζώνης αρχιτεκτονικές [11].

Διακομιστές και σχετικός εξοπλισμός καταναλώνουν ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Αρκετές πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας στα κέντρα δεδομένων. Ως παράδειγμα, η συνολική ισχύς που χρησιμοποιείται από διακομιστές σε κέντρα δεδομένων αντιπροσωπεύει περίπου το 0,6% της συνολικής κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ το 2005. Όταν ψύξη και βοηθητική υποδομή περιλαμβάνονται, αυτός ο αριθμός αυξάνεται σε 1,2%, η οποία είναι μία ποσότητα ανάλογη με εκείνη για τηλεοράσεις [12]. Ως εκ τούτου, αναπτύσσονται τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας για τα κέντρα δεδομένων.

**Εφαρμογές:** Ενώ η αποθήκευση, η μνήμη, ο επεξεργαστής και το εύρος ζώνης επικοινωνίας τείνουν να γίνουν σχετικά άφθονα και φθηνά με την πάροδο του χρόνου, η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μια αυξανόμενη δαπάνη για τη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων [13]. Σε επίπεδο εφαρμογών των υπολογιστών και γενικότερα, των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, θέτοντας συσκευές που είναι σε αδράνεια σε κατάσταση ύπνου, το γεγονός αυτό φαίνεται να είναι ο πιο εύλογος τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί καλά η διατήρηση ενέργειας. Ωστόσο, για την εφαρμογή αλγορίθμων για “ύπνο”, αρκετές πτυχές πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα: (i) το λογισμικό θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να θέτει το υλικό του εξοπλισμού του δικτύου σε κατάσταση ύπνου, (ii) πρωτόκολλα δρομολόγησης Internet, όπως το TCP/IP, πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να προσαρμοστούν σε ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό, και (iii) το υλικό του εξοπλισμού του δικτύου πρέπει να αναδιαμορφωθεί ώστε να δέχεται σήματα ελέγχου από το

λογισμικό [14]. Διάφορες προσεγγίσεις έχουν αναγνωριστεί ότι ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις και στοχεύουν στη διατήρηση της ενέργειας στο πεδίο εφαρμογής. Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να προσδιορίσουμε τρεις βασικές προτάσεις: "Proxying", Πράσινο πρωτόκολλο TCP / IP και Πράσινη υπολογιστική πλέγματος.

## **2. Διαχείριση ενέργειας στα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs)**

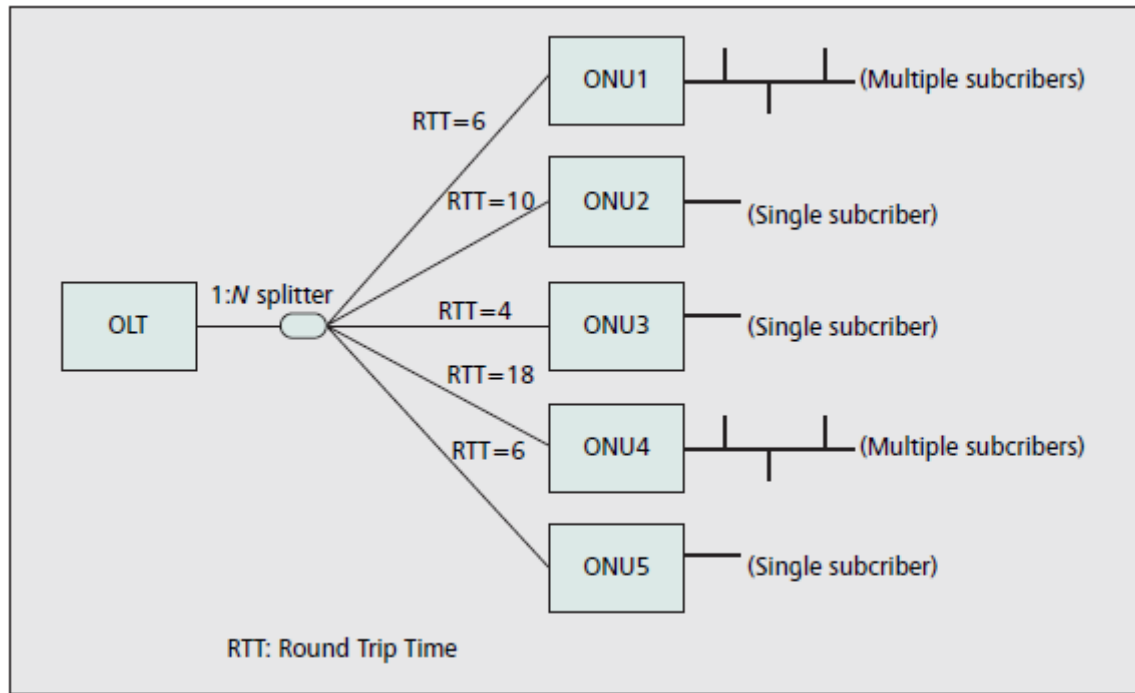
### **2.1 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs)**

#### **2.1.1 Εισαγωγή**

Τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PONs) θεωρούνται ελκυστικά λόγω της μακροζωίας τους, του χαμηλού λειτουργικού τους κόστους και του τεράστιου εύρους ζώνης τους. Στην πράξη τα PONs έχουν ήδη ευρέως αναπτυχθεί στο πρώτο/τελευταίο μίλι των τωρινών λειτουργούντων δικτύων πρόσβασης [15]. Τα PONs εμφανίζονται με μια σειρά από παραλλαγές. Τα αποκαλούμενα Asynchronous Transfer Mode (ATM) PON (APON) και Broadband PON (BPON) είναι βασισμένα στα ATM συστήματα. Το Gigabit PON (GPON), ο διάδοχος του BPON είναι σε θέση να υποστηρίξει στην αρχική του σύνθεση κίνηση εκτός από ATM (π.χ. Τηλεφωνία και Ethernet), χρησιμοποιώντας κατατμήσεις με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (time division multiplexing - TDM) και παρόμοιες μορφές γενικής διαδικασίας πλαισίωσης (generic framing procedure - GFP). Τα Ethernet PONs (EPONs) που έχουν τυποποιηθεί από την ομάδα εργασίας 802.3ah Ethernet in the First Mile (EFM) της IEEE (<http://www.ieee802.org/3/efm>), έχουν προσελκύσει μεγάλο μέρος της προσοχής τόσο της βιομηχανίας όσο και του ακαδημαϊκού κόσμου. Τα EPONs στοχεύουν στη σύγκλιση του χαμηλού κόστους εξοπλισμού και της απλότητας του Ethernet, με το χαμηλό κόστος υποδομής των οπτικών ινών των PONs. Τα EPONs είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για να παρέχουν επαρκές εύρος ζώνης για νέες υπηρεσίες όπως η τηλεδιάσκεψη (videoconferencing), το κατανεμημένο (distributed) gaming, η IP τηλεφωνία καθώς και το video on demand [16].

#### **2.1.2 Αρχιτεκτονική PON**

Ένα PON έχει γενικά μια φυσική τοπολογία δένδρου, όπου ένα Οπτικό Τερματικό Γραμμής (Optical Line Terminal – OLT) το οποίο βρίσκεται στο Τηλεπικοινωνιακό Κέντρο του παρόχου υπηρεσιών συνδέεται στο πεδίο με διάφορες Μονάδες Οπτικού Δικτύου (Optical Network Units – ONUs). Το OLT συνδέεται με τις ONUs με μια ίνα τροφοδοσίας που στη συνέχεια χωρίζεται με ένα 1:N οπτικό διαχωριστή/συνδυαστή (splitter/combiner), ώστε να επιτρέπεται στις ONUs να μοιράζονται την οπτική ίνα. Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1:** Αρχιτεκτονική δικτύου ενός PON με ένα Οπτικό Τερματικό Γραμμής (OLT) και  $N=5$  Μονάδες Οπτικού Δικτύου (ONUs), με διαφορετικό χρόνο μετάβασης και επιστροφής (Round Trip Time – RTT) για κάθε μία.

Η κατεύθυνση μετάδοσης από το OLT προς την ONU αναφέρεται ως downstream και λειτουργεί ως μέσο μετάδοσης. Η κατεύθυνση μετάδοσης από τις ONUs προς το OLT αναφέρεται ως upstream. Τα upstream σήματα διαδίδονται από την ONU στο OLT αλλά δεν ανακλώνται πίσω σε κάθε ONU. Επομένως το PON δεν είναι ένα μέσο μετάδοσης broadcast στην upstream κατεύθυνση. Το EPON είναι ένα μέσο μετάδοσης πολλαπλών σημείων προς σημείο (multipoint to point) [17], όπου οι ONUs δεν μπορούν να ανιχνεύσουν η μια τις μεταδόσεις της άλλης επειδή το upstream οπτικό σήμα δεν ανιχνεύεται από τις ONUs. Ωστόσο οι ONUs μοιράζονται την ίδια ίνα. Ως εκ τούτου οι μεταδόσεις τους μπορεί να συγκρούονται και για αυτό πρέπει να λαμβάνει χώρα ανάλυση των αιτιών αυτών των συγκρούσεων.

Για την αποφυγή συγκρούσεων στην upstream κατεύθυνση, η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (time division multiplexing – TDM) ή η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (wavelength division multiplexing – WDM) μπορούν να χρησιμοποιηθούν [18]. Η WDM παρέχει μια μεγάλη ποσότητα εύρους ζώνης για κάθε χρήστη, αλλά απαιτεί ότι η κάθε ONU χρησιμοποιεί ένα μοναδικό μήκος κύματος το οποίο συνεπάγεται προκλήσεις για τους παρόχους υπηρεσιών γιατί θα πρέπει να έχουν απόθεμα πολλών διαφορετικών τύπων ONU. Η TDM επιτρέπει σε όλες τις ONUs να μοιράζονται ένα μόνο μήκος κύματος και αυτό σημαίνει μείωση του αριθμού των πομποδεκτών στο OLT



κάνοντας χρήση ενός μόνο τύπου ONU. Η πρώτη γενιά των PONs χρησιμοποιεί μήκη κύματος για το διαχωρισμό των upstream και downstream καναλιών, αλλά χρησιμοποιεί την TDM διαμόρφωση για την αποφυγή συγκρούσεων στην upstream μετάδοση μεταξύ των ONUs. Λόγω της τοπολογίας του PON τα πρωτόκολλα MAC που στηρίζονται στην συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των κόμβων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ένα PON επιτρέπει τη συνδεσιμότητα από το OLT προς όλες τις ONUs στην downstream μετάδοση και από κάθε ONU προς το OLT στην upstream μετάδοση (δηλαδή μόνο το OLT έχει δυνατότητα σύνδεσης σε όλους τους κόμβους). Αυτό το μοντέλο σύνδεσης υπαγορεύει τη χρήση ενός κεντρικού MAC πρωτοκόλλου στο OLT. Αυτό οδηγεί σε ένα polling based MAC πρωτόκολλο όπου το OLT επικοινωνεί με τις ONUs και παρέχει σε αυτές πρόσβαση στο κοινόχρηστο μέσο του PON [19].

### **2.1.3 Δυναμική Ανάθεση Εύρους Ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation - DBA)**

Ως δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (DBA) γενικά ορίζεται η διαδικασία της παροχής στατιστικής πολυπλεξίας μεταξύ των ONUs. Για την κατανόηση της σημασίας της στατιστικής πολυπλεξίας σε PONs πρέπει να σημειωθεί ότι η κυκλοφορία των δεδομένων στις επιμέρους συνδέσεις του δικτύου πρόσβασης είναι κατά ριπάς. Αυτό, σε αντίθεση με τα μητροπολιτικά ή τα δίκτυα ευρείας περιοχής, όπου οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι σχετικά ομαλές λόγω της συνάθροισης πολλών πηγών κίνησης. Σε ένα δίκτυο πρόσβασης, κάθε σύνδεση αντιπροσωπεύει έναν ή μια μικρή ομάδα από συνδρομητές με μεγάλη κίνηση κατά ριπάς λόγω ενός μικρού αριθμού πηγών ριπών (π.χ. Web data και packetized video). Λόγω αυτής της κίνησης κατά ριπάς οι απαιτήσεις εύρους ζώνης ποικίλουν ευρέως σε σχέση με το χρόνο. Ως εκ τούτου η στατική κατανομή του εύρους ζώνης σε επιμέρους συνδρομητές (ή σε ομάδες συνδρομητών) είναι τυπικά αναποτελεσματική [20]. Η στατιστική πολυπλεξία που προσαρμόζεται στις στιγμιαίες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι συνήθως πιο αποτελεσματική. Η δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (DBA) που λειτουργεί στο OLT είναι υπεύθυνη για την παροχή στατιστικής πολυπλεξίας.

Το OLT απαιτεί την πληροφορία της στιγμιαίας απαίτησης εύρους ζώνης από κάθε ONU για να λάβει αποφάσεις πρόσβασης. Έχοντας αυτή την ακριβή πληροφόρηση δεν είναι δυνατές λόγω της μη μηδενικής διάδοσης, καθυστερήσεις στο PON τυπικά πάνω από 100 μsec, χρόνος ο οποίος είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το μέγιστο μέγεθος του Ethernet πλαισίου που είναι 12.3 μsec. Οι ONUs θα πρέπει να αναφέρουν τα στιγμιαία μεγέθη των ουρών τους σε ένα πλαίσιο ελέγχου και να το διαδώσουν μέσω του PON στο OLT [19].

#### 2.1.4 Multipoint Control Protocol (MPCP)

Για τη διευκόλυνση της ανακάλυψης και την καταγραφή των ONUs καθώς επίσης και για τον έλεγχο πρόσβασης του μέσου (medium access control), η ομάδα εργασίας 802.3ah της IEEE, σχεδίασε το πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλών σημείων MPCP. Το πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλών σημείων (MPCP) αποτελείται από πέντε μηνύματα. Τα μηνύματα REGISTER REQ, REGISTER και REGISTER ACK χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη και την καταγραφή των νέων ONUs. Τα μηνύματα REPORT και GATE χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση του κεντρικού ελέγχου πρόσβασης του μέσου. Το μήνυμα REPORT χρησιμοποιείται για να αναφέρει η ONU στο OLT τη στιγμιαία πληρότητα της ουράς της. Το μήνυμα αυτό μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις χωρητικότητες της ουράς σε ορισμένα επίπεδα κατωφλίου σε αντίθεση με το να έχει μόνο την πλήρη χωρητικότητα. Αυτή η αναφορά των ορίων της ουράς επιτρέπει στο OLT ευελιξία στον καθορισμό του μεγέθους του χορηγούμενου παραθύρου μετάδοσης. Το μήνυμα GATE χρησιμοποιείται από το OLT για τη χορήγηση μη επικαλυπτόμενων παραθύρων μετάδοσης στις ONUs.

Τα REPORT μηνύματα λαμβάνουν χώρα στην upstream μετάδοση για να αναφέρουν τις πληρότητες της ουράς και τα GATE μηνύματα στην downstream μετάδοση για τη χορήγηση των upstream παραθύρων μετάδοσης. Με τη λήψη της πληροφορίας της πληρότητας της ουράς μέσω των REPORT μηνυμάτων το OLT χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο DBA παίρνει αποφάσεις MAC για τον επόμενο κύκλο και κοινοποιεί τις αποφάσεις αυτές στις ONUs μέσω των GATE μηνυμάτων [19].

#### 2.1.5 Grant Sizing

Το Grant Sizing είναι το εύρος ζώνης που θα αποδοθεί σε κάθε ONU (δηλαδή για πόσο χρόνο αυτή θα μεταδώσει) και μπορεί να διαιρεθεί σε πέντε κύριες κατηγορίες:

- Fixed
- Gated
- Limited
- Limited with excess distribution
- Exhaustive using queue size prediction

Έστω ότι  $G_i$  είναι το grant size του τρέχοντα κύκλου για την ONU  $i$ ,  $R_i$  το μέγεθος της ουράς αναμονής που αναφέρθηκε από την ONU  $i$  στο πιο πρόσφατα ληφθέν REPORT μήνυμα,  $G_{i\_max}$  το όριο του μέγιστου grant size για την ONU  $i$ ,  $E_i$  το τμήμα του πλεονάζοντος εύρους ζώνης σε ένα κύκλο που έχει διατεθεί στην ONU  $i$  και  $P_i$  η προβλεπόμενη κίνηση στην ουρά ανάμεσα στο

χρόνο από τη μετάδοση του REPORT από την ONU στο OLT μέχρι το τέλος της μετάδοσης του χορηγούμενου παραθύρου εύρους ζώνης στην ONU  $i$  για τον επόμενο κύκλο.

Η γενική εξίσωση για το grant sizing θα ήταν:  $G_i = f(R_i, G_{i\_max}) + E_i + P_i$ . Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για αυτή τη γενική συνάρτηση  $f(.)$  και για τον καθορισμό των  $E_i$  και  $P_i$  [19].

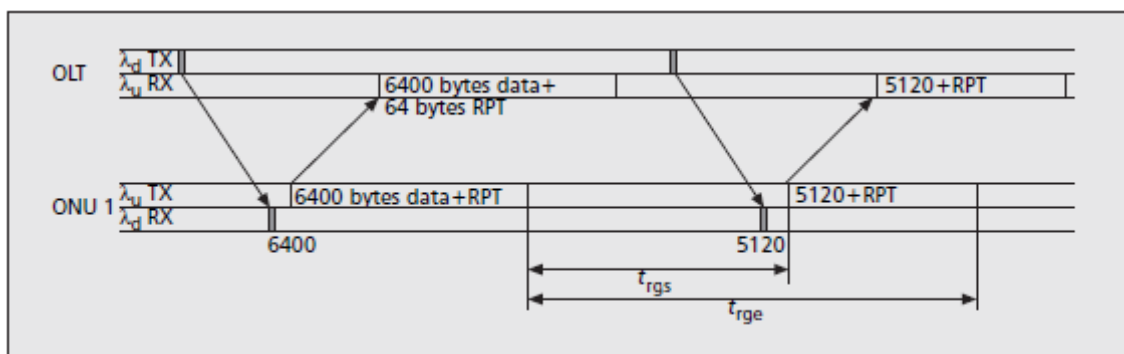
**Fixed** – Στην fixed grant sizing τεχνική, το grant size είναι σταθερό για μια ONU σε κάθε κύκλο. Η συνάρτηση για το  $G_i$  είναι απλά  $G_i = G_{i\_max}$ . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [17] έχουν δείξει ότι η fixed grant sizing έχει σημαντικά χαμηλότερη απόδοση από τις δυναμικές τεχνικές grant sizing που περιγράφονται παρακάτω. Μια ανάλυση στο [20] επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

**Gated** – Στην gated grant sizing τεχνική, το grant size για μια ONU είναι απλά το μέγεθος της ουράς που αναφέρθηκε από αυτή την ONU. Η συνάρτηση για το  $G_i$  είναι  $G_i = R_i$ . Το σύστημα αυτό παρέχει χαμηλή μέση καθυστέρηση, αλλά δεν παρέχει επαρκή έλεγχο για την εξασφάλιση της θεμιτής πρόσβασης μεταξύ ONUs. Αναλύσεις σε βάθος για αυτή την τεχνική αναφέρονται στα [21] και [22].

**Limited** – Στην limited grant sizing τεχνική [17], το grant size ρυθμίζεται στο μέγεθος της ουράς που αναφέρθηκε από την ONU, μέχρι το μέγιστο grant size για αυτή την ONU. Η συνάρτηση για το  $G_i$  είναι  $G_i = \min(R_i, G_{i\_max})$ . Αυτό το grant sizing σχήμα εμποδίζει οποιαδήποτε ONU από το να μονοπωλεί την κοινή σύνδεση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [17] έχουν δείξει ότι δεν υπάρχει διαφορά στη μέση καθυστέρηση πακέτου ανάμεσα στο gated και στο limited grant sizing. Ωστόσο το limited grant sizing μπορεί να συμβάλει στην παροχή δίκαιης πρόσβασης μεταξύ ONUs με τον περιορισμό του μεγέθους του grant ως προς το  $G_{i\_max}$  και αποτρέποντας έτσι μια ONU να μονοπωλεί τη σύνδεση. Έστω ότι  $t_{cycle}$  είναι το μήκος ενός κύκλου grant και  $t_{guard}$  είναι ο χρόνος φύλαξης μεταξύ των grants. Κάτω από μεγάλο φόρτο κίνησης είναι,  $t_{cycle\_max} = \sum_i (G_{i\_max} + t_{guard})$ , δηλαδή η μέγιστη διάρκεια του κύκλου του grant ορίζεται από τα μέγιστα grant sizes. Ένας μεγάλος κύκλος μέγιστου grant έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες καθυστερήσεις, ενώ ένας σύντομος κύκλος μέγιστου grant μειώνει τη χρησιμοποίηση καναλιών λόγω της αύξησης των χρόνων φύλαξης [23].

**Limited with Excess Distribution** – Η Limited with Excess Distribution τεχνική [24], αυξάνει την περιορισμένη παραχώρηση grant του συστήματος για τη βελτίωση της στατιστικής πολυπλεξίας ενώ εξακολουθεί να αποτρέπει τις ONUs από το να μονοπωλούν τον σύνδεσμο. Σε γενικές γραμμές οι ONUs κατανέμονται σε δύο ομάδες: ONUs με λιγότερο φόρτο και ONUs με μεγάλο φόρτο. Οι ONUs με λιγότερο φόρτο είναι εκείνες των οποίων το αναφερόμενο μέγεθος ουράς είναι μικρότερο ή ίσο με το μέγιστο grant size, δηλαδή,  $R_i \leq G_{i\_max}$ . Οι ONUs με μεγάλο φόρτο είναι εκείνες των οποίων το αναφερόμενο μέγεθος ουράς είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο grant size τους, δηλαδή,  $R_i > G_{i\_max}$ . Στα συστήματα excess distribution οι ONUs με μεγάλο φόρτο μοιράζονται το αχρησιμοποίητο ή το επιπλέον εύρος ζώνης που έχει απομείνει από τις ONUs με λιγότερο φόρτο. Το grant για μια ONU με μεγάλο φόρτο γίνεται  $G_i = G_{i\_max} + E_i$ .

**Exhaustive Service System Using Queue Size Prediction** – Η τεχνική αυτή ασχολείται με την εκτίμηση της κίνησης που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της περιόδου μεταξύ της αποστολής του μηνύματος REPORT από την ONU και την έναρξη του προκαθορισμένου παραθύρου μετάδοσης. Έστω ότι το  $t_{rgs}$  υποδηλώνει αυτό το χρονικό διάστημα μεταξύ της αποστολής του REPORT από την ONU και της αρχής του επόμενου grant για την εν λόγω ONU. Ένα σύστημα παροχής υπηρεσιών που φιλοξενεί την κίνηση που περιλαμβάνεται στο  $t_{rgs}$  αναφέρεται ως μερικώς προκαθορισμένο σύστημα παροχής υπηρεσιών [25]. Εναλλακτικά, επιπροσθέτως η κίνηση που παράγεται κατά τη διάρκεια του χορηγούμενου παραθύρου μετάδοσης θα μπορούσε να προβλεφθεί. Έστω ότι το  $t_{rge}$  δηλώνει το χρονικό διάστημα μεταξύ της αποστολής του REPORT από την ONU και του τέλους του επόμενου grant σε αυτή την ONU. Αυτό οδηγεί σε ένα πλήρες σύστημα παροχής υπηρεσιών [25]. Το Σχήμα 2.2 απεικονίζει αυτές τις χρονικές περιόδους.



*Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των χρονικών περιόδων της ουράς αναμονής.*



αποτέλεσμα ένας μικρός χρόνος ενός τουλάχιστον  $RTT$  υφίσταται μεταξύ των κύκλων  $grant$  ( $t_{walk}$ ) [19].

Η εφαρμογή της limited with excess distribution τεχνικής  $grant$  sizing απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ως προς το  $grant$  scheduling. Για τη συσσώρευση και τη διανομή του συνόλου του πλεονάζοντος εύρους ζώνης, το OLT πρέπει να περιμένει να λάβει τα REPORT μηνύματα από όλες τις ONUs πριν τη χορήγηση των grants για τον επόμενο κύκλο. Αυτό σημαίνει ότι ένας μικρός χρόνος,  $t_{walk}$ , σπαταλιέται μεταξύ των κύκλων [19].

## **B. ONU Queue Scheduling (Intra ONU Scheduling)**

Ο Intra ONU προγραμματισμός αναφέρεται στον προγραμματισμό των πολλαπλών ουρών των πλαισίων Ethernet σε μια ONU, για τη μετάδοση εντός του χορηγηθέντος παραθύρου μετάδοσης της ONU. Εάν ο αριθμός των ουρών σε μια ONU είναι σχετικά μικρός, ο Intra ONU προγραμματισμός μπορεί να εκτελεστεί στο OLT. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των ουρών αυξάνεται ο προγραμματισμός γίνεται συνήθως ιεραρχικά [26] στο OLT, με τον Inter ONU προγραμματισμό στην κορυφή (ρίζα) της ιεραρχίας στο OLT και ένα επίπεδο από κλάδους. Σε αυτή την περίπτωση η ONU περιλαμβάνει τον κλάδο (ο Intra ONU προγραμματισμός γίνεται στην ONU). Η χαμηλή πολυπλοκότητα αποτελεί βασικό στόχο του σχεδιασμού για τον Intra ONU προγραμματισμό έτσι ώστε το κόστος των ONUs να διατηρείται στο ελάχιστο.

Υπάρχουν συνήθως δυο κατηγορίες προγραμματισμού που παρέχουν πολλαπλές ουρές διαφορετικής προτεραιότητας:

- Ο προγραμματισμός αυστηρής προτεραιότητας (strict priority – SP) ο οποίος μπορεί να είναι αθέμιτος
- Ο προγραμματισμός σταθμισμένης δίκαιης ουράς (weighted fair queuing –WFQ)

Ο SP προγραμματισμός προκαλεί αθέμιτες πρακτικές όταν περιορίζει την κίνηση χαμηλής προτεραιότητας λόγω ακριβώς της αυστηρής προτεραιότητας που δίνει χωρίς περιορισμούς. Ο ιδανικός προγραμματισμός θα πρέπει να επιτρέπει την στατιστική πολυπλεξία αλλά να εγγυάται ένα ελάχιστο τμήμα του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε κάθε ουρά προτεραιότητας (δηλαδή την από κοινού χρήση της σύνδεσης).

Ο WFQ προγραμματισμός [29] είναι μια προσέγγιση πακέτου της γενικευμένης κοινής χρήσης επεξεργαστή (generalized processor sharing – GPS), με την οποία η απόκλιση από την ιδανική περίπτωση περιορίζεται από το μέγιστο μέγεθος του πακέτου. Ο WFQ υπολογίζει το χρόνο έναρξης του πακέτου σύμφωνα με το ιδανικό σύστημα GPS και με βάση αυτή την ώρα έναρξης

υπολογίζει το χρόνο τερματισμού κάτω από ιδανικό GPS. Στη συνέχεια τα πακέτα μεταδίδονται με τη σειρά με βάση τον υπολογιζόμενο χρόνο τερματισμού. Οι υπολογισμοί των ιδανικών χρόνων GPS μπορεί να είναι υπολογιστικά εντατικοί (πολύπλοκοι) για τις ONUs. Μερικά σχήματα έχουν προτείνει την απλοποίηση αυτών των υπολογισμών σε βάρος της ακρίβειας της προσέγγισης με το ιδανικό GPS [19].

### 2.1.7 WDM Dynamic Bandwidth Allocation

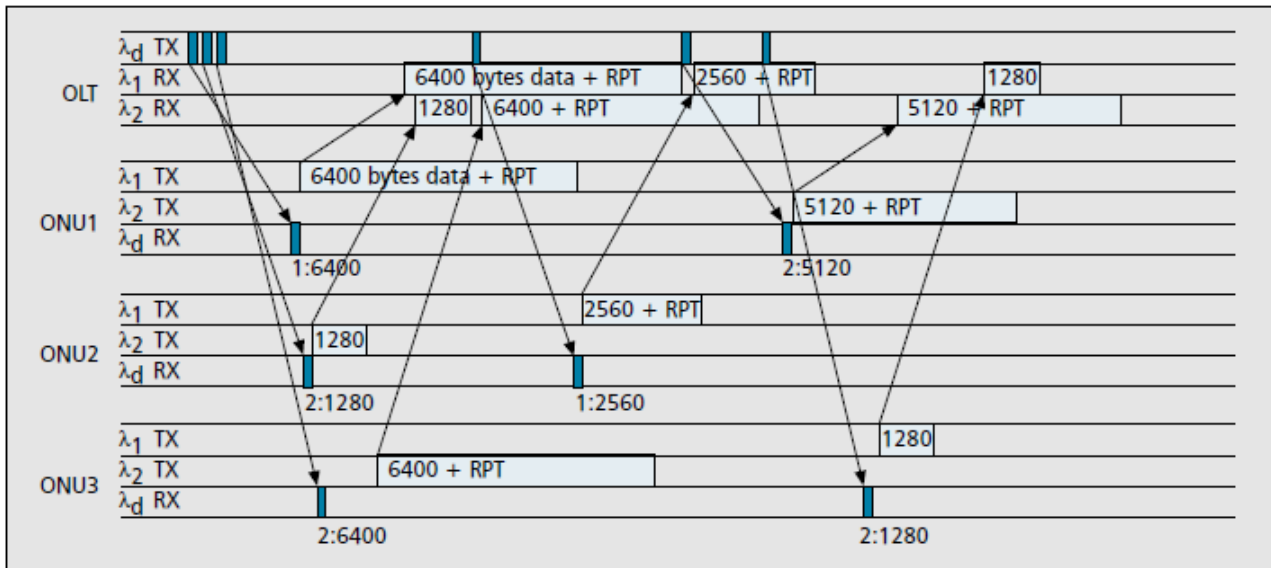
Ενώ στα συμβατικά TDM EPONs μονού καναλιού το πρόβλημα του DBA περιορίζεται για το συντονισμό των upstream μεταδόσεων στο ενιαίο κανάλι μήκους κύματος, στα WDM EPONs το πρόβλημα του DBA επεκτείνεται για το συντονισμό των upstream μεταδόσεων στα διαφορετικά μήκη κύματος που υποστηρίζονται από τις ONUs.

Με άλλα λόγια στα WDM EPONs απαιτούνται όχι μόνο αποφάσεις σχετικά με το πότε και για πόσο χρονικό διάστημα θα μεταδώσει η ONU στην upstream μετάδοση αλλά και σε ποιο κανάλι upstream μήκους κύματος θα γίνει η μετάδοση. Παρακάτω περιγράφονται και συγκρίνονται δυο γενικά πρότυπα για τη δυναμική κατανομή των grants στις upstream μεταδόσεις για διαφορετικά upstream μήκη κύματος σε ένα WDM EPON : ο **online** και ο **offline** προγραμματισμός (scheduling) [16].

**Online Scheduling** – Σε ένα online scheduler μια δεδομένη ONU προγραμματίζεται για upstream μετάδοση αμέσως μόλις το OLT λαμβάνει το REPORT μήνυμα από την ONU. Με άλλα λόγια το OLT παίρνει αποφάσεις προγραμματισμού βασισμένες σε ατομικά αιτήματα και χωρίς την γενική γνώση των τρεχουσών απαιτήσεων εύρους ζώνης των άλλων ONUs. Μια βασική online scheduling πολιτική για το WDM EPON είναι να προγραμματιστεί η upstream μετάδοση για μια ONU στο κανάλι μήκους κύματος που είναι νωρίτερα διαθέσιμο μεταξύ των καναλιών που υποστηρίζονται από την ONU, η οποία αποκαλείται πολιτική του επόμενου διαθέσιμου υποστηριζόμενου καναλιού (next available supported channel – NASC). Η ποσότητα του εύρους ζώνης (δηλαδή το μήκος της χορηγηθείσας μετάδοσης) που χορηγείται σε μια ONU μπορεί να καθοριστεί σύμφωνα με οποιονδήποτε από τους υπάρχοντες DBA μηχανισμούς για το EPON μονού καναλιού [30].

Το Σχήμα 2.4 απεικονίζει τον online προγραμματισμό για ένα EPON με τρεις ONUs. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα 2560 bytes upstream μετάδοσης από την ONU 2 έχουν προγραμματισθεί για το νωρίτερα υποστηριζόμενο διαθέσιμο μήκος κύματος, μήκος κύματος 1, και προγραμματίστηκε η

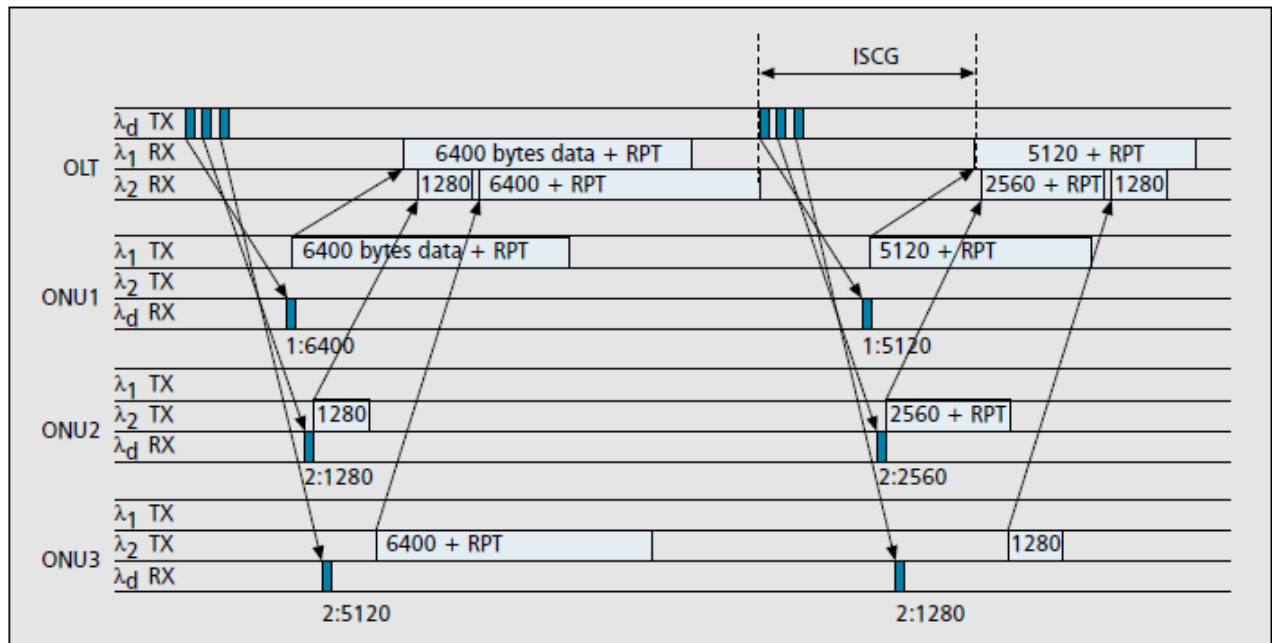
μετάδοση τους από το OLT, έτσι ώστε να διαχωρίζεται από την προηγούμενη μετάδοση στο μήκος κύματος 1 της ONU 1 με ένα διάστημα φύλαξης [16].



**Σχήμα 2.4:** Απεικόνιση του online scheduling με την πολιτική NASC. Η απεικόνιση περιλαμβάνει ένα downstream μήκος κύματος  $\lambda_d$  και δύο upstream μήκη κύματος  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$ , που υποστηρίζονται και από τις τρεις ONUs. Κάθε ONU αναφέρει τη χωρητικότητα της ουράς της στο REPORT μήνυμα το οποίο επισυνάπτεται στην τρέχουσα upstream μετάδοση. Μετά την παραλαβή του REPORT μηνύματος το OLT προγραμματίζει άμεσα την επόμενη upstream μετάδοση για την αντίστοιχη ONU και στέλνει ένα GATE μήνυμα (που απεικονίζεται πιο έντονα) υποδεικνύοντας το μήκος κύματος και το μήκος (σε bytes στην απεικόνιση) της χορηγηθείσας μετάδοσης στην ONU [16].

**Offline Scheduling** – Σε ένα offline scheduler οι ONUs προγραμματίζονται για μετάδοση αφού το OLT έχει λάβει τα τρέχοντα MPCP REPORT μηνύματα από όλες τις ONUs, επιτρέποντας στο OLT να λάβει υπόψη στον προγραμματισμό τις τρέχουσες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης από όλες τις ONUs. Δεδομένου ότι οι αποφάσεις προγραμματισμού παίρνονται ταυτόχρονα για όλες τις ONUs, όλα τα REPORTs, τα οποία συνήθως προσαρτώνται στο τέλος της ροής των δεδομένων του καθορισμένου παραθύρου μετάδοσης από τον προηγούμενο κύκλο θα πρέπει να έχουν ληφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.





**Σχήμα 2.5:** Απεικόνιση του offline scheduler, το οποίο εισάγει το ISCG μεταξύ των διαδοχικών κύκλων.

Αυτό απαιτεί ότι ο αλγόριθμος προγραμματισμού να εκτελείται μετά το τέλος της λήψης από το OLT του καθορισμένου παραθύρου μετάδοσης της τελευταίας από τις ONUs. Εξαιτίας αυτού εισάγεται ένα κενό μεταξύ των κύκλων προγραμματισμού το οποίο αναφέρεται ως inter scheduling cycle gap (ISCG). Το μήκος του ISCG σε ένα κανάλι μήκους κύματος είναι ίσο με:

- Τον χρόνο υπολογισμού του προγράμματος
- Τον χρόνο μετάδοσης του grant (64 bytes)
- Τον χρόνο RTT στην πρώτη ONU που έχει προγραμματισθεί για το μήκος κύματος στον επόμενο γύρο

Ο offline προγραμματισμός των WDM EPONs μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την κλασική θεωρία προγραμματισμού [31]. Συγκεκριμένα οι ONUs μπορούν να θεωρηθούν ως εργασίες, οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης των ONUs ως οι χρόνοι επεξεργασίας των εργασιών και τα upstream κανάλια μήκους κύματος ως μηχανές. Από τη μεγάλη ποικιλία των αλγορίθμων προγραμματισμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το WDM EPON, ο least flexible job (LFJ) θεωρείται ως πρώτη πολιτική για την σύγκριση της προσομοίωσης των παραδειγμάτων των online και offline προγραμματισμού. Ο LFJ ως πρώτη πολιτική είναι ο βέλτιστος, με την έννοια ότι ελαχιστοποιεί τη διάρκεια του προγράμματος όταν:

- Τα μήκη κύματος που υποστηρίζονται από τις λιγότερο ευέλικτες ONUs αποτελούν υποσύνολο των καναλιών μήκους κύματος που υποστηρίζονται από τις περισσότερο ευέλικτες ONUs.
- Προγραμματίζονται μονάδες με ίσα μεγέθη εύρους ζώνης.

Ο LFJ ως πρώτη πολιτική προγραμματίζει πρώτα προγραμματίζει μεταδόσεις από τις ONUs που υποστηρίζουν τα λιγότερα κανάλια μήκους κύματος (δηλαδή τις λιγότερο ευέλικτες ONUs) στον ταχύτερα διαθέσιμο χρόνο για τα υποστηριζόμενα κανάλια [16].

## 2.2 Τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας στα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks)

### 2.2.1 PON και κατανάλωση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας του εξοπλισμού των PONs εξαρτάται κυρίως από τις ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξή τους. Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει την αποτίμηση διαφόρων στοιχείων ενός δέκτη ONU για την κατανάλωση ενέργειας τους [32].

Front-End Component	GEPON		GPON		10GEPON		10GPON	
	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range
APD	2.6	2-3.75	2.6	2-3.75	2.6	2-3.75	2.05	0.5-3.75
TIA	83.4	56-112	83.4	56-112	123	105-160	123	105-160
LA	121	89-140	126	100-165	145	110-165	154	125-180
CDR	545	540-580	520	260-790	356		356	
SERDES	550	530-660	560	530-660	NA		NA	
<b>Total Front-End</b>	1302		1292		NA		NA	

*Πίνακας 2.1: Κατανάλωση ισχύος (mW) από διακριτά στοιχεία σε front-end ONU δέκτη.*

Ωστόσο, η τάση στο χώρο της ηλεκτρονικής (καθώς και σήμερα στην οπτική) είναι η ενσωμάτωση πολλών στοιχείων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2, η ενσωμάτωση επιτρέπει σε στοιχεία τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Integration	GEPON	GPON	10GEPON	10GPON
	Power (mW)			
CDR	545	520	356	356
CDR+LA	410	410	350	NA
CDR+SERDES	910	790	NA	
CDR+LA+SERDES	610	610		

**Πίνακας 2.2:** Κατανάλωση ισχύος (mW) ολοκληρωμένων στοιχείων σε front-end ONU δέκτη.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν επιβεβαιώνουν τα στοιχεία που έχουν ήδη υποβληθεί στη βιβλιογραφία [33] για τη συνολική κατανάλωση της ONU. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3, μεταξύ 60% - 70% της κατανάλωσης ισχύος της ONU οφείλεται στον πομποδέκτη PON και στο back-end κύκλωμα [32].

Variables	GEPON		GPON		10GEPON		10GPON	
	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range
Transceiver	1350	1100-2500	1500	1040-2250	1600	1300-2300	1800	1800-1800
Back-End Circuit	2700		3150		5850		6750	
Whole ONU (Services)	6000 (Ethernet Data Port+IPTV)		7000 (Triple Play+Multicast Video)		13000 (prediction)		15000 (PoE on Gigabit Ethernet Port)	

**Πίνακας 2.3:** Κατανάλωση ισχύος (mW) πομποδέκτη και υπηρεσιών ONU σε διαφορετικά PON συστήματα.

### 2.2.2 Προσεγγίσεις για εξοικονόμηση ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα - PONs

Αυτή η ενότητα παρέχει μια ταξινόμηση των προσεγγίσεων που έχουν προταθεί μέχρι στιγμής και τονίζει τα χαρακτηριστικά τους:

#### 1) Φυσική Προσέγγιση

Οι προσεγγίσεις του φυσικού επιπέδου περιλαμβάνουν λύσεις με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των PONs, επικεντρωμένες στην αρχιτεκτονική του φυσικού επιπέδου του πρωτοκόλλου IEEE 802.3 (Physical Medium Dependent (PMD) sublayer, Physical Medium

Attachment (PMA) sublayer, physical coding sublayer (PCS)). Αυτές μπορούν περαιτέρω να διαιρεθούν σε: προσανατολισμένες προσεγγίσεις συσκευής και υπηρεσίας [32].

Οι προσανατολισμένες προσεγγίσεις συσκευής στοχεύουν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών, ενεργοποιώντας υπηρεσίες που παρέχονται από κάθε υπο-επίπεδο. Επιπλέον περιλαμβάνουν εξοπλισμό πομποδεκτών με προσαρμοσμένο ρυθμό συνδέσμου (δηλαδή, adaptive link rate (ALR), όπως χαλκό σε Ethernet [34], συσκευή βελτιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης [35], χρήση νέων μορφών διαμόρφωσης για μετάδοση δεδομένων που είναι πιο ενεργειακά αποδοτικοί [36], [37].

Οι προσανατολισμένες προσεγγίσεις υπηρεσίας στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης της υπηρεσίας που παρέχεται από ένα υπο-επίπεδο (π.χ., ανάκτηση του ρολογιού στο υπο-επίπεδο PMA) για την ενεργοποίηση λύσεων ανώτερου επιπέδου (π.χ., λειτουργία αναμονής/ύπνου) [38].

## **2) Προσέγγιση Data Link**

Οι προσεγγίσεις επιπέδου Data Link στοχεύουν στην αρχιτεκτονική του Data Link επιπέδου του πρωτοκόλλου IEEE 802.3 (επίπεδο MAC) και βασίζονται στην δυνατότητα μεταγωγής στοιχείων του δικτύου σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Μολονότι η διαθεσιμότητα της λειτουργίας χαμηλής ισχύος πρέπει να παρέχεται από το φυσικό επίπεδο, οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να ταξινομηθούν ως Data Link προσεγγίσεις, επειδή βασίζονται σε επεκτάσεις του πρωτοκόλλου MPCP (Multi Point Control Protocol) και σε τροποποίηση των DBA(Dynamic Bandwidth Allocation) αλγορίθμων. Οι προσεγγίσεις αυτές δεν απαιτούν τροποποιήσεις στο φυσικό επίπεδο, αλλά υποστήριξη λειτουργίας χαμηλής ισχύος στις συσκευές. Η ITU-T G.sup 45 [39] προτείνει τρεις τύπους προτύπων εξοικονόμησης ενέργειας: power shedding, dozing and sleeping.

## **3) Κοινή (Joint) προσέγγιση**

Οι Joint προσεγγίσεις είναι οι μόνες που συνδυάζουν προσεγγίσεις φυσικού και data link επιπέδου για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Σε γενικές γραμμές, οι προσεγγίσεις έχουν ταξινομηθεί ως κοινές (joint) όταν δεν μπορούν να εφαρμοστούν χωριστά. Περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, επεκτάσεις του πρωτοκόλλου MPCP για την ενεργοποίηση της λειτουργίας του “ύπνου” με τις προσεγγίσεις φυσικού επιπέδου για ελεγχόμενη τροφοδοσία των ONUs [40]. Άλλες μελέτες θεωρούν το συνδυασμό της λειτουργίας του “ύπνου” και του ρυθμού προσαρμογής συνδέσμου για τη βελτιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται, ενώ προσαρμόζονται στις πραγματικές ανάγκες της κίνησης [41]. Τέλος, μερικές μελέτες προτείνουν το

συνδυασμό των τροποποιημένων αρχιτεκτονικών ONU με δυναμική λειτουργία αναμονής/ύπνου για τη βελτίωση της ανάκτησης του ρολογιού μετά από “ξύπνημα” της μονάδας ONU [42]. Με τον τρόπο αυτό η υπερφόρτωση χρόνου ελαχιστοποιείται και επιτυγχάνεται αύξηση της ενεργειακή απόδοσης.

### 2.2.3 Θεμελιώδεις παράμετροι που επηρεάζουν την Εξοικονόμηση Ενέργειας σε EPONs

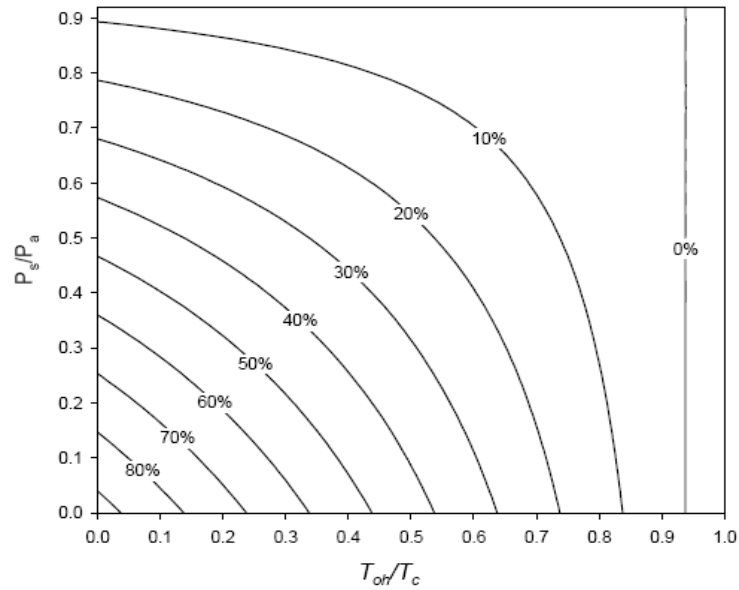
Τα EPONs με σταθερό downstream εύρος ζώνης, κατανομής (FBA) και δυναμική λειτουργία “ύπνου” σε ONU θεωρούνται ως ένα δείγμα υλοποίησης. Οι ONUs στρέφονται κατά τη διάρκεια της χρονοθυρίδας ανάθεσης και στη συνέχεια απενεργοποιούνται. Πρώτα από όλα, εξετάζονται: πόση ενέργεια σε λειτουργία αναμονής/ύπνου μπορεί να εξοικονομηθεί και ποιες είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τις επιδόσεις. Όπου  $P_a$  και  $P_s$  είναι η ισχύς που καταναλώνεται σε ONU σε ενεργή κατάσταση και κατάσταση αναμονής/ύπνου αντίστοιχα. Όπου  $T_{OH}$  υποδηλώνει το υπερκείμενο χρόνο για την ανάκτηση ρολογιού μετά την ενεργοποίηση της ONU στο δέκτη της. Όπου  $E$  και  $E'$  είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται από την ONU για να λάβει τα ίδια  $D$  bits δεδομένων, σε μη λειτουργία “ύπνου” και σε λειτουργία “ύπνου” αντίστοιχα.

$$E = T_c P_a \quad (1)$$

$$E' = (T_{SL} + T_{oh}) P_a + (T_c - T_{SL} - T_{oh}) P_s, \quad (2)$$

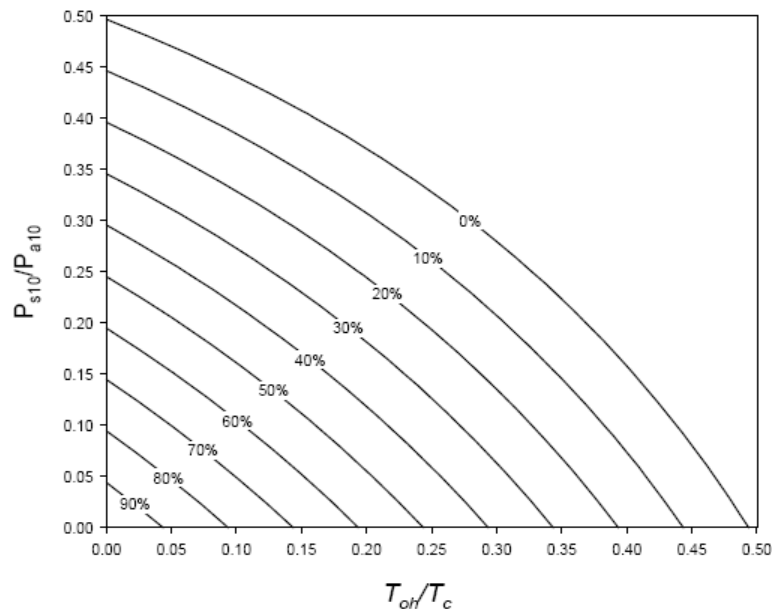
όπου  $T_{SL}$  είναι η χρονοθυρίδα (δηλαδή, ο χρόνος που αφιερώνεται σε κάθε ONU για μετάδοση/λήψη) και  $T_c$  είναι χρόνος κύκλου - χρονική περίοδος (Δηλαδή, ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργειών μετάδοσης/λήψης από την ίδια ONU).

Το ποσοστό της εξοικονόμησης της ενέργειας που λαμβάνεται ως συνάρτηση των αναλογιών  $T_{oh}/T_c$  και  $P_s/P_a$ , εάν  $N$ (πλήθος ONU)=16 και  $T_c=2ms$  απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6. Έχει αποδειχθεί ότι μειώνοντας τόσο την ισχύ που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία του “ύπνου” αλλά και τον υπερκείμενο χρόνο ( $T_{OH}$ ), μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμη και με την αξιοποίηση στοιχείων με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αν δεν είναι δυνατή η γρήγορη ανάκτηση ρολογιού, τότε δεν μπορεί να επιτευχθεί υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας. Το αντίστροφο ισχύει επίσης.



**Σχήμα 2.6:** Εξοικονόμηση ενέργειας ως συνάρτηση των  $T_{oh}/T_c$  and  $P_s/P_a$ .

Το Σχήμα 2.7 δείχνει τις εξοικονομήσεις ενέργειας σε μορφή καμπυλών ως συνάρτηση των αναλογιών  $T_{oh}/T_c$  και  $P_{s10}/P_{a10}$ . Εάν η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία “ύπνου”  $P_{s10}$  από την ONU, είναι μεγαλύτερη από το μισό της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της ενεργού λειτουργίας στο 1 Gb/s (δηλαδή,  $P_{s10} > P_{a1}$ ), η λειτουργία “ύπνου” δεν είναι ωφέλιμη σε σχέση με τον προσαρμοζόμενο ρυθμό συνδέσμου, ακόμη και αν ο υπερκείμενος χρόνος είναι μηδενικός [32].



**Σχήμα 2.7:** Εξοικονόμηση ενέργειας σε λειτουργία “ύπνου” σε σχέση με τον προσαρμοζόμενο ρυθμό συνδέσμου ως συνάρτηση των  $T_{oh}/T_c$  and  $P_{s10}/P_{a10}$ .

## 2.3. Ανάλυση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας στα WDM-PONs

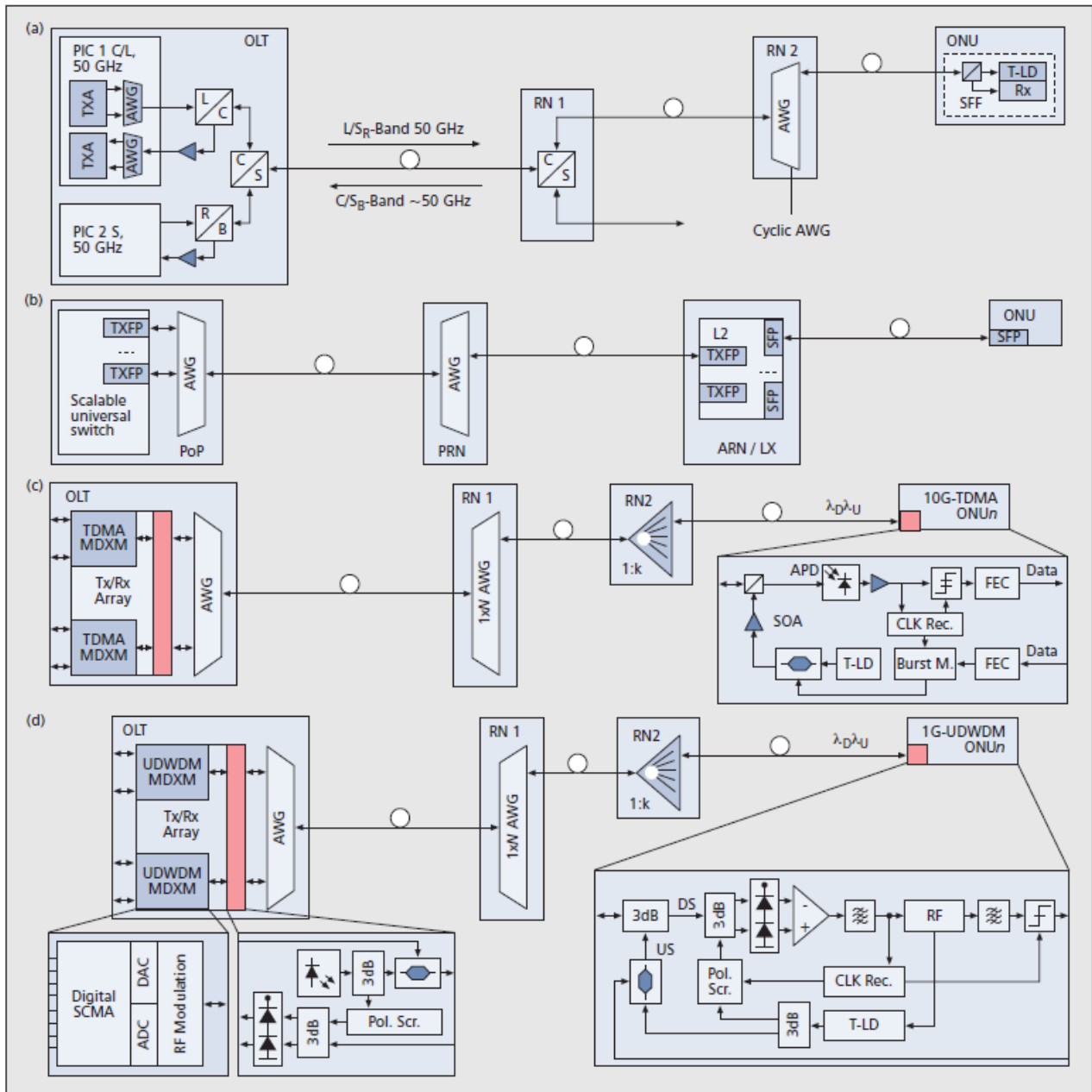
### 2.3.1 Κόστος και κατανάλωση ενέργειας των σύνθετων WDM-PONs

Για μια σύγκριση του κόστους και της ενεργειακής κατανάλωσης, οι αντίστοιχες συνεισφορές όλων των σημαντικών συνιστωσών πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μια σημαντική δυσκολία προκύπτει από το γεγονός ότι σήμερα δεν είναι όλες οι συνιστώσες εμπορικά διαθέσιμες. Εξαρτήματα από αυτές τις συνιστώσες δεν έχουν καν ωριμάσει τεχνικά ακόμη. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη πρόβλεψης τόσο του κόστους όσο και της κατανάλωσης ενέργειας που αυτά τα εξαρτήματα θα έχουν. Αυτή η πρόβλεψη έχει γίνει με βάση την πολυπλοκότητα (λειτουργικότητα), του προϋπολογισμού οπτικής ενέργειας και τις απαιτήσεις επεξεργασίας του εύρους ζώνης των αντίστοιχων συνιστωσών [43].

Όπου είναι δυνατόν θα θεωρείται η κοντινότερη από τις πιο εξελιγμένες συνιστώσες που είναι σήμερα διαθέσιμες και εκτιμάται ότι το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας τους μειώνεται κατά τα τελευταία χρόνια, με την προϋπόθεση μαζικής παραγωγής (παραδείγματα: tunable XFPs, grey SFPs). Σημειώστε επίσης ότι τα tunable XFPs θα παραχθούν σε σημαντικά μικρότερους αριθμούς από το χαμηλότερο κόστος των tunable πομποδεκτών (TRXs) της ONU. Η αντίστοιχη επίπτωση του κόστους έχει εξεταστεί. Η εκτίμηση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας έχει γίνει με την καλύτερη των γνώσεων, με εξίσου δύσκολες υποθέσεις για όλες τις συνιστώσες. Το προκύπτον κόστος και τα στοιχεία κατανάλωσης ενέργειας συζητήθηκαν με τους κατασκευαστές και τους πωλητές του συστήματος καθώς επίσης και τους φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου σε Full – service Access Network (FSAN) [43].

Ο Πίνακας 2.4 παρέχει μια επισκόπηση του κόστους και των στοιχείων κατανάλωσης ενέργειας των περισσότερο σημαντικών συνιστωσών για τα συστήματα που φαίνονται στο Σχήμα 2.8. Τα στοιχεία κόστους έχουν κανονικοποιηθεί στην κοινή βασική γραμμή από τα κόστη των λύσεων, τα οποία είναι τα κόστη για τα κοινά εξαρτήματα όπως τα πλαίσια και τους ελεγκτές διαχείρισης. Από τον Πίνακα 2.4 οι πλέον βασικές συνιστώσες μπορούν να προσδιοριστούν. Κατά πρώτο λόγο οι πομποδέκτες που απαιτούνται για την ανά πελάτη βάση, καθορίζουν το προκύπτον κόστος και επίσης μέρος της κατανάλωσης ενέργειας. Όσον αφορά το κόστος, η κοινή συμβολή από τα πλαίσια, τις μονάδες τροφοδοσίας, τους ελεγκτές διαχείρισης, τις διασυνδέσεις και ούτω καθεξής είναι σε δεύτερη θέση. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας αυτές οι κοινές συνιστώσες είναι ήδη ο κύριος συντελεστής. Επίλυση-ειδική εφαρμογή-ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (ASICs), διακόπτες και η ανά πόρτα συνεισφορά από τα φίλτρα (AWGs) και τους διαχωριστές/συνδιαστές

(combiners), έχουν μικρότερη σημασία. Τα αποτελέσματα για το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας των τεσσάρων λύσεων που συγκρίνονται στο Σχήμα 2.8, παρατίθενται στον Πίνακα 2.5. Έχουν χωριστεί σε συνεισφορές από την ONU, το OLT και τον απομακρυσμένο κόμβο. Τα αποτελέσματα είναι επίσης ορατά στο Σχήμα 2.9 [43].



**Σχήμα 2.8:** Σχηματικά διαγράμματα των ευρυζωνικών λύσεων της πρόσβασης επόμενης γενιάς:

α) ένα βασικής ζώνης C+L+S WDM-PON για 128-192 αμφίδρομα κανάλια – L/C, C/S και R/B είναι τα αντίστοιχα φίλτρα ζώνης με R, B τις κόκκινη και μπλε επιμέρους ζώνες στην S-ζώνη; RXA, TXA: πίνακες εκπομπής και λήψης, RN: απομακρυσμένος κόμβος, SFF: μικρών διαστάσεων



πομποδέκτης που περιλαμβάνει μια tunable δίοδο laser (T-LD); Σημειώστε ότι μόνο το WDM-PON στο 3a, βασίζεται σε ένα μόνο φίλτρο ODN-Optical Distribution Network;

b) ένα ενεργό/παθητικό WDM υβριδικό PON, όπου το ενδιάμεσο(backhaul) τμήμα βασίζεται σε ένα παθητικό WDM και η πρόσβαση στο τελευταίο μίλι(last-mile) βασίζεται σε ένα ενεργό (Ethernet) σημείο προς σημείο(point-to-point); TXFP, SFP: tunable σε κάποια έκταση και μικρών διαστάσεων, ARN και PRN: ενεργός και παθητικός RN;

c) ένα WDM/TDMA υβριδικό PON που λειτουργεί (συμμετρικά) στα 10 Gb/s με TDMA σε κάθε ζεύγος μήκους κύματος. MDXM: πολυπλέκτης/αποπολυπλέκτης (mux/demux), APD: φωτοδίοδος χινοοστιβάδας, SOA: ημιαγωγός οπτικού ενισχυτή, CLK Rec: ανάκτηση ρολογιού.

d) ένα συνεκτικό UDWDM-PON με τοποθετημένα σε σειρά φίλτρα και διαχωριστές/συνδιαστές (splitters/combiners) ισχύος, στο ODN. ADC και DAC: μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό και από ψηφιακό σε αναλογικό, US: upstream, DS: downstream, RF: radio frequency, Pol. Scr.: πόλωση scrambler [43].

Figure	Part	Component	Energy consumption	Cost
3a	OLT	40 × REAM/Rx array, plus MFL and circulator	20 W	2400
3a	ONU	1 Gb/s tunable TRX (PIN-PD, no TEC, no WL)	1.0 W	75
3b	OLT	40 λ 1G Laser/Rx array	20 W	2000
3b	RN	10 Gb/s tunable XFP (TEC, WL, 25 dB)	3.5 W	1200
3b	ONU	1 Gb/s grey SFP, 10 dB power budget	0.5 W	15
3c	OLT	30 GHz TRX (no TEC, no WL, 32 dB)	2.5 W	175
3c	ONU	10 Gb/s Burst-mode tunable TRX (ADP, SOA, FEC, no TEC, no WL, 35 dB)	2.5 W	175
3d	OLT	30 GHz TRX (coherent, TEC, WL, 16 channels, 1G/3 GHz)	8.0 W	1600
3d	ONU	1 Gb/s coherent (heterodyne) TRX (polarization diversity or scrambling)	2.0 W	175
3a–3c	ONU	ASIC 1 GHz (ONU)	1.0 W	10
3d	OLT	ASIC 50 GHz UDWDMA (OLT, 16 channels)	16 W	320
3a	OLT	EDFA booster/pre-amplifier combination (OLT)	25 W	2000
All		AWG port/power splitter/combiner port	—	20/10
All		OLT/PoP Layer-2 switch, per 1 Gb/s	1.0 W	5
All		Baseline cost per client (CPE housing, OLT shelf, etc.)	5.0 W	100

MFL: multi-frequency laser, PD: photo diode, WL: wavelength locker, ADP: avalanche PD, FEC: forward error correction, ASIC: application-specific integrated circuit, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, CPE: Customer-Premises Equipment.

**Πίνακας 2.4:** Παράμετροι κόστους και κατανάλωσης ενέργειας.

Από την ανάλυση μπορεί να γίνει σαφές ότι ένα καθαρό (pure) WDM-PON έχει τη χαμηλότερη ανά πελάτη (από άκρο σε άκρο) κατανάλωση ισχύος και σχεδόν το χαμηλότερο κόστος ανά πελάτη. Και πάλι το απλό WDM-PON αναφέρεται σε ένα σύστημα χωρίς καμία προσθήκη

περαιτέρω μηχανισμού πολλαπλής πρόσβασης ή συνεκτικής ανίχνευσης, χρησιμοποιώντας φίλτρα παρά διαχωριστές/συνδιαστές .

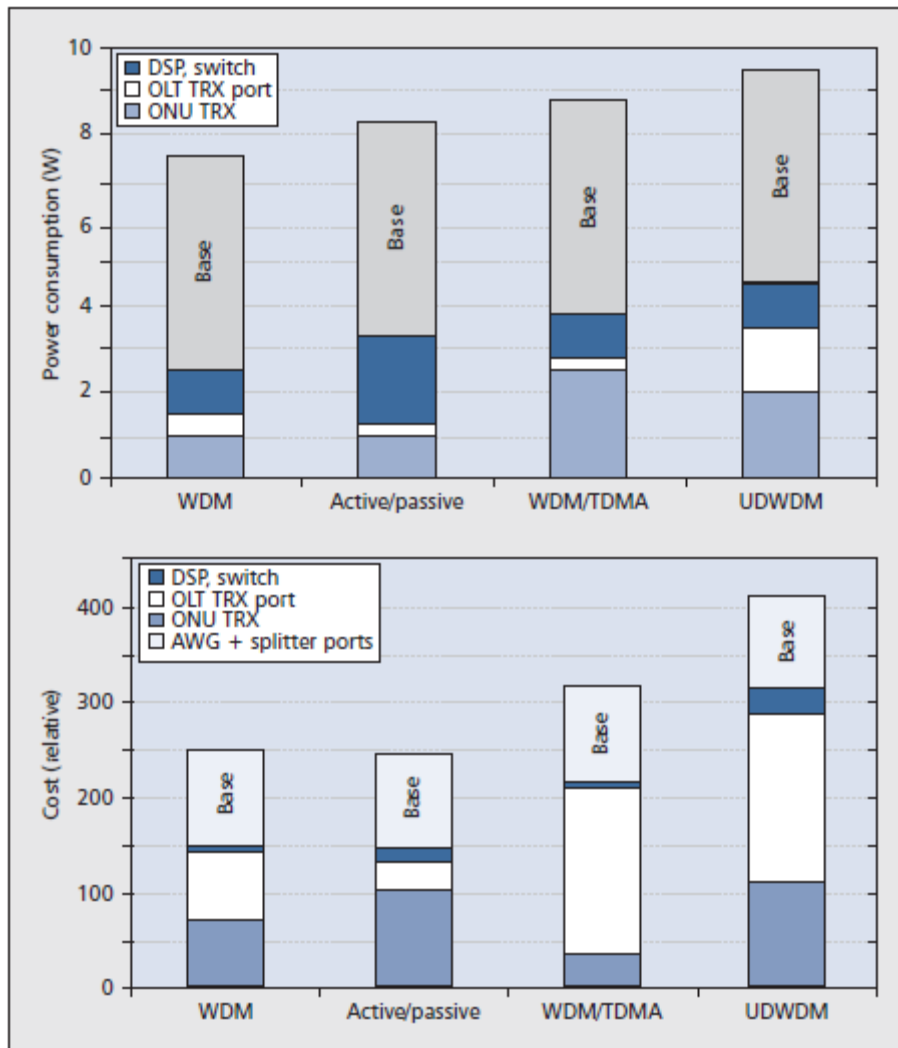
	Energy consumption			Cost			
Common baseline	5 W			100			
Solution individual contribution	ONU TRX	OLT TRX port incl. amplification	DSP, switching	AWG + splitter ports	OLT TRX port incl. amplification	ONU TRX	DSP, switching
WDM-PON	1.0 W	0.5 W	1.0 W	20	50	75	5
Active/passive hybrid	1.0 W	0.3 W	2.0 W	2	100	30	15
WDM/TDMA-PON	2.5 W	0.3 W	1.0 W	12	25	175	5
UDWDM-PON	2.0 W	1.5 W	1.0 W	12	100	175	25

**Πίνακας 2.5:** Αποτελέσματα αναλύσεων κόστους και κατανάλωσης ισχύος για πρόσβαση επόμενης γενιάς.

Η ανά πελάτη από άκρο σε άκρο σύνδεση περιλαμβάνει ολόκληρη την ONU, το αντίστοιχο τμήμα του απομακρυσμένου κόμβου (RN; σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας υπάρχει μόνο μια συμβολή για το ενεργό/παθητικό υβριδικό PON) και το αντίστοιχο τμήμα του OLT. Το τελευταίο περιλαμβάνει πομποδέκτες, οποιαδήποτε ηλεκτρονικά αναγκαία για τη διαμόρφωση καθώς επίσης και το αντίστοιχο τμήμα ενός aggregation switch. Αποδίδουμε τις επιδόσεις του WDM-PON στη δυνατότητα χρήσης απλών αποδοτικών πομποδεκτών (κατηγορίας 27 dB με φωτοδιόδους PIN, 1 Gb/s εύρος ζώνης, μονολιθικά ολοκληρωμένα lasers, όχι περίπλοκο στρώμα ελέγχου μέσου πρόσβασης [MAC] ή πολλαπλή πρόσβαση). Εναλλακτικά, τέτοιοι πομποδέκτες επιτρέπονται γιατί χρησιμοποιούνται φίλτρα αντί για διαχωριστές/συνδιαστές στο ODN [43].

Σύμφωνα με τους αριθμούς στον Πίνακα 2.5, το ενεργό/παθητικό υβριδικό σύστημα οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος (αν και η διαφορά σε σχέση με το WDM-PON είναι μικρή) και έχει επίσης την δεύτερη καλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Η ανά πελάτη κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε κατά 0,8 W. Σημειώστε ότι αυτή η διαφορά παράγεται κυρίως στις προστιθέμενες ενεργές θέσεις. Η σχετικά καλή απόδοση κόστους και κατανάλωσης ενέργειας αυτής της λύσης μπορεί να αποδοθεί κατά κύριο λόγο στη χρήση χαμηλότερου κόστους χαμηλής πολυπλοκότητας, πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, grey πομποδεκτών (SFPs) για τις ενεργές συνδέσεις πρόσβασης. Σήμερα τέτοιοι SFPs είναι διαθέσιμοι με την κατανάλωση ενέργειας να πέφτει στα 0,4 W και το κόστος να πέφτει στο φάσμα των 20 δολαρίων Αμερικής. Αυτοί οι αριθμοί δεν μπορούν να επιτευχθούν με οποιαδήποτε άλλη κατηγορία πομποδεκτών (10G με προστιθέμενη πολλαπλή πρόσβαση, υψηλό προϋπολογισμό ισχύος, κλπ.). Σημειώνεται ωστόσο ότι αυτή η λύση δεν θα

είναι αποδεκτή από κάθε φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου λόγω της αναγκαιότητας των ενεργών θέσεων [43].



**Σχήμα 2.9:** Ανά πελάτη (από άκρο σε άκρο) κατανάλωση ισχύος (επάνω) και σχετικό κόστος (κάτω) των τεσσάρων λύσεων που αναλύονται με βάση την κύρια συμβολή της κάθε μιας από αυτές.

Το υβριδικό WDM/TDMA-PON είναι υψηλότερο σε κόστος και κατανάλωση ενέργειας από τις δυο πρώτες λύσεις. Σε σύγκριση με το WDM-PON το κόστος είναι περίπου 27 τις εκατό υψηλότερο. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εύλογο ποσό αθροιζόμενο σε κόστος, με δεδομένο το γεγονός ότι η WDM/TDMA-PON μπορεί να υποστηρίξει ένα μεγαλύτερο αριθμό πελατών (clients) πάνω από ένα καθαρά παθητικό ODN. Η κατανάλωση ενέργειας ωστόσο αυξάνεται κατά 1,3 W/client. Αυτή η διαφορά εν μέρει δαπανάται στην ONU και είναι πιθανό να πρέπει να καταβληθεί από τους clients και όχι από το χειριστή του δικτύου ή τον πάροχο της υπηρεσίας. Πάνω σε μια παγκόσμια κλίμακα, σε υψηλό ποσοστό του να λάβει την αποδεκτή τεχνολογία, το

ερώτημα παραμένει αν μια τέτοια διαφορά είναι αποδεκτή στο πλαίσιο της “πράσινης” Πληροφορικής. Ένα πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι η υποστήριξη των υποδομών πρόσβασης GPON μαζί με το φίλτρο με βάση το backhaul. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι άλλα WDM υβριδικά συστήματα (με βάση το προστιθέμενο SCMA ή CDMA) από την οπτική γωνία του σήμερα, δεν φαίνεται να προσφέρουν πλεονεκτήματα έναντι των WDM/TDMA υβριδικών PON [43].

Η UDWDM-PON λύση οδηγεί σε υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερη δυνατή κατανάλωση. Το κόστος σε σχέση με το απλό DWDM-PON είναι 165 τις εκατό και η ανά πελάτη κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη από 2 W. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται στην αναγκαία προστιθέμενη πολυπλοκότητα της συνεκτικής ανίχνευσης, η οποία περιλαμβάνει αυστηρό έλεγχο μήκους κύματος, προστιθέμενη (ψηφιακή ή αναλογική) επεξεργασία σήματος, πολύ στενού εύρους γραμμής lasers, έλεγχο πόλωσης, ποικιλομορφία και κρυπτογράφηση καθώς επίσης και την ανάγκη για ισορροπημένους δέκτες με πολλαπλές φωτοδιόδους. Σαφώς η UDWDM-PON έχει πολύ υψηλή οπτική απόδοση και είναι σε θέση να υποστηρίξει δυνητικά πάνω από 1000 πελάτες με υποδομή ενός διαχωριστή ή χρησιμοποιώντας WDM φίλτρα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις πρόσβασης άνω των 100 Km. Εδώ, το πιο σημαντικό ερώτημα είναι κατά πόσον ή όχι αυτή η τεχνολογία υπερσχεδιάστηκε για την πλειονότητα των εφαρμογών ή των πελατών (οι οποίοι θα απαιτούν λιγότερη απόσταση απόδοσης από αυτή των 100 Km) [43].

Μέχρι στιγμής δεν έχουν εξεταστεί άλλα μέσα εκτός από PICs και λιγότερο TEC lasers για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε PONs βασισμένα σε WDM. Εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας γενικά σε οπτικο-ηλεκτρονικά εξαρτήματα, μείωση στα WDM-PON μπορεί να επιτευχθεί μέσω των καταστάσεων της ενδιάμεσης (doze) και της κυκλικής αναμονής, όπου και στις δύο οι πομποί απενεργοποιούνται όταν δεν χρησιμοποιούνται, ή οι πομποδέκτες απενεργοποιούνται περιοδικά. Τέτοιες λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας αναμένεται να είναι απλούστερες στην εφαρμογή και περισσότερο αποδοτικές στην εξοικονόμηση ενέργειας στα WDM-PONs, από εκείνες που είναι γνωστές από τα GPON, δεδομένου ότι κανένα κοινό επίπεδο MAC δεν απαιτείται να διατηρηθεί ενεργό [43].

### **2.3.2 Συμπέρασμα**

Έχει δειχθεί ότι ένα απλό WDM είναι πιο αποτελεσματικό για δίκτυα επόμενης γενιάς πρόσβασης (next-generation access), με ρυθμό έως 1 Gb/s (σταθερό) ανά πελάτη και αριθμό πελατών που δεν ξεπερνούν τους 128-192. Πρόσβαση σε αποστάσεις των 40-60 Km, μπορεί επίσης να

υποστηριχθεί. Αυτό μπορεί σαφώς να αποδοθεί στην έμφυτη απλότητα των πομποδεκτών και στο μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης που μπορεί ακόμη να χρησιμοποιείται για αυτούς τους αριθμούς. Άλλες λύσεις - όπως το υβριδικό WDM/TDMA, το UDWDM, ή τα active-plus-passive υβριδικά- υπάρχουν, αλλά είτε οδηγούν σε υψηλότερο κόστος και κατανάλωση ενέργειας, ή απαιτούν ενεργές θέσεις, που μπορεί να έρχονται σε αντίθεση με τα προγράμματα ενοποίησης θέσης ορισμένων φορέων εκμετάλλευσης του δικτύου.

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει κανείς είναι ότι είναι απαραίτητο να διευκρινιστούν προσεκτικά οι απαιτήσεις για την πρόσβαση επόμενης γενιάς, σε σχέση με τον αριθμό πελατών ανά PON και τη μέγιστη πρόσβαση. Το ερώτημα του κατά πόσον τα WDM φίλτρα επιτρέπονται στο ODN (αντί των διαχωριστών/συνδιαστών ισχύος) πρέπει επίσης να απαντηθεί και το ίδιο ισχύει για τον ενεργό εξοπλισμό στο δίκτυο πρόσβασης. Ειδικότερα αν ο αριθμός των πελατών(client) δε υπερβαίνει τους 128-192, και ένα παθητικό φίλτρο που βασίζεται στο ODN είναι αποδεκτό, η πιο αποτελεσματική λύση σε ότι αφορά τόσο το κόστος όσο και την κατανάλωση ενέργειας είναι το απλό WDM-PON. Αυτό το εύρος του αριθμού των πελατών μπορεί ακόμη να αυξηθεί στους 256-384 χρησιμοποιώντας διατάξεις εναλλαγής, ώστε να γίνεται αποτελεσματική χρήση ενός 25 GHz DWDM δικτύου [43].

### 3. Εξοικονόμηση ενέργειας στα 1G-EPON και 10G-EPON

#### 3.1 Gigabit Ethernet Passive Optical Networks (1G-EPON και 10G-EPON)

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Ως μια από τις σημαντικότερες fiber to the home/curb/cabinet/ και γενικά (FTTx) τεχνολογίες, το Ethernet Passive Optical Network (EPON) έχει αναπτυχθεί βασισμένο στην τεχνολογία Ethernet και καθιστά δυνατή την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των IP και Ethernet τεχνολογιών [44]. Λόγω των πλεονεκτημάτων της καλής επεκτασιμότητας, της απλότητας και της πολλαπλής εξυπηρέτησης, ως επίσης και της δυνατότητας παροχής ολοκληρωμένων υπηρεσιών πρόσβασης, το EPON έχει υιοθετηθεί ταχύτατα στην Ιαπωνία και έχει όλο και μεγαλύτερη εξάπλωση στην Κίνα, την Κορέα και την Ταϊβάν, από τότε που η IEEE επικύρωσε το EPON ως το IEEE 802.3ah πρότυπο τον Ιούνιο του 2004 [45].

Από την άλλη πλευρά εφαρμογές βασισμένες σε video και υπηρεσίες όπως η HDTV αυξάνονται και αναδύονται στο δίκτυο [46]. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή κίνηση φωνής και δεδομένων αυτές οι εφαρμογές multimedia απαιτούν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Για παράδειγμα ένα κανάλι HDTV απαιτεί εύρος ζώνης 10 Mb/s. Με κίνητρο την ικανοποίηση αυτών των αναδυόμενων υψηλών απαιτήσεων εύρους ζώνης, η IEEE 802.3av 10G-EPON ομάδα εργασίας επιφορτίστηκε με την αύξηση του εύρους ζώνης στην downstream μετάδοση σε 10 Gb/s και την υποστήριξη δύο ρυθμών δεδομένων στην upstream μετάδοση: 10Gb/s και 1Gb/s.

Ενώ ο ρυθμός της σύνδεσης αυξάνεται σημαντικά για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των συνδρομητών, η κατανάλωση ισχύος των 10G-EPON αυξάνεται και αυτή [47]. Η κατανάλωση ισχύος των 10G-EPON έχει γίνει ένα μεγάλο πρόβλημα για τους φορείς παροχής υπηρεσιών δικτύου καθώς συνεισφέρει σε ένα μέρος των λειτουργικών τους δαπανών (OPEX). Επιπλέον η κατανάλωση ενέργειας καθίσταται ένα περιβαλλοντολογικό και συνεπώς κοινωνικό και οικονομικό ζήτημα, γιατί μια μεγάλη αιτία για την αλλαγή του κλίματος είναι η καύση ορυκτών καυσίμων και η άμεση επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον της Γης. Εκτιμάται ότι το Διαδίκτυο σήμερα καταναλώνει περίπου το ένα τοις εκατό επί του συνόλου της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ευρυζωνικές χώρες. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι επί του παρόντος αλλά και στο μεσοπρόθεσμο μέλλον ότι τα δίκτυα πρόσβασης καταναλώνουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας στο Διαδίκτυο. Η ανάλυση στα άρθρα [8], [48] έδειξε ότι μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών πρόσβασης, όπως το WIMAX, fiber to the node (FTTN) και των point to point οπτικών δικτύων πρόσβασης, το PON είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική λύση σε ότι

αφορά την κατανάλωση ενέργειας ανά bit μετάδοσης στην πλησιέστερη προσέγγιση των οπτικών ινών στους χρήστες.

Αν και το PON καταναλώνει τη μικρότερη ενέργεια ανάμεσα σε όλες τις τεχνολογίες δικτύου πρόσβασης, είναι επιθυμητό να μειωθεί περαιτέρω η κατανάλωση ενέργειας του, ειδικά όταν ο ρυθμός σύνδεσης αυξάνεται σε 10 Gb/s. Με την αύξηση του ρυθμού της σύνδεσης η οπτική διασπορά αυξάνεται επίσης. Αντισταθμίζοντας την μεγαλύτερη διασπορά ασκούνται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε οπτικά λέιζερ, τα οποία μπορεί να επιβαρύνουν με αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας των λέιζερ. Επιπλέον το ηλεκτρονικό κύκλωμα θα πρέπει να τροφοδοτείται κατάλληλα έτσι ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται 10 φορές γρηγορότερα από ότι αυτό του 1G-EPON. Συνεπώς ένα 10G-EPON θα καταναλώσει περισσότερη ενέργεια από ένα 1G-EPON [49], [8].

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των 10G-EPON απαιτεί προσπάθειες ανάμεσα και στα δύο, το φυσικό και το medium access control (MAC), επίπεδα. Γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη οπτικών πομποδεκτών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εκτός αυτού συσκευές πολλαπλών καταστάσεων λειτουργίας, με την ικανότητα της απενεργοποίησης ορισμένων λειτουργιών μπορούν επίσης να συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Για να αποφευχθούν υποβαθμισμένες υπηρεσίες είναι σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός του ελέγχου του επιπέδου MAC και των συστημάτων προγραμματισμού ώστε να καλύπτουν τις ειδικές ανάγκες λειτουργίας [45].

### **3.1.2 Εξέλιξη από το 1G-EPON στο 10G-EPON**

Το 10G-EPON υποστηρίζει τόσο 10 Gb/s downstream και upstream (συμμετρικό), όσο και 10 Gb/s downstream και 1 Gb/s upstream (ασύμμετρο), ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ενώ το 1G-EPON υποστηρίζει μόνο 1 Gb/s συμμετρικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Δίνοντας έμφαση στο φυσικό επίπεδο η IEEE 802.3av ομάδα εργασίας ορίζει το reconciliation sublayer (RS), το συμμετρικό και ασύμμετρο physical coding sublayers (PCSs), το physical media attachments (PMAs) και το physical media dependent (PMD) sublayers. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται διάφορα βασικά χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου του 10G-EPON [50]. Αντί της χρησιμοποίησης της γραμμής κωδικοποίησης 8B/10B που θεσπίστηκε στο 1G-EPON, το 10G-EPON χρησιμοποιεί τη γραμμή κωδικοποίησης 64B/66B, με την οποία το bit προς baud μειώνεται τόσο όσο το 3 τις εκατό [45].

	Data rate (Gb/s)		FEC	Line coding	Tx type and launch power (dbm)		
	Upstream	Downstream					
1G-EPON	1.25	1.25	Optional RS(255, 239)	8b/10b	PX10: OLT: [-3,2] ONU: [-1,4]	PX20: OLT: [2,7] ONU: [-1,4]	
10G-EPON	10.3125	10.3125	Enabled RS(255, 223)	64b/66b	PR10: OLT: EML [1,4] ONU: DML [-1,4]	PR20: OLT: EML+AMP [5,9] ONU: DML [-1,4]	PR30: OLT: EML [2,5] ONU: HP DML [4,9]
	1.25	10.3125	Enabled RS(255,223)	64b/66b	PRX10: OLT: EML [1,4] ONU: DML [-1,4]	PRX20: OLT: EML+AMP [5,9] ONU: DML [-1,4]	PRX30: OLT: EML [2,5] ONU: DML [6,5.6]

**Πίνακας 3.1:** Σύγκριση μεταξύ 1G-EPON και 10G-EPON.

Για τη χαλάρωση των απαιτήσεων για οπτικούς πομποδέκτες, επιλέγεται ο Reed Solomon code (255,223) ως ο υποχρεωτικός κώδικας forward error correction (FEC) στο 10G-EPON, για την ενίσχυση του κέρδους FEC, ενώ ο Reed Solomon code (255,239) ορίζεται ως προαιρετικός για το 1G-EPON. Το 10G-EPON καθορίζει τον PRX προϋπολογισμό ενέργειας για τον PHY ασύμμετρο ρυθμό των 10 Gb/s downstream και 1 Gb/s upstream και τον PR προϋπολογισμό ενέργειας για τον PHY συμμετρικό ρυθμό των 10 Gb/s upstream και downstream. Κάθε προϋπολογισμός ενέργειας περιέχει τρεις επιπλέον κατηγορίες προϋπολογισμού ενέργειας: τον χαμηλό προϋπολογισμό ενέργειας (PR(X)10), τον μεσαίο προϋπολογισμό ενέργειας (PR(X)20) και τον υψηλό προϋπολογισμό ενέργειας (PR(X)30). Οι PR(X)10 και PR(X)20 κατηγορίες του προϋπολογισμού ενέργειας ορίζονται επίσης στο 1G-EPON, ενώ η κατηγορία PR(X)30 η οποία μπορεί να υποστηρίξει 32 τμήματα με μια απόσταση τουλάχιστον 20 χιλιομέτρων, αποτελεί μια επιπλέον κατηγορία που ορίζεται στο 10G-EPON. Λόγω του περιορισμένου χώρου στον Πίνακα 3.1 εμφανίζεται μόνο ο τύπος του πομπού (Tx) μαζί με την ισχύ δρομολόγησης του 10G-EPON.

Σε σύγκριση με το 1G-EPON, προηγμένοι πομποί και μεγαλύτερη ισχύς δρομολόγησης χρησιμοποιούνται στο 10G-EPON για την εξασφάλιση επαρκούς σήματος προς θόρυβο (SNR) στην πλευρά του δέκτη για την ακριβή ανάκτηση των δεδομένων με ρυθμό 10 Gb/s. Λόγω της αυξημένης ισχύος δρομολόγησης η κατανάλωση ενέργειας του οπτικού πομπού θα πρέπει να αυξάνεται αναλόγως. Επίσης λόγω του υποχρεωτικού μηχανισμού FEC και του αυξημένου ρυθμού μετάδοσης, το ηλεκτρονικό κύκλωμα πρέπει να επιτρέπει περισσότερες λειτουργίες και γρηγορότερη επεξεργασία από ότι στο 1G-EPON, με αυτό να συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ενέργειας και πιθανόν μεγαλύτερη απαγωγή θερμότητας. Ως εκ τούτου για την υποστήριξη ρυθμού 10 Gb/s στο φυσικό επίπεδο, η κατανάλωση ενέργειας του οπτικού τερματικού γραμμής (OLT) και της ONU μπορεί να αυξηθεί σημαντικά [45].



Για το επίπεδο MAC και τα ανωτέρω επίπεδα, προκειμένου να επιτευχθεί συμβατότητα ώστε οι φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου να ενθαρρύνονται να αναβαθμίσουν τις υπηρεσίες τους το 10G-EPON διατηρεί τη μορφή του πλαισίου του EPON, το επίπεδο MAC, το επίπεδο ελέγχου MAC και όλα τα ανωτέρω επίπεδα σχεδόν αμετάβλητα από το 1G-EPON. Αυτό περαιτέρω συνεπάγεται ότι το network management system (NMS), οι λειτουργίες επιπέδου του PON, οι διαχειρίσεις και η συντήρηση (OAM) του συστήματος και η δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (DBA) που χρησιμοποιούνται στο 1G-EPON μπορούν να εφαρμοστούν επίσης στο 10G-EPON.

### **3.2 Προκλήσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας στα 1G-EPON και 10G-EPON**

Στο παρελθόν η κατάσταση αναμονής για τις ONUs, είχε προταθεί να εισαχθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας όταν οι ONUs είναι σε αδράνεια [42],[51],[52]. Με την σύσταση ITU-T G.sup 45 [39] ορίζονται δύο τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας για ONUs σε GPON. Ο ένας τρόπος είναι η ενδιάμεση κατάσταση (doze mode), στην οποία μόνο ο πομπός μπορεί να απενεργοποιηθεί όταν αυτό είναι δυνατόν. Ο άλλος είναι η κυκλική λειτουργία αναμονής, στην οποία τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης μπορούν να απενεργοποιηθούν. Δεδομένου ότι η κίνηση στο δίκτυο πρόσβασης είναι κατά ριπές [53], οι ONUs μπορεί να είναι αδρανείς για μεγάλο χρονικό διάστημα, υποδηλώνοντας ότι η τοποθέτηση σε κατάσταση αναμονής των ONUs είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο είναι πρόκληση η ενεργοποίηση των ONUs που είναι σε κατάσταση αναμονής εγκαίρως, ώστε να αποφευχθεί η διακοπή παροχής υπηρεσιών όταν η εισερχόμενη/απερχόμενη κίνηση φθάνει στα 1G-EPON και 10G-EPON [45].

Η κύρια πρόκληση έγκειται στην εισερχόμενη μετάδοση. Στα EPON, η εισερχόμενη κίνηση των δεδομένων από όλες τις ONUs γίνεται με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) σε ένα μόνο μήκος κύματος και στη συνέχεια μεταδίδεται σε όλες τις ONUs. Μία ONU λαμβάνει όλα τα εισερχόμενα πακέτα και ελέγχει αν τα πακέτα προορίζονται για την ίδια. Μια ONU δεν γνωρίζει πότε η εισερχόμενη κίνηση φθάνει στο OLT και τον ακριβή χρόνο που το OLT δρομολογεί την δική του εισερχόμενη κίνηση. Ως εκ τούτου δίχως την κατάλληλη επίγνωση του ελέγχου αναμονής MAC, οι δέκτες στις ONUs πρέπει να είναι ενεργοί συνέχεια για να αποφευχθεί η απώλεια εισερχομένων πακέτων σε αυτούς [45].

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτάθηκε [51] να εφαρμοστεί μια τριπλή διαδικασία χειραψίας μεταξύ OLT και ONUs πριν την μετάβαση των ONUs σε αναμονή. Δεδομένου ότι ένα OLT είναι ενημερωμένο για την κατάσταση αναμονής των ONUs, μπορεί την εισερχόμενη αφιχθείσα κίνηση να την τοποθετεί σε ουρά μέχρι η ONU που είναι σε κατάσταση αναμονής να

ενεργοποιηθεί. Ωστόσο για την εφαρμογή της διαδικασίας της τριπλής χειραγίας, ένα εκτεταμένο πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλών σημείων (MPCP) απαιτείται για την εισαγωγή νέων μονάδων (PDUs) πακέτων δεδομένων MPCP. Επιπλέον η διαπραγματευτική διαδικασία διαρκεί τουλάχιστον μερικούς χρονικούς κύκλους και αυτό επιβαρύνει με περαιτέρω μεγάλη καθυστέρηση. Προτείνεται [54] να εφαρμοστεί σταθερή κατανομή εύρους ζώνης (FBA) όταν το δίκτυο δεν έχει μεγάλη επιβάρυνση. Με τη χρήση FBA, οι χρονοθυρίδες που κατανέμονται στην κάθε ONU σε κάθε κύκλο είναι σταθερές και γνωστές στην ONU και έτσι η ONU μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση αναμονής κατά τη διάρκεια των χρονοθυρίδων που διατίθενται στις άλλες ONUs. Ωστόσο επειδή η κυκλοφορία μιας ONU αλλάζει δυναμικά και από κύκλο σε κύκλο, το FBA μπορεί να οδηγήσει σε υστέρηση εύρους ζώνης ή σε επιπλέον κατανομή και κατά συνέπεια να υποβαθμιστούν οι υπηρεσίες των ONUs σε κάποιο βαθμό [45].

Εκτός από το σενάριο της εισερχόμενης κίνησης ένας αποτελεσματικός μηχανισμός ελέγχου αναμονής θα πρέπει επίσης να εξετάσει την απερχόμενη κυκλοφορία και τον έλεγχο των μηνυμάτων εκπομπής MPCP. Για απερχόμενη μετάδοση η ενεργοποίηση μιας ONU σε αναμονή μπορεί να προκληθεί από την άφιξη απερχόμενης κυκλοφορίας. Ωστόσο αυτή η αφιχθείσα κίνηση δεν μπορεί να μεταδοθεί μέχρι η ONU να ειδοποιηθεί για τον διαθέσιμο χρόνο από το OLT. Πριν το OLT διαθέσει εύρος ζώνης σε μία ONU, η μόλις ενεργοποιημένη ONU πρέπει πρώτα να ζητήσει απερχόμενο εύρος ζώνης. Για να το αντιληφθούμε αυτό, μερικές περιοδικές χρονοθυρίδες μπορεί να χρειασθεί να διατεθούν σε ONUs για να τις κάνουν ικανές να έχουν πρόσβαση στο απερχόμενο κανάλι εγκαίρως ακόμη και αν αυτές είναι σε αναμονή [45].

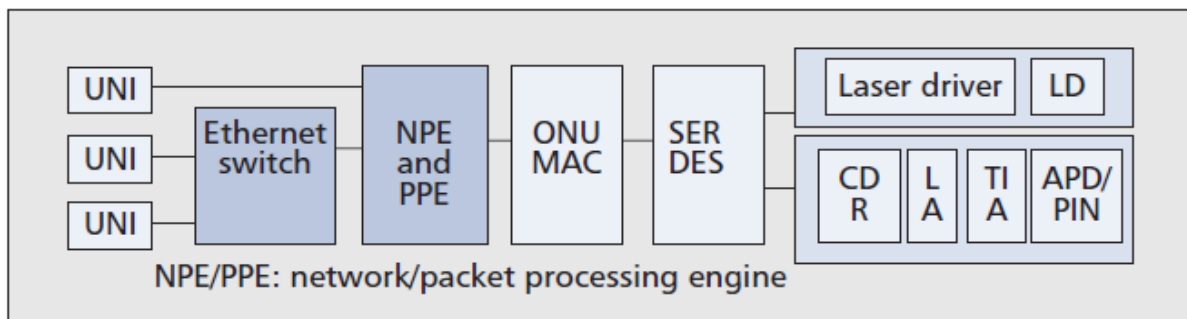
Όσον αφορά τον έλεγχο μετάδοσης μηνυμάτων MPCP για τη διατήρηση ενός χρονομέτρου επαγρύπνησης στο OLT από την λήξη και απ-εγγραφή της ONU, τόσο η IEEE 802.3ah όσο και η IEEE 802.3av καθορίζουν ότι οι ONUs θα πρέπει να στέλνουν μηνύματα αναφορών MPCP στο OLT περιοδικά για τις ανάγκες του εύρους ζώνης του σήματος που χρειάζεται και για να ενεργοποιούν το χρονόμετρο επαγρύπνησης του OLT, ακόμη και όταν δεν έχει γίνει αίτημα για εύρος ζώνης. Το μακρύτερο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο αναφορών, όπως ορίζεται από την αναφορά λήξης χρόνου καθορίζεται ως 50 ms τόσο στα 1G-EPON όσο και στα 10G-EPON. Εκτός αυτού το OLT στέλνει επίσης περιοδικά μηνύματα GATE σε μια ONU ακόμη και όταν η ONU δεν έχει κίνηση δεδομένων. Το μεγαλύτερο διάστημα μεταξύ δύο GATE μηνυμάτων που ορίζεται από την πύλη λήξης χρόνου καθορίζεται ως 50 ms. Ως εκ τούτου για να συμμορφωθούν οι ONUs σε κατάσταση αναμονής με το MPCP χρειάζεται να ενεργοποιούνται κάθε 50 ms για να στέλνουν μια αναφορά μηνυμάτων MPCP και να λαμβάνουν τα μηνύματα GATE [45].

### 3.2.1 Ενημέρωση για τον έλεγχο αναμονής MAC και χρονοπρογραμματισμός

Βασική ιδέα εξακολουθεί να είναι το να μπαίνουν οι ONUs σε κατάσταση αναμονής όταν αυτό είναι δυνατόν. Διαφέροντας από τις υπάρχουσες προτάσεις οι οποίες θέτουν όλη την ONU σε κατάσταση αναμονής, ερευνάται η σύνθεση μιας ONU και τοποθετούνται οι διαφορετικές συνιστώσες της ONU σε αναμονή κάτω από διαφορετικές συνθήκες [45].

#### A. Κατάσταση αναμονής των ONUs

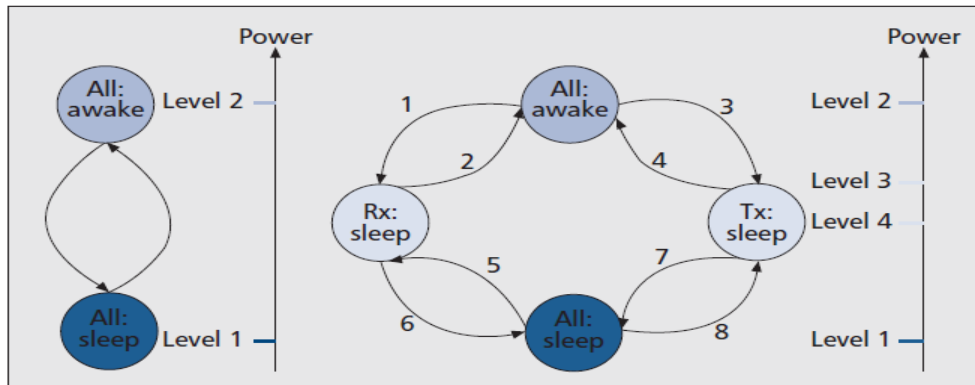
Το Σχήμα 3.1 απεικονίζει την τυπική σύνθεση μιας ONU. Η οπτική μονάδα αποτελείται από έναν οπτικό πομπό (Tx) και έναν οπτικό δέκτη (Rx). Η ηλεκτρική μονάδα περιέχει κυρίως τα σειριακά/μη σειριακά (SERDES), την ONU MAC, την network/packet processing engine (NPE/PPE), Ethernet switch και τα network interfaces (UNIs) του χρήστη.



*Σχήμα 3.1: Η σύνθεση μιας ONU.*

Όταν δεν υπάρχει απερχόμενη ούτε και εισερχόμενη κίνηση κάθε συνιστώσα της ONU μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση αναμονής. Όταν υπάρχει μόνο εισερχόμενη κίνηση, οι λειτουργίες που σχετίζονται με την απερχόμενη κίνηση μπορούν να απενεργοποιηθούν. Ομοίως, οι λειτουργίες που σχετίζονται με εισερχόμενη κίνηση μπορούν να απενεργοποιηθούν όταν υπάρχει μόνο απερχόμενη κίνηση. Ακόμη και όταν υπάρχει απερχόμενη κίνηση ο driver του laser και η δίοδος laser (LD) δεν χρειάζεται να λειτουργούν συνέχεια, αλλά μόνο κατά τη διάρκεια των χρονοθυρίδων που εκχωρούνται σε αυτή την ONU. Έτσι κάθε συνιστώσα της ONU μπορεί να τεθεί σε αναμονή και ενδεχομένως μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας [45].

Με την τοποθέτηση κάθε συνιστώσας μιας ONU σε αναμονή, μία ONU καταλήγει με πολλαπλά επίπεδα ισχύος. Το Σχήμα 3.2 δείχνει τα επίπεδα ισχύος μιας ONU και τη μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων ισχύος. Η αφύπνιση των UNI, NPE/PPE και του switch μπορεί να προκληθεί από την άφιξη απερχόμενης κίνησης και η προώθηση της εισερχόμενης κίνησης από την ONU MAC [33].



*Σχήμα 3.2: Πολλαπλά επίπεδα ισχύος των ONUs.*

Οι συνιστώσες αυτές ελέγχονται σχετικά εύκολα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Συνεπώς εστιάζουμε μόνο στην ONU MAC, στα SERDES, Tx και Rx. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2a, δύο επίπεδα ισχύος, all:awake και all:sleep, είναι το αποτέλεσμα της τοποθέτησης ολόκληρης της ONU σε αναμονή. Όταν η ONU είναι στην κατάσταση all:awake αν ο Tx δεν χρειάζεται να λειτουργεί μεταβαίνει σε κατάσταση Tx:sleep και περαιτέρω εισέρχεται σε κατάσταση all:sleep, αν ο Rx δεν χρειάζεται επίσης να λειτουργεί. Σε κατάσταση all:sleep εκτός από τους Tx και Rx, τα ONU MAC και SERDES είναι επίσης σε αναμονή. Ομοίως, μεταβάσεις συμβαίνουν ανάμεσα στις καταστάσεις all:awake, Tx:sleep και Rx:sleep [45].

Η μετάβαση μεταξύ αυτών των καταστάσεων θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένη έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς υποβάθμιση των υπηρεσιών. Παρουσιάζονται λύσεις για τον προσδιορισμό των μεταβάσεων κάτω από δύο αντίστοιχα σενάρια : αναμονή για περισσότερους από έναν DBA κύκλους και αναμονή με έναν κύκλο DBA.

### **B. Σενάριο 1 - Αναμονή για περισσότερους από έναν DBA κύκλο**

Σε αυτό το σενάριο η μετάβαση αποφασίζεται από την κατάσταση της εισερχόμενης κίνησης. Οι Tx/Rx τίθενται σε αναμονή αν δεν υπάρχει απερχόμενη/εισερχόμενη κίνηση για κάποιο χρονικό διάστημα.

### **Γ. Σενάριο 2 - Αναμονή εντός ενός κύκλου DBA**

Σε αυτό το σενάριο αναλύεται η τοποθέτηση των Tx και Rx σε αναμονή μέσα σε ένα κύκλο DBA. Υποθέτουμε ένα PON με 16 ONUs. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου DBA, κατά μέσο όρο, μόνο το 1/16 της διάρκειας του χρόνου κατανέμεται σε κάθε ONU. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν υπάρχει απερχόμενη/εισερχόμενη κίνηση, οι Tx και Rx χρειάζονται μόνο να είναι ενεργοί για το

1/16 του χρόνου και να μπορούν να μπαίνουν σε αναμονή για τα υπόλοιπα 15/16. Ως εκ τούτου μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [45].

### **3.2.2 Συμπέρασμα**

Με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης η κατανάλωση ενέργειας στα 10G-EPON μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε σύγκριση με εκείνη του 1G-EPON. Είναι σημαντικό να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας στα 10G-EPON για χαμηλό OPEX και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Δόθηκε έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας των ONUs, προτάθηκε η απενεργοποίηση ορισμένων λειτουργιών των ONUs όποτε αυτό είναι εφικτό και εισήχθησαν τέσσερα επίπεδα ισχύος για την ONU. Στη συνέχεια από την προοπτική του ελέγχου MAC και τον χρονοπρογραμματισμό ερευνήθηκαν σχήματα για τη σωστή διέλευση μεταξύ των επιπέδων ισχύος της ONU. Προτάθηκαν δύο συστήματα για δύο αντίστοιχα σενάρια : αναμονή για πάνω από ένα κύκλο DBA και αναμονή με ένα κύκλο DBA [45].

## **3.3 Μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας και ανάλυση απόδοσης για συστήματα οπτικών παθητικών δικτύων τάξης 10 Gigabit.**

### **3.3.1 Περίληψη**

Παρακάτω, αναπτύσσεται το σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας για τα συστήματα 10 Gigabit-τάξης PON (PASSIVE OPTICAL NETWORK) τα οποία συζητήθηκαν στην FSAN/ITU-T (Full Service Access Network και International Telecommunication Union-Telecommunication, ομάδα ενδιαφέροντος PON και οργανισμός “standard” αντίστοιχα) και IEEE 802.3av.

Γίνεται λόγος για ένα μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας που βασίζεται στη λειτουργία “ύπνου”, η οποία είναι υπό συζήτηση στο IEEE 802.3av. Με τον μηχανισμό αυτό, προτείνεται ένα αναλυτικό μοντέλο το οποίο είναι κατάλληλο γενικά σε μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας και ιδιαίτερα εφαρμόσιμο σε δίκτυα IEEE 802.16e. Βάση αυτού του μοντέλου, η κατανάλωση ενέργειας και η καθυστέρηση πακέτου αναλύονται σύμφωνα με την κατάσταση κυκλοφορίας, όπου εξετάζεται μόνο η εισερχόμενη(downstream) κυκλοφορία.

Η λειτουργία αναμονής/ύπνου (sleep mode) χρησιμοποιείται για τη μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας σε σύστημα PON. Μια οπτική μονάδα δικτύου (Optical Network Unit – ONU) μεταβαίνει σε λειτουργία αναμονής, μετά από αρνήσεις με το τερματικό οπτικής γραμμής (Optical

Line Terminal - OLT) και επανέρχεται σε λειτουργία “ξυπνάει” όταν λήξει η χρονική διάρκεια της/του αναμονής/ύπνου.

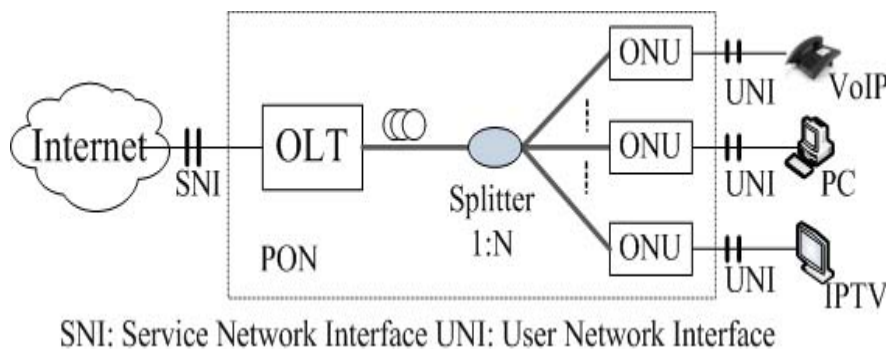
Το τερματικό OLT αποφασίζει την επόμενη λειτουργία της μονάδας ONU ανάλογα με την κατάσταση της εισερχόμενης κυκλοφορίας.

Οι μετρήσεις απόδοσης προκύπτουν σύμφωνα με την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση πακέτων για την αξιολόγηση κατάλληλων παραμέτρων της λειτουργίας “ύπνου” [55].

### 3.3.2 Λειτουργία “ύπνου” με σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας σε σύστημα PON

#### A. Διαμόρφωση του συστήματος PON

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (Passive Optical Network - PON) είναι ένα point to multipoint οπτικό δίκτυο πρόσβασης, χωρίς ενεργά στοιχεία στη διαδρομή του σήματος από την πηγή στον προορισμό (Σχήμα 3.3).



**Σχήμα 3.3:** Διαμόρφωση ενός βασικού συστήματος PON

Στην περίπτωση αυτή όλες οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται μεταξύ του οπτικού τερματικού γραμμής (OLT) και των μονάδων οπτικού δικτύου (ONUs). Το OLT βρίσκεται στο CO (Central Office) και οι διασυνδέσεις στο μητροπολιτικό δίκτυο (MAN) ή στο δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN) μέσω της υπηρεσίας διασύνδεσης δικτύου (SNI). Από την άλλη πλευρά, πολλαπλές ONUs εντοπίζονται σε χώρους του χρήστη, παρέχοντας ευρυζωνικό βίντεο, υπηρεσίες δεδομένων και φωνής μέσω της διασύνδεσης του δικτύου του χρήστη (UNI).

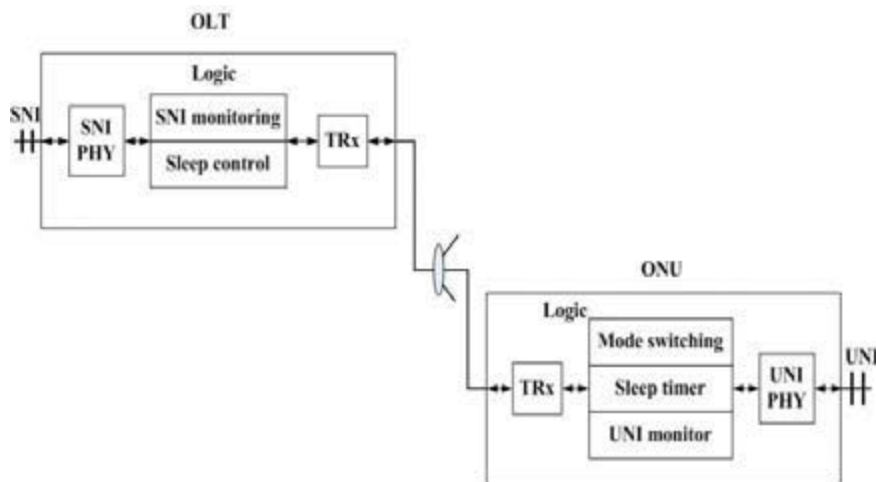
Το OLT και οι ONUs συνδέονται μέσω οπτικών ινών και οπτικών διαχωριστών (splitters). Σε συστήματα TDM-PON, το OLT εκπέμπει σήματα σε όλες τις ONU στην downstream κατεύθυνση. Σε αυτή την εκπομπή και επιλεγμένη αρχιτεκτονική, κάθε ενεργή ONU “ακούει” στο κανάλι και μόνο η καθορισμένη ONU θα “παραδώσει” τα λαμβανόμενα πακέτα

στους τελικούς χρήστες. Πολλαπλές μονάδες ONUs μοιράζονται το ίδιο εκπεμπόμενο κανάλι στην upstream κατεύθυνση [55],[56].

### B. Σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας για συστήματα PON

Η λειτουργία “ύπνου” είναι μια γνωστή καλή προσέγγιση για τη μείωση ενέργειας που καταναλώνεται από τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Ο εξοπλισμός τίθεται σε κατάσταση αναμονής/ύπνου όταν δεν υπάρχει κίνηση πακέτων προς εκπομπή. Η βασική ιδέα της λειτουργίας αυτής για σύστημα PON είναι η απενεργοποίηση όλων των σχετιζόμενων κυκλωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των οπτικών, του MAC, της σχετικής επεξεργασίας πακέτου και της κίνησης προς εκπομπή [33].

Το σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας που προτείνεται για σύστημα PON με βάση τη λειτουργία αναμονής/ ύπνου επικεντρώνεται στην μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται από τις μονάδες ONUs (Σχήμα 3.4) [57].



**Σχήμα 3.4:** Λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας 10G ONU

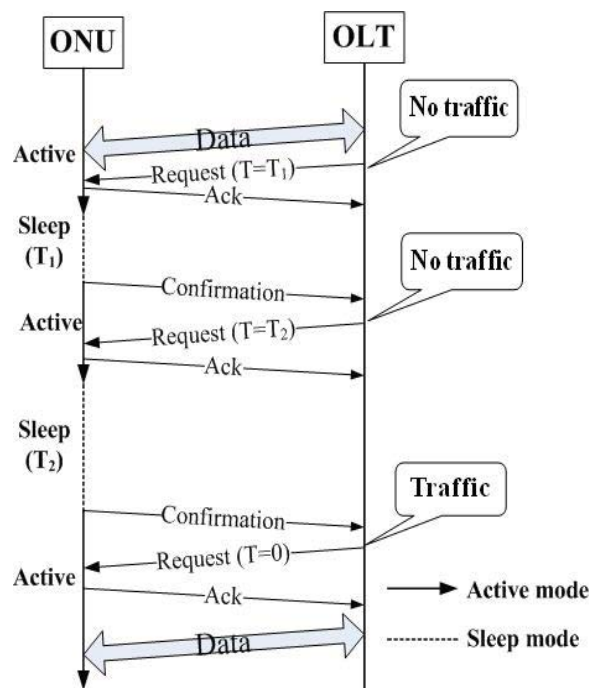
Το OLT είναι υπεύθυνο για τα σήματα λειτουργίας και ελέγχου της κάθε ONU. Παρακολουθεί την downstream κίνηση που λαμβάνεται, από την υπηρεσία διασύνδεσης δικτύου (Service Network Interface - SNI). Τότε ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τη σχετική μονάδα ONU σύμφωνα με την παρουσία ή απουσία της downstream κίνησης. Αν λάβει downstream κίνηση που απευθύνεται προς μια μονάδα ONU, η οποία βρίσκεται σε λειτουργία ύπνου, τότε αποθηκεύει τα downstream πακέτα μέχρι η ONU να “ξυπνήσει”, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια πακέτων. Στην περίπτωση αυτή η μονάδα ONU μπορεί να αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας μεταξύ ενεργής ή

αναμονής/ύπνου και να μετρήσει αντίστροφα σε σχέση με το χρόνο αναμονής/ύπνου που δίδεται από το OLT.

Το OLT μπορεί να παρατείνει την περίοδο του “ύπνου” οδηγώντας τις μονάδες ONUs που πρόκειται να “ξυπνήσουν”, πάλι σε λειτουργία ύπνου με την εκπομπή μηνύματος.

Μια μονάδα ONU που βρίσκεται σε λειτουργία ύπνου μπορεί να ζητήσει να “ξυπνήσει”, στην περίπτωση που υπάρχει upstream κίνηση, περιμένοντας για μετάδοση, ανεξάρτητα από τις οδηγίες/σήματα του OLT. Σημειώνεται ότι για το upstream εύρος ζώνης απαιτείται η αποστολή μηνύματος ελέγχου από τη μονάδα ONU προς το OLT, γεγονός που αποδίδεται στη δυναμική ανάθεση του εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Assignment - DBA) λειτουργία του OLT [55].

### Γ. Λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας



**Σχήμα 3.5:** Sleep - mode λειτουργία, ακολουθία μηνυμάτων μεταξύ μονάδας ONU και τερματικού OLT

Το παραπάνω Σχήμα 3.5 απεικονίζει την ακολουθία μηνυμάτων μεταξύ OLT και ONUs στην sleep – mode λειτουργία. Ο μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας σε λειτουργία sleep - mode, έχει σχεδιαστεί ιδιαίτερα για μονάδα ONU. Το OLT εκπέμπει ένα μήνυμα αίτησης (Request message) με χρόνο αναμονής/ύπνου στις μονάδες ONUs. Την πρώτη φορά, ο χρόνος αναμονής/ύπνου  $T$  έχει αρχικοποιηθεί στην τιμή  $T_{min}$ . Με την παραλαβή του μηνύματος αίτησης, η ONU στέλνει ένα

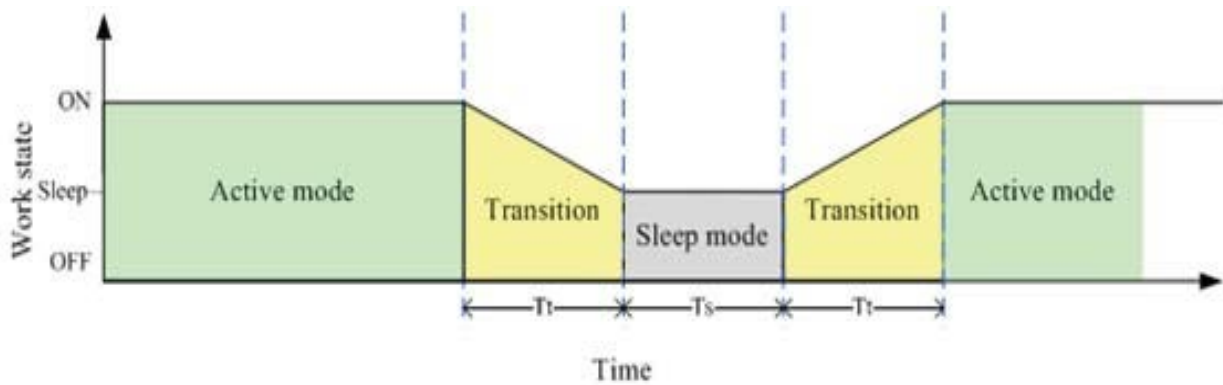


μήνυμα ACK πίσω στο OLT και εισάγεται η λειτουργία αναμονής/ύπνου. Η ONU θα απενεργοποιήσει την ενέργεια από όλες τις λειτουργίες εκτός από αυτές της παρακολούθησης και του ελέγχου εξωτερικής εισόδου.

Μετά τη λήξη του επιθυμητού χρόνου αναμονής/ύπνου  $T_s$ , η μονάδα ONU που βρισκόταν σε λειτουργία αναμονής/ύπνου εισέρχεται σε ενεργή λειτουργία και στέλνει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης στο τερματικό OLT για έλεγχο της ύπαρξης downstream κίνησης.

Το OLT προωθεί τα πακέτα που ήταν σε αναμονή, κατά τη διάρκεια του επιθυμητού χρόνου αναμονής/ύπνου  $T_s$  στην ONU ώστε να λάβει το μήνυμα επιβεβαίωσης. Μετά την ολοκλήρωση της μεταφοράς των πακέτων, αν δεν υπάρχει downstream κίνηση για τη ONU, το OLT στέλνει ένα μήνυμα αίτησης με επιθυμητό χρόνο αναμονής/ύπνου  $T_s$  στη ONU και πάλι. Διαφορετικά, το OLT στέλνει ένα επιπλέον μήνυμα αίτησης με επιθυμητό χρόνο αναμονής/ύπνου  $T_s$  ίσο με το μηδέν, έτσι ώστε να διατηρηθεί η ONU ενεργή για προώθηση downstream κίνησης.

Ταυτόχρονα, το μήνυμα αίτησης αναγνωρίζει το μήνυμα επιβεβαίωσης. Μια μονάδα ONU που βρίσκεται σε λειτουργία αναμονής/ύπνου μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να “ξυπνήσει”, αν υπάρχει απερχόμενη (upstream) κίνηση προς μετάδοση. Το Σχήμα 3.6 απεικονίζει τη διαδικασία μετάβασης της ONU σε διαφορετική κατάσταση λειτουργίας.



**Σχήμα 3.6:** Η διαδικασία μετάβασης της ONU σε διαφορετική κατάσταση λειτουργίας

Τα μηνύματα ελέγχου που ορίζονται στην λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, μπορούν να υλοποιηθούν μέσω των PLOAM (Physical Layer Operation, Administration and Maintenance) και των MPCP (Multi Point Control Protocol) μηνυμάτων, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα 10G-PON και 10G-EPON, αντίστοιχα [55].

### 3.3.3 Το μοντέλο αναλυτικά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την downstream κίνηση, όταν μια μονάδα ONU βρίσκεται σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, τα downstream πακέτα αποθηκεύονται στους buffer του τερματικού OLT, διευθυνσιοδοτούνται στη μονάδα ONU και μεταδίδονται σε αυτή όταν “ξυπνήσει”.

Σε περίπτωση upstream κίνησης, όταν υπάρχουν upstream πακέτα σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, η ONU “ξυπνά” αμέσως. Αυτή η λειτουργία για εξοικονόμηση ενέργειας έχει αντίκτυπο στην υπηρεσία προκαλώντας καθυστερήσεις. Για να σχεδιαστούν κατάλληλα οι παράμετροι της λειτουργίας του “ύπνου” (π.χ., χρονικό διάστημα “ύπνου”), ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση της ενέργειας που εξοικονομείται ενώ ικανοποιείται η απαίτηση της καθυστέρησης των πακέτων, είναι απαραίτητη η ανάλυση της ακρίβειας της καθυστέρησης αυτής. Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιείται ένα μοντέλο το οποίο είναι κατάλληλο σε γενικούς μηχανισμούς για εξοικονόμηση ενέργειας και έχει ειδικά εφαρμοσθεί σε δίκτυα IEEE 802.6e [55],[58].

#### A. Ορισμός διαστήματος “ύπνου” $T_s$

Αρχικά το χρονικό διάστημα του “ύπνου”  $T_s$  αρχικοποιείται σε μια ελάχιστη τιμή  $T_{min}$ . Αν δεν υπάρχουν downstream ή upstream πακέτα στα  $j-1$  διαστήματα, το διάστημα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας εκθετική ανάπτυξη ( $2^j T_{min}$ ), ως ένα μέγιστο χρονικό διάστημα  $T_{max}$  να επιτευχθεί, οπότε το διάστημα του “ύπνου” σταματά στο διάστημα αυτό.

$$T_j = \begin{cases} T_{min}, & n=1 \\ T_{min} (2^{j-1} T_{min}, T_{max}), & n>1 \end{cases} \quad (1)$$

όπου  $j$  αντιπροσωπεύει το  $j$ -th διάστημα ύπνου.

Μετά από κάθε διάστημα ύπνου, η ONU “ξυπνά” προσωρινά μέχρι να επιβεβαιωθεί εάν υπάρχει downstream κίνηση διευθυνσιοδοτούμενη σ' αυτή από το OLT. Οι παράμετροι, όπως  $T_{min}$  και  $T_{max}$  περιλαμβάνονται στην αίτηση “ύπνου” και στα μηνύματα που αποστέλλονται μεταξύ ONU και OLT πριν από την λειτουργία “ύπνου”. Επιπρόσθετα, η ONU μπορεί να τερματίσει τη λειτουργία του “ύπνου”, αν υπάρξουν upstream πακέτα [55].

## **B. Σύστημα μοντέλου**

Θεωρούμε μόνο την περίπτωση που ο ενδεχόμενος χρόνος ύπνου  $T_s$  αλλάζει σύμφωνα με τις συνθήκες της downlink κίνησης. Υποθέτουμε ότι το διάστημα μετάβασης  $T_t$  ότι είναι μια σταθερή τιμή, κατά τη διάρκεια όπου η μονάδα ONU αλλάζει καταστάσεις λειτουργίας και η διαδικασία μετάβασης περιλαμβάνεται στη λειτουργία αναμονής/ύπνου. Σε περίπτωση που υπάρχουν downstream πακέτα σε ONU που βρίσκεται σε λειτουργία “ύπνου”, η μονάδα αυτή εξέρχεται από την λειτουργία αναμονής/ύπνου όταν ξεπεραστεί το χρονικό διάστημα  $T_s$ . Σε αντίθεση, εάν υπάρχουν upstream πακέτα κατά τη διάρκεια των διαστημάτων “ύπνου”, η ONU “ξυπνά” αμέσως. Ας υποθέσουμε ότι downstream πλαίσια διευθυνσιοδοτημένα στην ONU ακολουθούν τις Poisson διεργασίες με ρυθμό (πλαίσιο ανά μονάδα χρόνου). Τότε ο χρόνος άφιξης μεταξύ των πλαισίων ακολουθεί μια εκθετική κατανομή με μέση τιμή (ανά μονάδα χρόνου) [59].

Έστω  $n$  μια τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των διαστημάτων “ύπνου” πριν υπάρξουν downstream πακέτα διευθυνσιοδοτούμενα στη ONU. Στην εξίσωση (1), η τιμή του  $n$  είναι εξαρτώμενη ιδιαίτερα από τις παραμέτρους του διαστήματος αναμονής/ύπνου και από τα χαρακτηριστικά της downlink κυκλοφορίας πακέτων [55].

## **Γ. Κατανάλωση ενέργειας**

Υπό την προϋπόθεση ότι η ONU τερματίζει τη λειτουργία ύπνου κατά τη διάρκεια του  $j$ -th διαστήματος, οι  $P_s$  και  $P_t$  δηλώνουν τις μονάδες κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, κατά το διάστημα του “ύπνου” και της διαδικασίας μετάβασης [55].

## **Δ. Καθυστέρηση πακέτου**

Μια παράταση της λειτουργίας “ύπνου” επιτρέπει την ONU να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια. Ωστόσο, όμως το γεγονός αυτό οδηγεί σε παράταση του χρόνου απόκρισης της ONU στα downstream πακέτα που φτάνουν. Ως εκ τούτου, η ONU δεν μπορεί στιγμιαία να χειριστεί την κυκλοφορία downlink πακέτων. Το γεγονός αυτό επιβαρύνει τη λειτουργία του “ύπνου”.

Ο όρος του πλαισίου απόκρισης χρόνου (frame response time), χρησιμοποιείται για να απεικονιστεί η χρονική καθυστέρηση απόκρισης της ONU για τα downstream πακέτα.

Ως  $R$  χαρακτηρίζεται το πλαίσιο απόκρισης χρόνου [55].

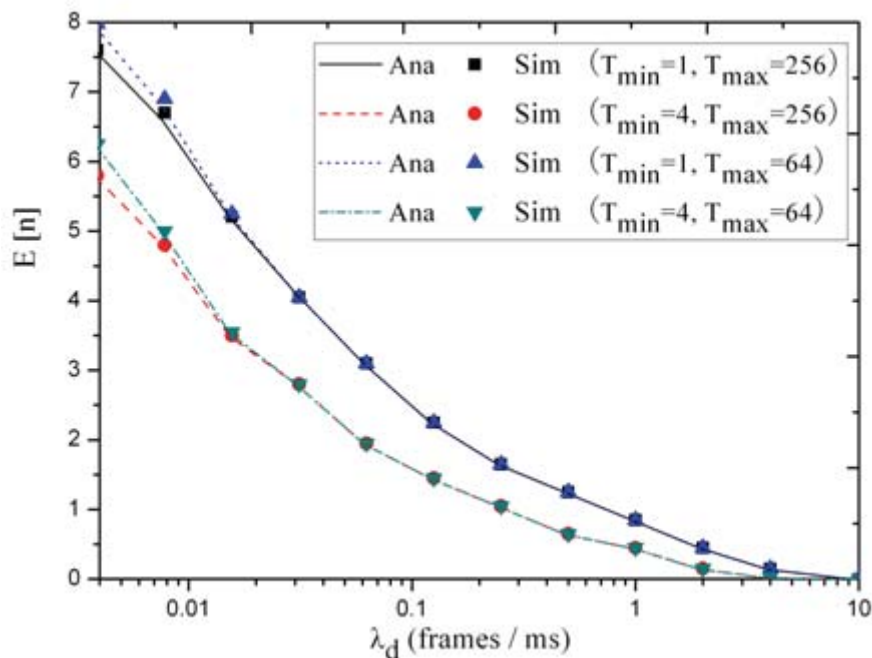
### 3.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα, αξιολογείται η απόδοση του συστήματος σε λειτουργία ύπνου προσομοιώνοντας το αναλυτικό μοντέλο σύμφωνα με τις παραμέτρους του Πίνακα 3.2.

Variables	Symbols	Values
Transition time to the active mode	$T_t$	2 ms
Round-trip time between the OLT and ONU	$T_r$	0.2 ms
Power consumption in the sleep mode	$P_s$	1 W
Power consumption in the transition process	$P_t$	2 W
Power consumption in the active mode	$P_a$	10 W

Πίνακας 3.2: Παράμετροι προσομοίωσης

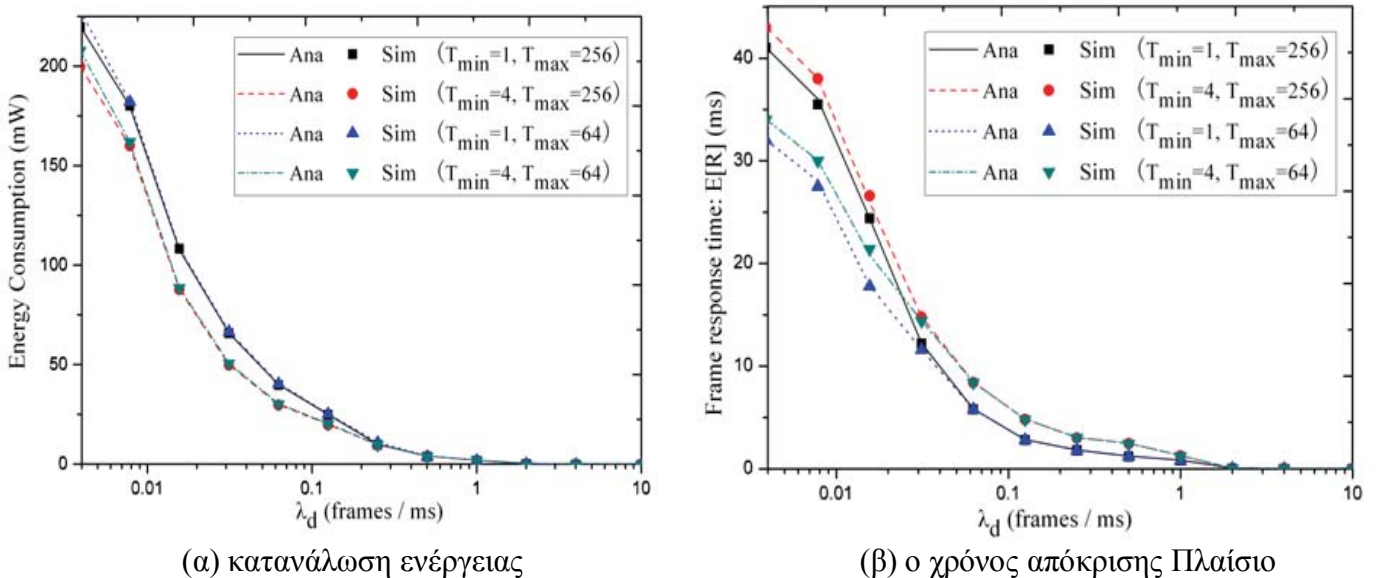
Ο χρόνος μετάβασης  $T_t$ , υποθέτουμε πως είναι σταθερός για τις διαφορετικές λειτουργίες της ONU και η μεταβατική διαδικασία περιλαμβάνεται στην λειτουργία ύπνου. Κατά την προσομοίωση υποθέτουμε ότι το OLT μπορεί να αποθηκεύσει όλα τα downstream πακέτα χωρίς την απώλεια πλαισίου.



Σχήμα 3.7: Ο μέσος αριθμός των διαστημάτων “ύπνου” σε λειτουργία “ύπνου” (Ana: ανάλυση-analysiss, Sim: προσομοίωση-simulation).

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται η κατανάλωση ενέργειας και η καθυστέρηση των πακέτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας “ύπνου” σε όρους  $\lambda_d$  με διαφορετικά  $T_{min}$  και  $T_{max}$ . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν ότι η ανάλυση και η προσομοίωση ταιριάζουν μεταξύ τους. Με πιο συχνές αφίξεις downlink πλαισίου, δηλαδή, μεγαλύτερο  $\lambda_d$ , η λειτουργία αναμονής/ύπνου τερματίζεται με μεγαλύτερη πιθανότητα. Όταν το  $\lambda_d$  είναι περίπου 10, δεν υπάρχει κοντινό διάστημα “ύπνου”. Ως αποτέλεσμα, μικρότερη διάρκεια λειτουργίας “ύπνου”. Κατά συνέπεια, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μικρότερη καθυστέρηση downstream πακέτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας “ύπνου”. Αυτή η σχεδίαση όμως θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ενεργού λειτουργίας στην ONU.

Να σημειωθεί ότι ως κατανάλωση ενέργειας ορίστηκε στο άρθρο, η κατανάλωση ενέργειας της ONU σε λειτουργία αναμονής/ύπνου. Με διαφορετικό  $T_{min}$  και  $T_{max}$ , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8, το μικρότερο αρχικά από τα διαστήματα “ύπνου”  $T_{min}$  και  $T_{max}$  οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, αλλά ένα μικρότερο πλαίσιο χρόνου απόκρισης κάτω από τον ίδιο πλαίσιο άφιξης με ρυθμό  $\lambda_d$ . Μικρότερο  $T_{min}$  και  $T_{max}$  οδηγεί σε μεγαλύτερο  $E[\eta]$ . Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερο διάστημα “ύπνου” που απαιτείται σε λειτουργία “ύπνου” και οι περισσότερες διαδικασίες μετάβασης απαιτούν, μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας [55].



**Σχήμα 3.8:** Κατανάλωση ενέργειας και χρόνος απόκρισης πλαισίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας “ύπνου” σε ρυθμό  $\lambda_d$  άφιξης του downstream πλαισίου (Ana: ανάλυση, Sim: προσομοίωση).

### 3.3.5 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε παραπάνω ένας μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας για συστήματα PON, που συζητήθηκε σε οργανισμούς τυποποίησης, όπως τους FSAN/ITU-T και την IEEE 802.3av ομάδα εργασίας. Ένα μοντέλο προτάθηκε για τους βασικούς μηχανισμούς αναμονής/ύπνου εξοικονόμησης ενέργειας, προς ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας σε λειτουργία αναμονής/ύπνου και της καθυστέρησης πακέτου, με την ύπαρξη μόνο της downlink κίνησης. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης και της προσομοίωσης, παρατηρείται ότι:

- 1) η ενεργειακή απόδοση και το πλαίσιο απόκρισης χρόνου μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός λd των πλαισίων που φτάνουν και όταν το λd είναι περίπου 10, δεν υπάρχει κοντινό διάστημα “ύπνου”.
- 2) μια μικρότερη αρχική τιμή στο  $T_{min}$  (ελάχιστος χρόνος “ύπνου”) έχει υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα και μικρότερο πλαίσιο απόκρισης χρόνου.
- 3) μια μεγαλύτερη αρχική τιμή στο  $T_{max}$  (μέγιστος χρόνος “ύπνου”) έχει χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση και μεγαλύτερο πλαίσιο απόκρισης χρόνου.

Έτσι είναι απαραίτητο να σχεδιάσουμε τις κατάλληλες λειτουργικές παραμέτρους  $T_{min}$  και  $T_{max}$  ώστε να προσφέρουν ευνοϊκή εξισορροπητική απόδοση για το μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας που προτείνονται στο άρθρο αυτό. Γενικά, ο μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας με βάση τον “ύπνο” μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση, ιδιαίτερα στο δίκτυο πρόσβασης. Για μελλοντική εργασία θα μπορούσαν να εξεταστούν οι μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας σε κατάσταση ύπαρξης downstream και upstream κυκλοφορίας στα συστήματα [55].

## 3.4 Μελέτη και παρουσίαση των μηχανισμών αναμονής και ελέγχου προσαρμογής του ρυθμού σύνδεσης για ενεργειακή απόδοση στα 10G-EPON δίκτυα

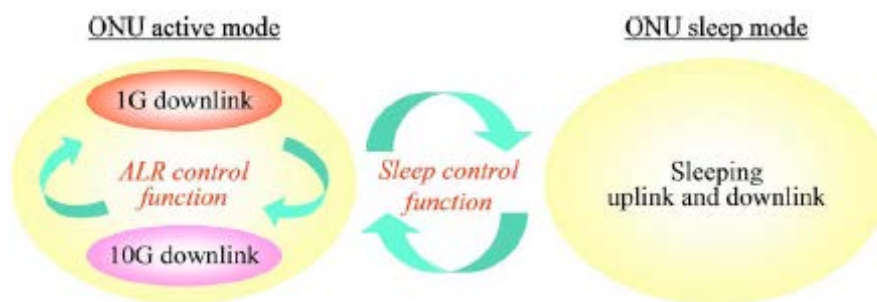
### 3.4.1 Περίληψη

Αυτό το άρθρο περιγράφει τις λειτουργίες ελέγχου “ύπνου” και προσαρμόσιμου ρυθμού σύνδεσης (ALR- Adaptive Link Rate), για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των μονάδων οπτικού δικτύου (ONUs – Optical Network Units), σε 10 Gb/s παθητικά οπτικά συστήματα δικτύου Ethernet (10G-EPON). Προτείνεται ένας υβριδικός μηχανισμός που περιλαμβάνει τόσο τις λειτουργίες ελέγχου “ύπνου” και ALR με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης της εξοικονόμησης ενέργειας. Η λειτουργία ελέγχου “ύπνου” αλλάζει τη λειτουργία ONU, δηλ. ενεργή ή “ύπνου”, ανάλογα με την παρουσία ή την απουσία της “κίνησης”. Η λειτουργία ελέγχου

ALR μεταγωγείς, τον downlink ρυθμό μεταξύ ενός τερματικού οπτικής γραμμής (OLT) και μιας ONU, δηλαδή, 1 Gb/s ή 10 Gb/s, ανάλογα με την ποσότητα της κίνησης. Ο προτεινόμενος υβριδικός μηχανισμός προσφέρει αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας στις ONUs με βάση τις συνθήκες κίνησης. Ο μηχανισμός αυτός επικυρώνεται από την αριθμητική προσομοίωση και πειραματικά [41].

### 3.4.2 Έννοια Υβριδικού Μηχανισμού

Η έννοια του προτεινόμενου υβριδικού μηχανισμού σε σύστημα συνύπαρξης φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Ο υβριδικός μηχανισμός περιλαμβάνει τις λειτουργίες ελέγχου ύπνου και ALR. Η λειτουργία ελέγχου ύπνου αλλάζει την κατάσταση της ONU, σε ενεργή ή αναμονής/ύπνου, ανάλογα με τη παρουσία ή απουσία της “κίνησης”. Από την άλλη πλευρά, η ALR λειτουργία ελέγχου αλλάζει μεταξύ δύο downlink ρυθμών, δηλαδή 1G και 10G, ανάλογα με την ποσότητα της κίνησης.



**Σχήμα 3.9:** Έννοια υβριδικού μηχανισμού.

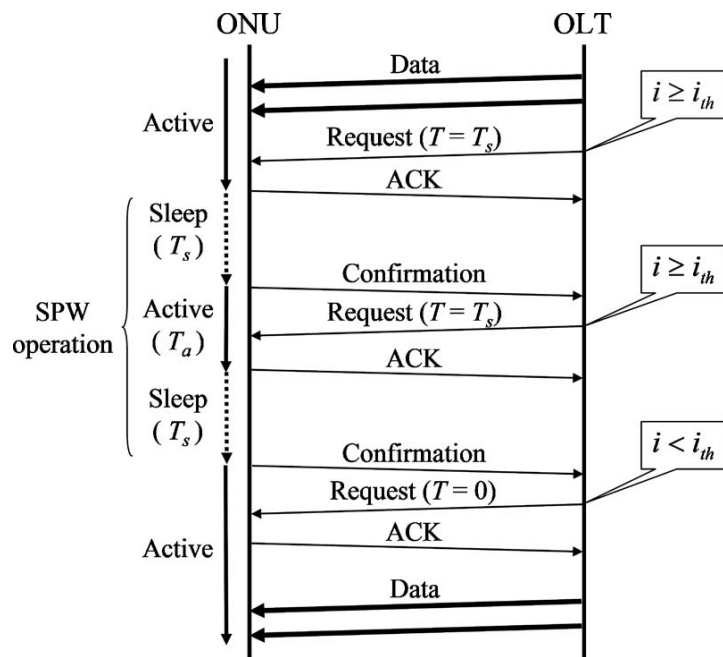
Ο υβριδικός μηχανισμός ενεργοποιεί τη λειτουργία ελέγχου ύπνου εν απουσία κίνησης στη σύνδεση και τη λειτουργία ελέγχου ALR με την παρουσία της κίνησης στη σύνδεση. Αυτό σημαίνει ότι ο υβριδικός μηχανισμός υπερνικά τα μειονεκτήματα που προκύπτουν ξεχωριστά στις λειτουργίες ελέγχου. Ως εκ τούτου, ο υβριδικός μηχανισμός μπορεί να προσφέρει πιο αποτελεσματική απόδοση εξοικονόμησης ενέργειας, είτε από τη λειτουργία ελέγχου ύπνου ή τη λειτουργία ALR [41].

### 3.4.3 Λειτουργίες Εξοικονόμησης Ενέργειας

#### A. Λειτουργία Ελέγχου ύπνου

Η λειτουργία ελέγχου ύπνου καθιστά δυνατή την σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, με την απενεργοποίηση των μη χρησιμοποιούμενων λειτουργιών σε απουσία κυκλοφορίας στην

σύνδεση. Ωστόσο, τα downstream σήματα TDM-based PON εκπέμπονται φυσικά σε όλες τις ONUs. Αυτό σημαίνει ότι η φυσική ανίχνευση των downstream σημάτων από μια ONU που βρίσκεται σε λειτουργία “ύπνου” δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως “ερέθισμα” για την ενεργοποίησή της (“ζύπνημα”). Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, η λειτουργία ύπνου και περιοδικής αφύπνισης/ξύπνηματος (SPW), υιοθετήθηκαν ως λειτουργία ελέγχου «ύπνου». Σε λειτουργία SPW, η ONU που βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου ξυπνά περιοδικά για να επιβεβαιώσει αν έχουν προωθηθεί “πλαίσια” προς αυτή. Ένα παράδειγμα ανταλλαγής μηνύματος για τη λειτουργία ελέγχου ύπνου φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



**Σχήμα 3.10:** Παράδειγμα ανταλλαγής μηνύματος για τη λειτουργία ελέγχου ύπνου.

Το OLT παρακολουθεί τη downstream κίνηση για κάθε ONU και στέλνει ένα μήνυμα «Αίτησης» στην ONU που περιλαμβάνει τον χρόνο ύπνου  $T$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι το OLT καθορίζει την παρουσία ή απουσία downstream κίνησης βάσει του downstream πλαισίου διαστήματος  $i$ . Ο χρόνος ύπνου  $T$  υπολογίζεται ως:

$$T = \begin{cases} T_s & \text{if } i \geq i_{th} \\ 0 & \text{if } i < i_{th} \end{cases}, \quad (1)$$

όπου  $T_s$  και  $i_{th}$  δηλώνουν τον προκαθορισμένο χρόνο ύπνου και το κατώφλι του downstream διαστήματος πλαισίου, αντίστοιχα. Ο προκαθορισμένος χρόνος ύπνου  $T_s$ , ο ενεργός χρόνος  $T_a$ ,



συμπεριλαμβανομένου του χρόνου μετάβασης, από την κατάσταση αναμονής/ύπνου προς την ενεργή λειτουργία  $T_t$  και το κατώφλι του downstream διαστήματος πλαισίου  $i$ -th είναι οι παράμετροι “κλειδί” για τον έλεγχο του ύπνου.

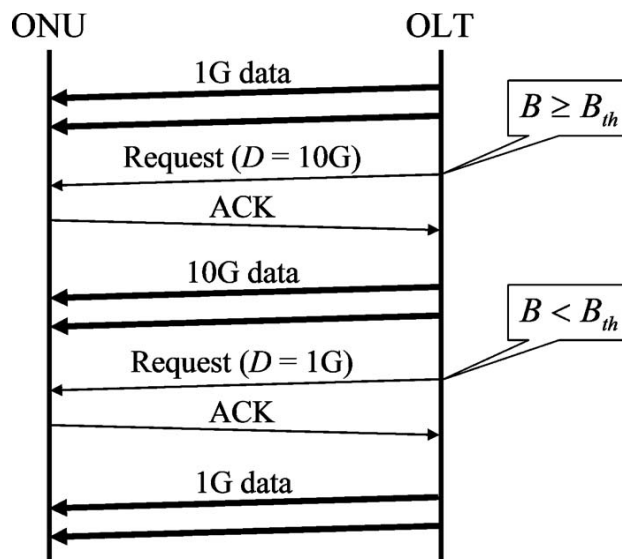
Με τη λήψη του μηνύματος Αίτησης, η ONU στέλνει ένα μήνυμα ACK πίσω στο OLT και εισέρχεται σε κατάσταση αναμονής/ύπνου. Σε περίπτωση παρουσίας upstream κίνησης από τα UNI (User Network Interfaces), η ONU αρνείται να εισέλθει σε λειτουργία αναμονής/ύπνου και στέλνει ένα μήνυμα NACK στο OLT. Μετά από προκαθορισμένο χρόνο ύπνου  $T_s$ , η ONU που βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου εισέρχεται σε ενεργή λειτουργία “ξυπνά”.

Η ONU στη συνέχεια στέλνει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης στο OLT για έλεγχο ύπαρξης downstream κίνησης από την ONU. Σημειώνεται ότι το upstream εύρος ζώνης χρειάζεται για την αποστολή μηνύματος επιβεβαίωσης όπου με συνέπεια αποδίδεται από την DBA λειτουργία του OLT. Δεδομένου ότι η ONU μπορεί να “ξυπνήσει” αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκχώρησης του εύρους ζώνης, το μήνυμα επιβεβαίωσης μπορεί να χρειαστεί να περιμένει με την παραχώρηση έως και δύο κύκλων DBA.

Σε περίπτωση απουσίας downstream κίνησης, το OLT οδηγεί την ONU στο να διατηρείται σε λειτουργία SPW, με περίοδο τον προκαθορισμένο χρόνο ύπνου  $T_s$ . Από την άλλη πλευρά, σε παρουσία downstream κίνησης, το OLT διατηρεί την ONU σε ενεργό κατάσταση, θέτοντας τον χρόνο αναμονής/ύπνου  $T$  σε τιμή ίση με το μηδέν. Όταν η ONU ανιχνεύσει upstream κίνηση από τα UNI (User Network Interfaces), “ξυπνά” αμέσως από την κατάσταση αναμονής/ύπνου.

### ***B. Λειτουργία Ελέγχου ALR***

Η λειτουργία ελέγχου ALR καθιστά δυνατή τη χρήση πολύ λιγότερης ενέργειας με την απενεργοποίηση των μη χρησιμοποιούμενων λειτουργιών σε παρουσία χαμηλού ρυθμού κίνησης. Το σύστημα συνύπαρξης στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει δύο ρυθμούς downlink: 1G και 10G. Η λειτουργία ελέγχου ALR αλλάζει μεταξύ των downlink 1G και 10G, ανάλογα με την ποσότητα της κίνησης. Ένα παράδειγμα της ανταλλαγής μηνύματος για ALR απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



**Σχήμα 3.11:** Παράδειγμα ανταλλαγής μηνύματος για ALR έλεγχο.

Το OLT “παρακολουθεί” την downstream κίνηση για κάθε ONU και στέλνει ένα μήνυμα Αίτησης στην ONU για αλλαγή του ρυθμού downlink. Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται ότι το OLT καθορίζει τον downlink ρυθμό μεταγωγής, βάση της downstream κίνησης του εύρους ζώνης  $B$ .

Το μήνυμα Αίτησης περιλαμβάνει παραμέτρους ρυθμού σύνδεσης, δηλαδή ο downlink ρυθμός υπολογίζεται ως:

$$D = \begin{cases} 10G & \text{if } B \geq B_{th} \\ 1G & \text{if } B < B_{th} \end{cases}, \quad (2)$$

όπου  $B_{th}$  δηλώνεται το κατώφλι του downstream εύρους ζώνης. Το κατώφλι  $B_{th}$ , και ο χρόνος μετάβασης του downlink ρυθμού μεταγωγής  $T_t$  (ο οποίος έχει την ίδια τιμή, ως χρόνος μετάβασης στον έλεγχο ύπνου), είναι βασικές παράμετροι για τον έλεγχο ALR. Με τη λήψη του μηνύματος Αίτησης, η ONU στέλνει ένα μήνυμα ACK πίσω στο OLT. Η ONU τότε ενεργοποιεί/απενεργοποιεί τις λειτουργίες που απαιτούνται για την εφαρμογή του ρυθμού της νέας σύνδεσης.

### **Γ. Υβριδικός Μηχανισμός**

Ο υβριδικός μηχανισμός περιλαμβάνει τις λειτουργίες ελέγχου ύπνου και ALR (παράμετροι μηχανισμού). Οι ιδιότητες των παραμέτρων του εμφανίζονται στον Πίνακα 3.3.

	$B > B_{th}$ or $B = B_{th}$	$B < B_{th}$
$i < i_{th}$	$T=0$ and $D=10G$	$T=0$ and $D=1G$
$i > i_{th}$ or $i = i_{th}$	NA	$T=T_s$ and $D=1G$

**Πίνακας 3.3:** Ιδιότητες παραμέτρων υβριδικού μηχανισμού

Οι παράμετροι αυτοί προσδιορίζονται στο OLT και διαβιβάζονται στην ONU χρησιμοποιώντας μηνύματα Αίτησης. Χρησιμοποιείται ως παράδειγμα, downstream πλαίσιο διαστήματος  $i$  και εύρος ζώνης  $B$ , ως ερέθισμα αφύπνισης (ξυπνήματος) και ως ερέθισμα μεταγωγής downlink ρυθμού, αντίστοιχα. Σε λειτουργία SPW, η ONU ξυπνά με 1G downlink και ελέγχει περιοδικά για ύπαρξη downstream κίνησης [41].

#### 3.4.4 Αξιολόγηση απόδοσης

Αυτή η ενότητα περιγράφει τις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν για επιβεβαίωση της απόδοσης της εξοικονόμησης ενέργειας της λειτουργίας ελέγχου ύπνου, της λειτουργίας ελέγχου ALR, και του προτεινόμενου υβριδικού μηχανισμού.

##### A. Υποθέσεις

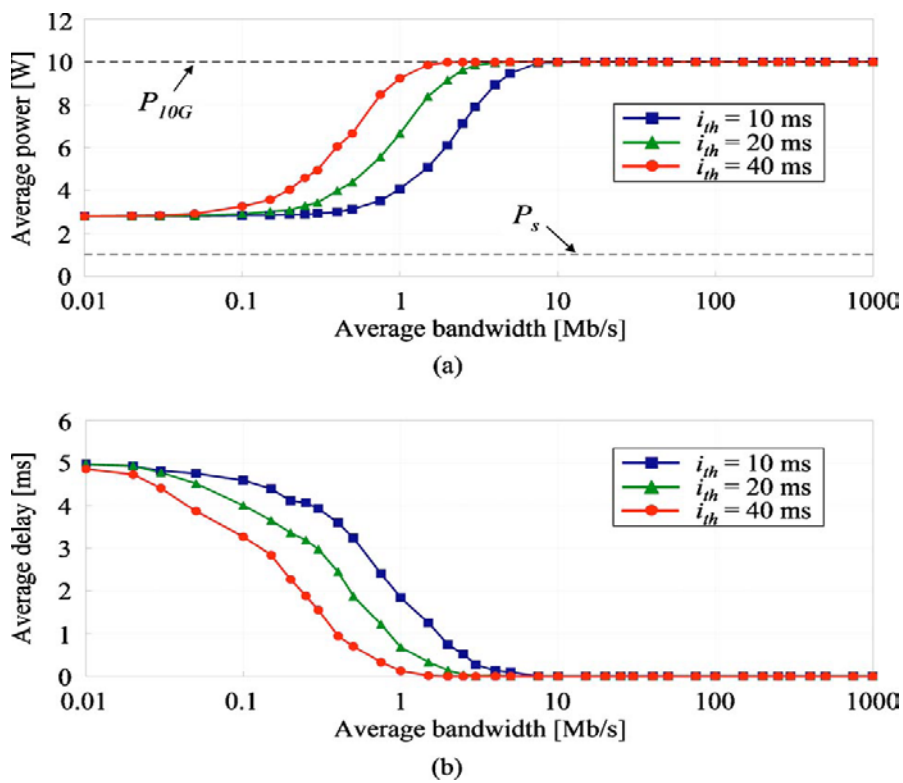
Σ' αυτό το άρθρο η κατανάλωση ενέργειας του πομπού και του δέκτη δεν λαμβάνεται υπόψη, επειδή θεωρείται ότι ο πομπός και ο δέκτης τοποθετούνται ταυτόχρονα σε κατάσταση ύπνου. Οι παράμετροι τέθηκαν με προσωρινές τιμές, επειδή το σύστημα 10G-EPON εξακολουθεί να είναι υπό ανάπτυξη και δεν είναι σαφές ποιες λειτουργίες είναι δυνατόν να βρεθούν σε κατάσταση "ύπνου". Η τιμή του προκαθορισμένου χρόνου αναμονής/ύπνου  $T_s$  είναι ένα παράδειγμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η κατανάλωση ενέργειας σε ενεργή κατάσταση 1G ορίστηκε σύμφωνα με την αναφορά [8], και οι άλλες παράμετροι σύμφωνα με την αναφορά [51]. Η κατανάλωση ενέργειας κάθε κατάστασης καθορίζεται από τις λειτουργίες που είναι ενεργές εκείνη τη στιγμή. Επιπρόσθετα, ο προκαθορισμένος χρόνος  $T_s$  ύπνου θα πρέπει να καθοριστεί με βάση τη μέγιστη αποδεκτή καθυστέρηση, η οποία μένει να διερευνηθεί.

Στις προσομοιώσεις, θεωρείται ότι υπάρχει μόνο downstream κίνηση των οποίων ο ρυθμός άφιξης ακολουθεί κατανομή Poisson. Επιπρόσθετα μόνο μια ONU συνδέεται στο OLT για να επιβεβαιώσει την επίδραση των συνθηκών κίνησης, στην απόδοση εξοικονόμησης ενέργειας σε μια ONU. Το μέγεθος του πλαισίου ορίστηκε στα 1250 bytes. Το μέγιστο downstream εύρος ζώνης για κάθε ONU σε downlink 1G ορίστηκε στα 100 Mb/s και το μέγιστο downstream εύρος

ζώνης για κάθε ONU σε downlink 10G ορίστηκε στο 1 Gb/s. Δεν παρουσιάστηκε απώλεια πλαισίου, δεδομένου ότι όλα τα downstream πλαίσια που έρχονται όταν η ONU δεν μπορεί να τα λάβει αυτά αποθηκεύονται προσωρινά (buffered) στο τερματικό OLT.

### B. Έλεγχος ύπνου

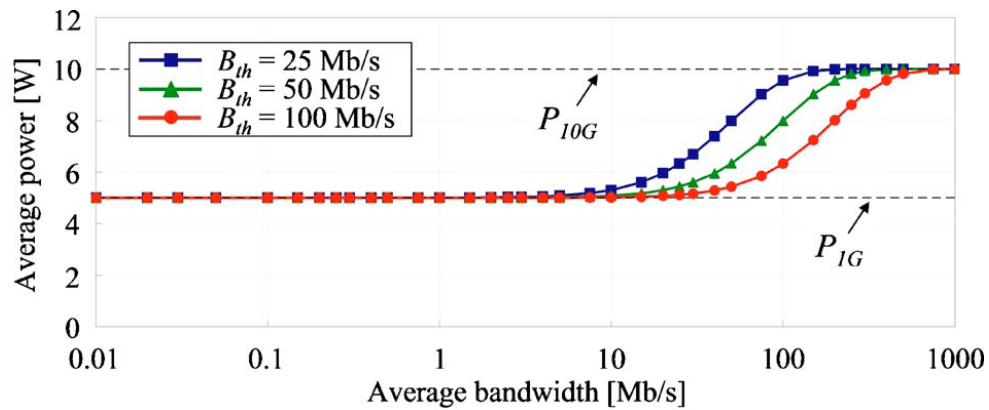
Η απόδοση της λειτουργίας ελέγχου ύπνου αξιολογείται ενώ μεταβάλλεται το κατώφλι του downstream πλαισίου διαστήματος  $i_{th}$ . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12. Η μέση κατανάλωση ενέργειας μιας μονάδας ONU με μόνο τη λειτουργία ελέγχου ύπνου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12 (α). Η μέση καθυστέρηση ουράς της downstream κίνησης στο OLT απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12 (β).



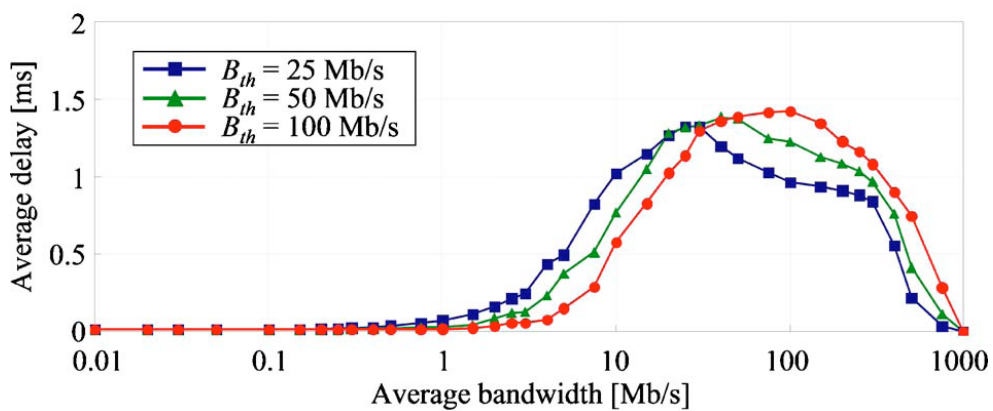
Σχήμα 3.12: Αποτελέσματα της προσομοίωσης (έλεγχος ύπνου)

### Γ. Έλεγχος ALR

Η απόδοση της λειτουργίας ελέγχου ALR αξιολογείται ενώ μεταβάλλεται το κατώφλι του downstream εύρους ζώνης Bth. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.13. Η μέση κατανάλωση ενέργειας της ONU με μόνο τη λειτουργία ελέγχου ALR, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13 (α). Η μέση καθυστέρηση ουράς αναμονής της downstream κίνησης στο OLT, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13 (β).



(a)

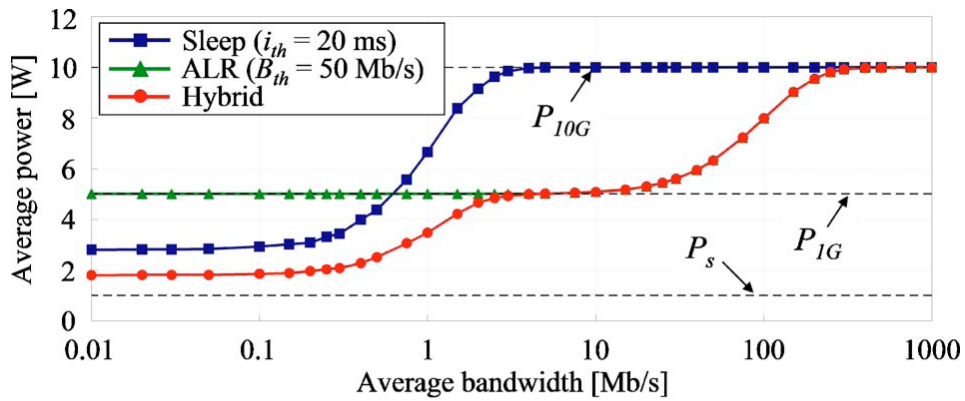


(b)

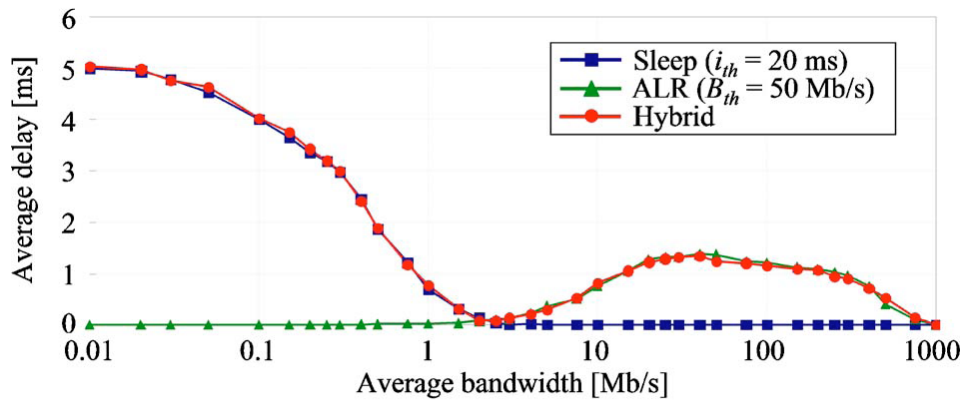
Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα της προσομοίωσης(έλεγχος ALR)

#### 4. Υβριδικός (Hybrid) Μηχανισμός

Η απόδοση του προτεινόμενου υβριδικού μηχανισμού συγκρίθηκε ανεξάρτητα με τις λειτουργίες ελέγχου του ύπνου και ALR. Οι παράμετροι τέθηκαν στις ίδιες τιμές με εκείνες των λειτουργιών ελέγχου του ύπνου και ALR. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.14. Η μέση κατανάλωση ενέργειας της ONU με υβριδικό μηχανισμό απεικονίζεται στο Σχήμα 3.14 (α). Η μέση καθυστέρηση ουράς αναμονής της downstream κίνησης στο OLT απεικονίζεται στο Σχήμα 3.14 (β) [41].



(a)

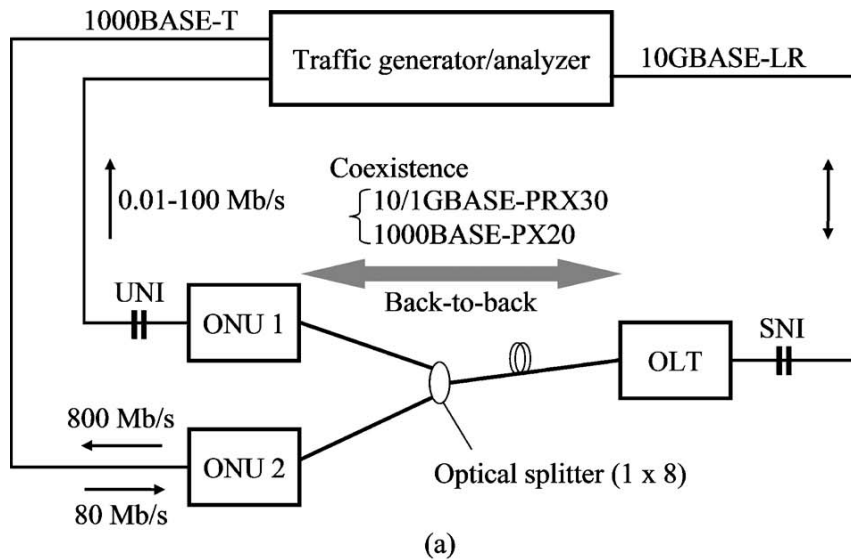


(b)

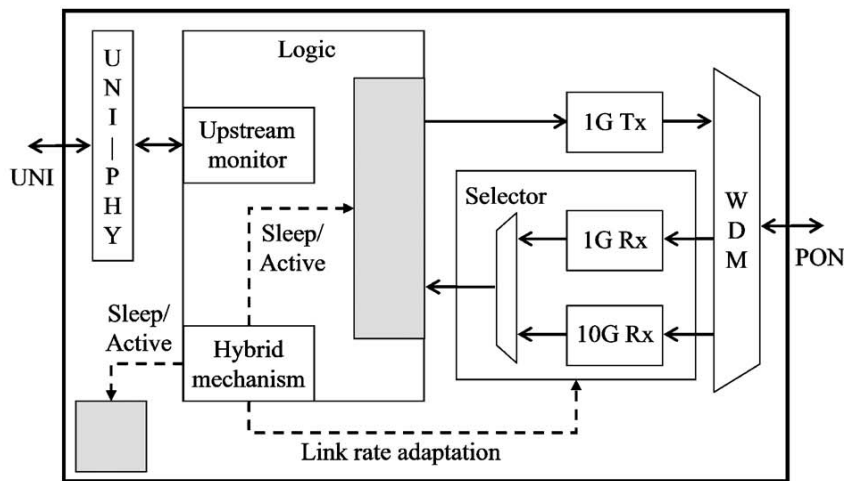
Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα της προσομοίωσης (υβριδικού μηχανισμού)

### 3.4.5 Πειραματική επαλήθευση

Το πειραματικό σύστημα περιλαμβάνει την κατάσταση μηχανισμού μετάβασης μαζί για τη λειτουργία ελέγχου του ύπνου και ALR. Ο σκοπός των πειραμάτων είναι η επιβεβαίωση της εφαρμογής της εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε λειτουργία. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15. Στο Σχήμα 3.15 (α) απεικονίζεται το συνολικό πειραματικό σύστημα, και στο Σχήμα 3.15 (β) απεικονίζεται το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα της ONU.



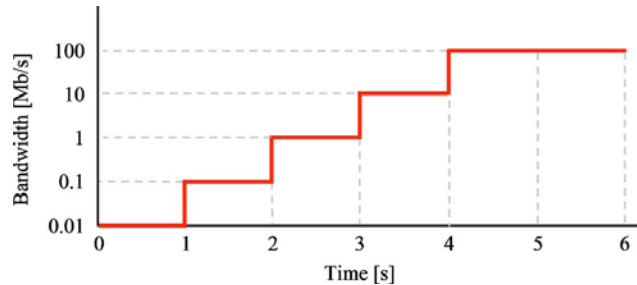
■ Sleep-capable function



Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη

Στη λειτουργία ελέγχου ύπνου και στον υβριδικό μηχανισμό, το κατώφλι  $i_{th}$  και ο προκαθορισμένος χρόνος ύπνου  $T_s$ , τέθηκαν σε 20 ms και 10 ms, αντίστοιχα. Στην λειτουργία ελέγχου ALR και στον υβριδικό μηχανισμό, το κατώφλι  $B_{th}$  ορίστηκε σε 50 Mb/s. Η κατάσταση μετάβασης ONU 1, σε σενάριο downstream κίνησης περιγράφεται στο Σχήμα 3.16. Επιπρόσθετα, η καθυστέρηση της downstream κίνησης για την ONU1, μετρήθηκε σε διάστημα 60s σε κάθε περίπτωση. Το μέγεθος του buffer στο OLT για κάθε ONU είναι 100Mbytes. Τα πλαίσια που εισέρχονται κατά τη διάρκεια του χρόνου ύπνου (10ms) μπορούν εξολοκλήρου να αποθηκευτούν. Η λειτουργία SPW παράγει δύο ειδών καθυστερήσεις ουράς αναμονής. Η πρώτη καθυστέρηση προκύπτει με την αποθήκευση των πλαισίων κατά τη διάρκεια της περιόδου του ύπνου. Η δεύτερη καθυστέρηση προκύπτει από την ανταλλαγή μηνυμάτων μετά την ενεργοποίηση της ONU. Η

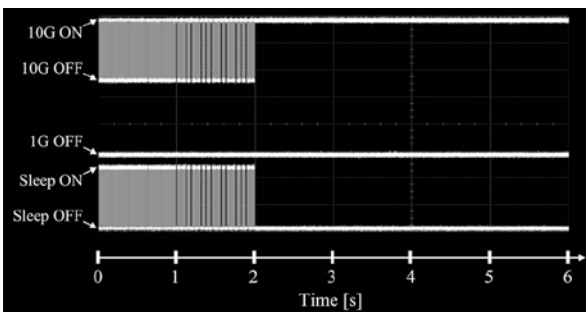
κρίσιμη τιμή της συνολικής καθυστέρησης ουράς αναμονής είναι ίση με το άθροισμα του χρόνου αναμονής/ύπνου και τη καθυστέρηση μετάδοσης τεσσάρων-διαδρομών για μηνύματα Request, Confirmation, Request και ACK.



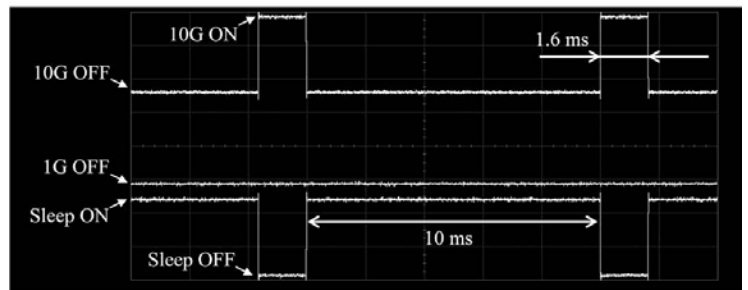
Σχήμα 3.16: Σενάριodownstream κίνησης

**Πειραματικά αποτελέσματα**

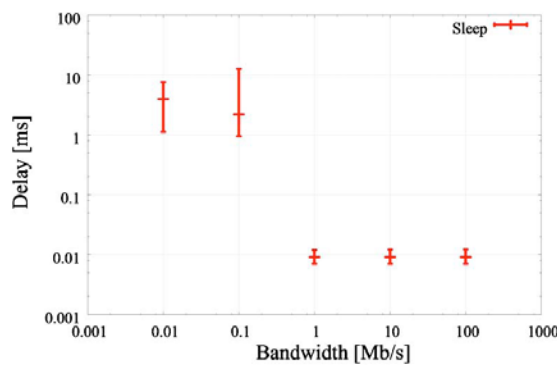
Στο Σχήμα 3.17 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τη λειτουργία ελέγχου ύπνου. Στο Σχήμα 3.17 (a) απεικονίζεται η κατάσταση μετάβασης της ONU 1, σύμφωνα με το σενάριο κίνησης που περιγράφεται στο Σχήμα 3.16. Το Σχήμα 3.17 (b) απεικονίζεται η προβολή της λειτουργίας SPW. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.17 (c) απεικονίζονται οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες καθυστερήσεις της downstream κίνησης για ONU 1.



(a)



(b)

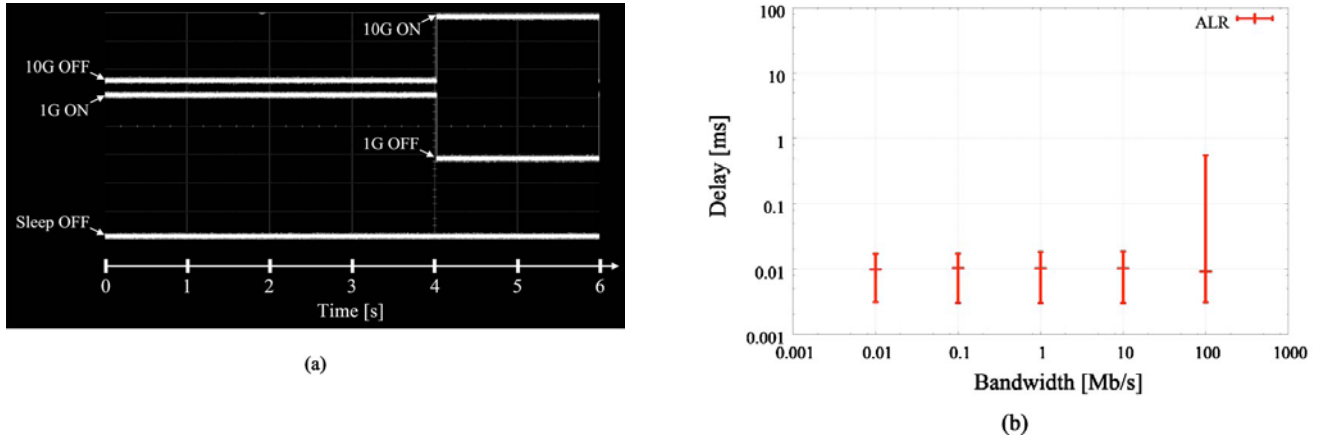


(c)

Σχήμα 3.17: Πειραματικά αποτελέσματα(έλεγχος ύπνου)

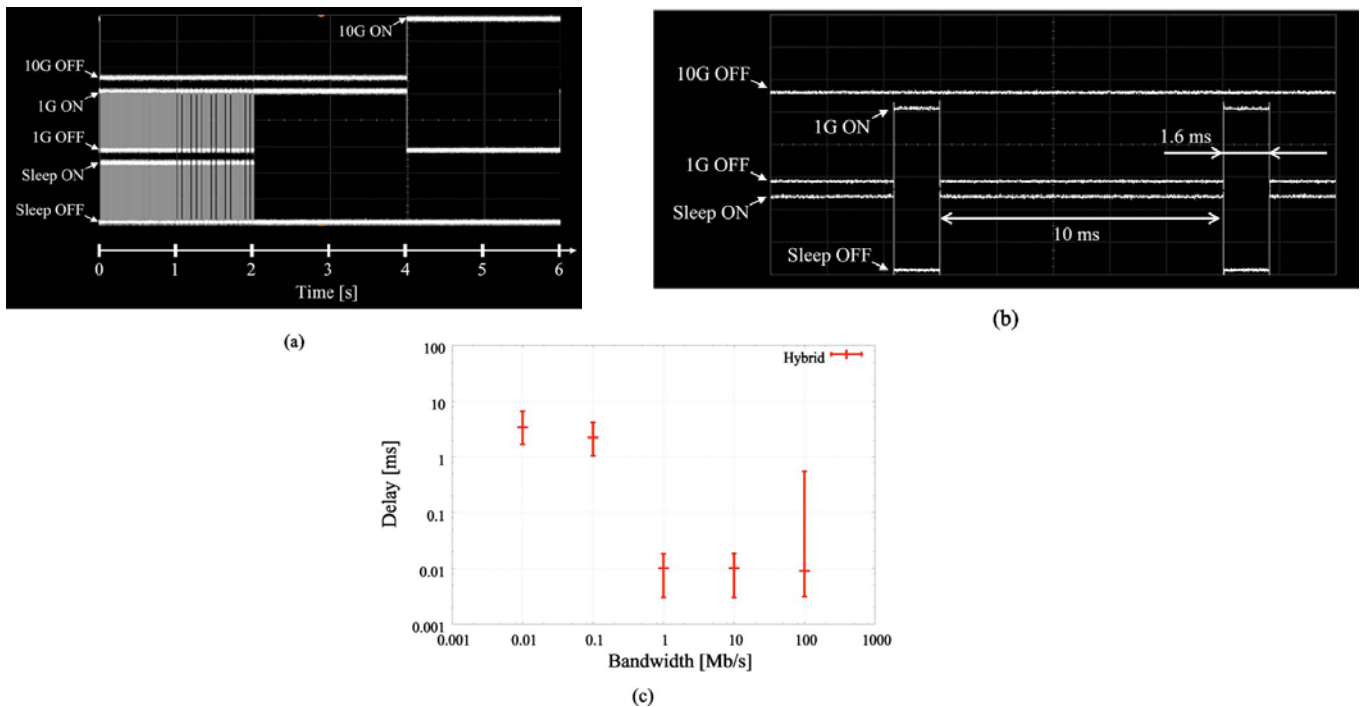


Στο Σχήμα 3.18 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τη λειτουργία ελέγχου ALR. Στο Σχήμα 3.18 (α) απεικονίζεται η κατάσταση μετάβαση της ONU 1, σύμφωνα με το σενάριο κίνησης που περιγράφεται στο Σχήμα 3.16. Στο Σχήμα 3.18 (β) απεικονίζεται η μέγιστη, ελάχιστη και μέση καθυστέρηση της downstream κίνησης για ONU 1.



**Σχήμα 3.18:** Πειραματικά αποτελέσματα(έλεγχος ALR)

Στο Σχήμα 3.19 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για το υβριδικό μηχανισμό. Στο Σχήμα 3.19 (α) απεικονίζεται η κατάσταση μετάβασης της ONU 1, σε σενάριο downstream κίνησης όπου περιγράφεται στο Σχήμα 3.16. Στο Σχήμα 3.19 (β) απεικονίζεται μία μεγεθυμένη όψη της λειτουργίας SPW. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.19 (c) απεικονίζεται η μέγιστη, ελάχιστη και μέση καθυστέρηση της downstream κίνησης για ONU 1 [41].



**Σχήμα 3.19:** Πειραματικά αποτελέσματα(υβριδικού μηχανισμού)

### **3.4.6 Σενάριο Υπηρεσίας**

Η ενεργειακή απόδοση σε σύστημα 10G-EPON μπορεί να οδηγήσει σε υποβιβασμό της ποιότητας υπηρεσίας, δεδομένου ότι η λειτουργία ελέγχου ύπνου δημιουργεί μεγάλη καθυστέρηση. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθούν μέτρα εναντίον αυτού του προβλήματος. Για απενεργοποίηση της λειτουργίας ελέγχου του ύπνου, σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, π.χ. υπηρεσία τηλεφώνου, αποτελεί μια από τις καλύτερες λύσεις. Για παράδειγμα, όταν η κίνηση είναι χαμηλής προτεραιότητας, η λειτουργία ελέγχου ύπνου ενεργοποιείται. Από την άλλη πλευρά, όταν υπάρχει υψηλής προτεραιότητας κίνηση, υπηρεσία σε πραγματικό χρόνο, η λειτουργία ελέγχου ύπνου απενεργοποιείται [41].

### **3.4.7 Συμπέρασμα**

Παραπάνω, έχει προταθεί ένας μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας συνδυάζοντας τις λειτουργίες ελέγχου ύπνου και ALR. Ο προτεινόμενος υβριδικός μηχανισμός εφαρμόστηκε σε ασύμμετρο 10G-EPON σύστημα. Αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο μηχανισμός αυτός απέδωσε περισσότερη αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας της ONU βασίζομενος στη σύγκριση των συνθηκών κίνησης με τις λειτουργίες κάθε στοιχείου σε απομόνωση, με βάρος τη μικρή αύξηση στην καθυστέρηση της ουράς αναμονής. Τα πειράματα έδειξαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου υβριδικού μηχανισμού [41].

## **4. Νέο Σχήμα Μείωσης Κατανάλωσης Ενέργειας για Παθητικά Οπτικά Δίκτυα τύπου 10G-EPON**

### **4.1 Εισαγωγή**

Το περιβάλλον μελέτης του νέου προτεινόμενου σχήματος, είναι ένα μονο-καναλικό 10G-EPON με μεταβαλλόμενο ρυθμό υποστηριζόμενων ONUs στην online έκδοση διαμοίρασης εύρους ζώνης. Το νέο σχήμα, χρησιμοποιεί με αποδοτικό τρόπο την ύπνωση των ONUs στην κατεύθυνση της εκπομπής (transmitter sleep), ώστε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας των μονάδων οπτικού δικτύου (Optical Network Units - ONUs), όταν υπάρχει έλλειψη δικτυακής κίνησης ή υπολειτουργία των συσκευών.

Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης που κατασκευάστηκε από την αρχή σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (event-driven programming). Ο μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας εμπνεύστηκε από τον τομέα έρευνας των Learning Automata. Τα συγκριτικά συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης. Οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs, αποδοτικότητα ενέργειας, μέση καθυστέρηση πακέτου και ρυθμοαπόδοση.

Στο κεφάλαιο αυτό, για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του, παρουσιάζεται αρχικά ένα αριθμητικό παράδειγμα για ένα 10G-EPON με online scheduling. Ακολουθεί η αναλυτική προσέγγιση και ανάπτυξη του νέου σχήματος, η αξιολόγηση της απόδοσης και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης και τέλος τα αποτελέσματα της σύγκρισης της απόδοσης του νέου σχήματος με ένα τυπικό σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας που υλοποιήθηκε για το σκοπό αυτό.

### **4.2 Αριθμητικό Παράδειγμα 10G-EPON (online scheduling)**

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το περιβάλλον υλοποίησης είναι ένα μονο-καναλικό 10G-EPON symmetric (10Gbps τόσο σε upstream όσο και σε downstream μετάδοση), που αποτελείται από τρεις ONUs (Optical Network Units), συνδεδεμένες σε ένα OLT (Optical Line Terminal), στην online έκδοση διαμοίρασης εύρους ζώνης (online scheduling). Σε ότι αφορά τους χρόνους μετάβασης και επιστροφής (Round Trip Time - RTT) και τα αιτήματα εύρους ζώνης της κάθε ONU (Bandwidth requests), ισχύουν τα παρακάτω δεδομένα:

<u>ONUs</u>	<u>RTT</u>	<u>Bandwidth request (bytes)</u>
ONU1	16 μsecs	4480 (first cycle) – 4160 (second cycle) – 3200 (third cycle)
ONU2	18 μsecs	3840 (first cycle) – 5120 (second cycle) – 2560 (third cycle)
ONU3	20 μsecs	5120 (first cycle) – 4800 (second cycle) – 5440 (third cycle)

Επίσης λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Η κάθε οπτική μονάδα δικτύου (ONU) δέχεται το πακέτο (πακέτο άφιξης), την χρονική στιγμή που λαμβάνει το μήνυμα GATE.
- Ο χρόνος προστασίας GUARD TIME είναι 0.5 μsec.
- Η μελέτη του σχήματος γίνεται για τρία συνεχόμενα GATE μηνύματα αποστολής από το οπτικό τερματικό γραμμής (OLT) προς κάθε ONU.

#### **A. 1ος κύκλος μετάδοσης – λήψης:**

Αρχικά το OLT αποστέλλει ένα μήνυμα GATE 64 bytes (αντιστοιχούν σε 0.0512μsec επειδή ο ρυθμός μετάδοσης είναι 10 Gbits/sec) στην ONU1. Η ONU1 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT1)/2 + \text{χρόνος αποστολής} = 16/2 + 0 = 8 \text{ μsec}$ . Τη στιγμή αυτή (8 μsec) δέχεται και ένα πακέτο 4480 bytes (πακέτο άφιξης). Η ONU1 τώρα μετά τη λήψη του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $8\text{μsec} + 0.0512$  (διάρκεια GATE) = 8.0512 μsec, αποστέλλει ένα μήνυμα REPORT 64 bytes (0.0512μsec) στο OLT και δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο που είχε δεχθεί μόλις πριν, δηλαδή 4480 bytes. Το OLT λαμβάνει το REPORT από την ONU1 τη χρονική στιγμή  $8.0512 + (RTT1)/2 = 8.0512 + 8 = 16.0512 \text{ μsec}$ .

Το OLT αμέσως μετά την αποστολή του GATE στην ONU1 αποστέλλει επίσης ένα μήνυμα GATE 64 bytes (0.0512μsec) στην ONU2, δηλαδή στα 0.0512 μsec. Η ONU2 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT2)/2 + \text{χρόνος αποστολής} = 18/2 + 0.0512 = 9.0512 \text{ μsec}$ . Τη στιγμή αυτή (9.0512 μsec) δέχεται και ένα πακέτο 3840 bytes (πακέτο άφιξης). Η ONU2 τώρα μετά τη λήψη του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $9.0512\text{μsec} + 0.0512$  (διάρκεια GATE) = 9.1024 μsec, αποστέλλει ένα μήνυμα REPORT 64 bytes (0.0512μsec) στο OLT και δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο που είχε δεχθεί μόλις πριν, δηλαδή 3840 bytes. Το OLT λαμβάνει το REPORT από την ONU2 τη χρονική στιγμή  $9.1024 + (RTT2)/2 = 9.1024 + 9 = 18.1024 \text{ μsec}$ .

Το OLT αμέσως μετά την αποστολή του GATE στην ONU2 αποστέλλει επίσης ένα μήνυμα GATE 64 bytes (0.0512μsec) στην ONU3, δηλαδή στα 0.1024 μsec. Η ONU3 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT3)/2 + \text{χρόνος αποστολής} = 20/2 + 0.1024 = 10.1024 \text{ μsec}$ . Τη στιγμή αυτή (10.1024 μsec) δέχεται και ένα πακέτο 5120 bytes (πακέτο άφιξης). Η ONU3 τώρα μετά τη λήψη του

GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $10.1024\mu\text{sec}+0.0512$  (διάρκεια GATE)= $10.1536 \mu\text{sec}$ , αποστέλλει ένα μήνυμα REPORT 64 bytes ( $0.0512\mu\text{sec}$ ) στο OLT και δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο που είχε δεχθεί μόλις πριν, δηλαδή 5120 bytes. Το OLT λαμβάνει το REPORT από την ONU3 τη χρονική στιγμή  $10.1536 + (\text{RTT3})/2 = 10.1536+10 =20.1536 \mu\text{sec}$ . Εδώ κλείνει και ο πρώτος κύκλος μετάδοσης – λήψης.

### **B. 2ος κύκλος μετάδοσης – λήψης:**

Στον δεύτερο τώρα κύκλο το OLT αμέσως μετά τη λήψη του REPORT από την ONU1 αποστέλλει εκ νέου ένα μήνυμα GATE προς αυτήν, δηλαδή την χρονική στιγμή, (αρχή λήψης + ολοκλήρωση λήψης) =  $16.0512 + 0.0512 = 16.1024 \mu\text{sec}$ . Η ONU1 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(\text{RTT1})/2+\text{χρόνος αποστολής}=16/2+16.1024 =8+16.1024=24.1024 \mu\text{sec}$ . Τη στιγμή αυτή ( $24.1024 \mu\text{sec}$ ) δέχεται και ένα πακέτο 4160 bytes ( 2ο πακέτο άφιξης). Η ONU1 τώρα μετά τη λήψη του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $24.1024\mu\text{sec}+0.0512$  (διάρκεια GATE)= $24.1536 \mu\text{sec}$ , αποστέλλει το πακέτο 4480 bytes που είχε δηλώσει στο προηγούμενο REPORT και ένα νέο μήνυμα REPORT 64 bytes ( $0.0512\mu\text{sec}$ ) στο OLT με το οποίο δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο των 4160 bytes. Δηλαδή (διάρκεια πακέτου + REPORT) =  $(4480*8)/(10*10^9) + 0.0512=3.584+0.0512=3.6352 \mu\text{sec}$ . Το OLT αρχίζει να λαμβάνει το πακέτο και το REPORT από την ONU1 τη χρονική στιγμή  $24.1536 +(\text{RTT1})/2=24.1536+8=32.1536 \mu\text{sec}$ . Η λήψη από την ONU1 ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $32.1536+3.6352=35.7888 \mu\text{sec}$ . Αν προστεθεί και ο χρόνος προστασίας (guard time = $0.5\mu\text{sec}$ ) τότε έχουμε  $35.7888+0.5=36.2888 \mu\text{sec}$ , που αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα που θα λάβει το OLT από την ONU που θα μεταδώσει στη συνέχεια, θα πρέπει να ξεκινούν μετά τα  $36.2888 \mu\text{sec}$ .

Το OLT αμέσως μετά τη λήψη του REPORT από την ONU2 αποστέλλει εκ νέου ένα μήνυμα GATE προς αυτήν, δηλαδή την χρονική στιγμή  $18.1024+0.0512=18.1536 \mu\text{sec}$ . Η ONU2 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(\text{RTT2})/2+\text{χρόνος αποστολής} =18/2+18.1536 =9+18.1536 =27.1536 \mu\text{sec}$ . Τη στιγμή αυτή ( $27.1536 \mu\text{sec}$ ) δέχεται και ένα πακέτο 5120 bytes ( 2ο πακέτο άφιξης). Η ONU2 τώρα μετά τη λήψη του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $27.1536\mu\text{sec}+0.0512$  (διάρκεια GATE)= $27.2048 \mu\text{sec}$ , δεν αποστέλλει αμέσως τα δεδομένα της (3840+REPORT) και αυτό γιατί  $27.2048+(\text{RTT2})/2=27.2048+9=36.2048 \mu\text{sec}$  ενώ το OLT μπορεί να λάβει δεδομένα από την ONU2 μετά τα  $36.2888 \mu\text{sec}$ . Συνεπώς θα πρέπει η μετάδοση της ONU2 να καθυστερήσει κατά  $36.2888-36.2048=0.084 \mu\text{sec}$  και να αρχίσει τη χρονική στιγμή  $27.2048+0.084=27.2888 \mu\text{sec}$ . Τα δεδομένα που στέλνει η ONU2 έχουν να κάνουν με το πακέτο 3840 bytes που είχε δηλώσει στο προηγούμενο REPORT και ένα νέο μήνυμα REPORT 64 bytes ( $0.0512\mu\text{sec}$ ) στο OLT με το

οποίο δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο των 5120 bytes. Δηλαδή (διάρκεια πακέτου + REPORT)  $= (3840 \cdot 8) / (10 \cdot 10^9) + 0.0512 = 3.072 + 0.0512 = 3.1232 \text{ msec}$ . Το OLT αρχίζει να λαμβάνει το πακέτο και το REPORT από την ONU2 τη χρονική στιγμή  $27.2888 + (RTT2)/2 = 27.2888 + 9 = 36.2888 \text{ msec}$ . Η λήψη από την ONU2 ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $36.2888 + 3.1232 = 39.412 \text{ msec}$ . Αν προστεθεί και ο χρόνος προστασίας (guard time = 0.5 msec) τότε έχουμε  $39.412 + 0.5 = 39.912 \text{ msec}$ , που αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα που θα λάβει το OLT από την ONU που θα μεταδώσει στη συνέχεια, θα πρέπει να ξεκινούν μετά τα 39.912 msec.

Το OLT αμέσως μετά τη λήψη του REPORT από την ONU3 αποστέλλει εκ νέου ένα μήνυμα GATE προς αυτήν, δηλαδή την χρονική στιγμή  $20.1536 + 0.0512 = 20.2048 \text{ msec}$ . Η ONU3 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT3)/2 + \text{χρόνος αποστολής} = 20/2 + 20.2048 = 10 + 20.2048 = 30.2048 \text{ msec}$ . Τη στιγμή αυτή (30.2048 msec) δέχεται και ένα πακέτο 4800 bytes ( 2ο πακέτο άφιξης). Η ONU3 τώρα με την ολοκλήρωση της λήψης του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $30.2048 \text{ msec} + 0.0512$  (διάρκεια GATE)  $= 30.256 \text{ msec}$ , μπορεί να αποστείλει αμέσως τα δεδομένα της (5120+REPORT) και αυτό γιατί  $30.256 + (RTT3)/2 = 30.256 + 10 = 40.256 \text{ msec}$  και το OLT μπορεί να λάβει δεδομένα από την ONU2 μετά τα 36.2888 msec. Τα δεδομένα που στέλνει η ONU3 έχουν να κάνουν με το πακέτο 5120 bytes που είχε δηλώσει στο προηγούμενο REPORT και ένα νέο μήνυμα REPORT 64 bytes (0.0512 msec) στο OLT με το οποίο δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο των 4800 bytes. Δηλαδή (διάρκεια πακέτου + REPORT)  $= (5120 \cdot 8) / (10 \cdot 10^9) + 0.0512 = 4.096 + 0.0512 = 4.1472 \text{ msec}$ . Το OLT αρχίζει να λαμβάνει το πακέτο και το REPORT από την ONU3 τη χρονική στιγμή  $27.2888 + (RTT3)/2 = 30.256 + 10 = 40.256 \text{ msec}$ . Η λήψη από την ONU2 ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $40.256 + 4.1472 = 44.4032 \text{ msec}$ . Αν προστεθεί και ο χρόνος προστασίας (guard time = 0.5 msec) τότε έχουμε  $44.4032 + 0.5 = 44.9032 \text{ msec}$ , που αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα που θα λάβει το OLT από την ONU που θα μεταδώσει στη συνέχεια, θα πρέπει να ξεκινούν μετά τα 44.9032 msec.

Εδώ κλείνει και ο δεύτερος κύκλος μετάδοσης – λήψης.

### Γ. 3ος κύκλος μετάδοσης – λήψης:

Στον τρίτο τώρα κύκλο το OLT αμέσως μετά τη λήψη των δεδομένων (4480+REPORT) από την ONU1 αποστέλλει εκ νέου ένα μήνυμα GATE προς αυτήν, δηλαδή την χρονική στιγμή 35.7888 msec. Η ONU1 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT1)/2 + \text{χρόνος αποστολής} = 16/2 + 35.7888 = 8 + 35.7888 = 43.7888 \text{ msec}$ . Τη στιγμή αυτή (43.7888 msec) δέχεται και ένα πακέτο 3200 bytes ( 3ο πακέτο άφιξης). Η ONU1 τώρα με την ολοκλήρωση της λήψης του GATE, δηλαδή τη χρονική

στιγμή  $43.7888+0.0512$  (διάρκεια GATE) = 43.84 msec, μπορεί να αποστείλει αμέσως τα δεδομένα της (4160+REPORT) και αυτό γιατί  $43.84+(RTT1)/2=43.84+8=51.84$  msec και το OLT μπορεί να λάβει δεδομένα από την ONU2 μετά τα 44.9032 msec.

Τα δεδομένα που στέλνει η ONU1 έχουν να κάνουν με το πακέτο 4160 bytes που είχε δηλώσει στο προηγούμενο REPORT και ένα νέο μήνυμα REPORT 64 bytes (0.0512msec) στο OLT με το οποίο δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο των 3200 bytes. Δηλαδή, (διάρκεια πακέτου + REPORT) =  $(4160*8)/(10*10^9) + 0.0512 = 3.328 + 0.0512 = 3.3792$  msec. Το OLT αρχίζει να λαμβάνει το πακέτο και το REPORT από την ONU1 τη χρονική στιγμή  $43.84+(RTT1)/2=43.84+8=51.84$  msec. Η λήψη από την ONU1 ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $51.84 + 3.3792 = 55.2192$  msec. Αν προστεθεί και ο χρόνος προστασίας (guard time = 0.5msec) τότε έχουμε  $55.2192 + 0.5 = 55.7192$  msec, που αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα που θα λάβει το OLT από την ONU που θα μεταδώσει στη συνέχεια, θα πρέπει να ξεκινούν μετά τα 55.7192 msec.

Το OLT αμέσως μετά τη λήψη των δεδομένων (3840+REPORT) από την ONU2 αποστέλλει εκ νέου ένα μήνυμα GATE προς αυτήν, δηλαδή την χρονική στιγμή 39.412 msec. Η ONU2 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT2)/2+\text{χρόνος αποστολής}=18/2+39.412 = 9+39.412 = 48.412$  msec. Τη στιγμή αυτή (48.412 msec) δέχεται και ένα πακέτο 2560 bytes ( 3ο πακέτο άφιξης). Η ONU2 τώρα με την ολοκλήρωση της λήψης του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $48.412+0.0512$  (διάρκεια GATE) = 48.4632 msec, μπορεί να αποστείλει αμέσως τα δεδομένα της (5120+REPORT) και αυτό γιατί  $48.4632+(RTT2)/2=48.4632+9=57.4632$  msec και το OLT μπορεί να λάβει δεδομένα από την ONU2 μετά τα 55.9172 msec.

Τα δεδομένα που στέλνει η ONU2 έχουν να κάνουν με το πακέτο 5120 bytes που είχε δηλώσει στο προηγούμενο REPORT και ένα νέο μήνυμα REPORT 64 bytes (0.0512msec) στο OLT με το οποίο δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο των 2560 bytes. Δηλαδή, (διάρκεια πακέτου + REPORT) =  $(5120*8)/(10*10^9) + 0.0512 = 4.096 + 0.0512 = 4.1472$  msec. Το OLT αρχίζει να λαμβάνει το πακέτο και το REPORT από την ONU2 τη χρονική στιγμή  $48.4632+(RTT2)/2=48.4632+9=57.4632$  msec. Η λήψη από την ONU2 ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $57.4632 + 4.1472 = 61.6104$  msec. Αν προστεθεί και ο χρόνος προστασίας (guard time = 0.5msec) τότε έχουμε  $61.6104 + 0.5 = 62.1104$  msec, που αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα που θα λάβει το OLT από την ONU που θα μεταδώσει στη συνέχεια, θα πρέπει να ξεκινούν μετά τα 62.1104 msec.

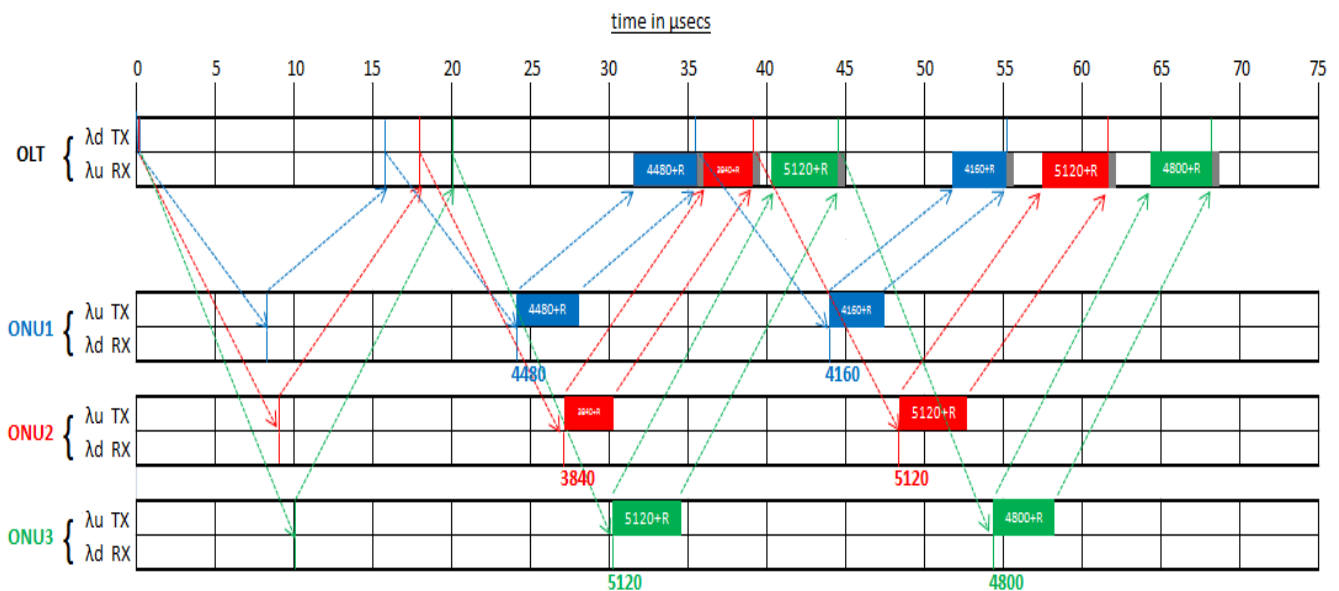
Το OLT αμέσως μετά τη λήψη των δεδομένων (5120+REPORT) από την ONU3 αποστέλλει εκ νέου ένα μήνυμα GATE προς αυτήν, δηλαδή την χρονική στιγμή 44.4032 msec. Η ONU3 λαμβάνει το μήνυμα σε χρόνο  $(RTT3)/2+\text{χρόνος αποστολής}=20/2+44.4032 = 10+44.4032 = 54.4032$  msec.

Τη στιγμή αυτή (54.4032 μsec) δέχεται και ένα πακέτο 5440 bytes ( 3ο πακέτο άφιξης). Η ONU3 τώρα με την ολοκλήρωση της λήψης του GATE, δηλαδή τη χρονική στιγμή 54.4032+0.0512 (διάρκεια GATE) = 54.4544 μsec, μπορεί να αποστείλει αμέσως τα δεδομένα της (4800+REPORT) και αυτό γιατί  $54.4544 + (RTT3)/2 = 54.4544 + 10 = 64.4544$  μsec και το OLT μπορεί να λάβει δεδομένα από την ONU2 μετά τα 62.1104 μsec.

Τα δεδομένα που στέλνει η ONU3 έχουν να κάνουν με το πακέτο 4800 bytes που είχε δηλώσει στο προηγούμενο REPORT και ένα νέο μήνυμα REPORT 64 bytes (0.0512μsec) στο OLT με το οποίο δηλώνει ότι έχει προς αποστολή το πακέτο των 5440 bytes. Δηλαδή, (διάρκεια πακέτου + REPORT) =  $(4800*8)/(10*10^9) + 0.0512 = 3.84 + 0.0512 = 3.8912$  μsec. Το OLT αρχίζει να λαμβάνει το πακέτο και το REPORT από την ONU3 τη χρονική στιγμή  $54.4544 + (RTT3)/2 = 54.4544 + 10 = 64.4544$  μsec. Η λήψη από την ONU3 ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $64.4544 + 3.8912 = 68.3456$  μsec. Αν προστεθεί και ο χρόνος προστασίας (guard time = 0.5μsec) τότε έχουμε  $68.3456 + 0.5 = 68.8456$  μsec, που αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα που θα λάβει το OLT από την ONU που θα μεταδώσει στη συνέχεια, θα πρέπει να ξεκινούν μετά τα 68.8456 μsec.

Εδώ κλείνει και ο τρίτος κύκλος μετάδοσης – λήψης.

Η γραφική απεικόνιση του παραπάνω παραδείγματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4.1:** Γραφική απεικόνιση παραδείγματος μονο-καναλικού 10G-EPON (online scheduling) με ένα OLT και τρεις ONU.



#### Δ. Υπολογισμός μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay)

Για τον υπολογισμό της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) βρίσκουμε τη διαφορά ανάμεσα στο χρόνο ολοκλήρωσης λήψης στο OLT και στο χρόνο άφιξης στην ONU για κάθε πακέτο χωριστά:

$$\text{ONU1 (4480 B)} : (35.7888 - 0.0512)\mu\text{sec} - 8\mu\text{sec} = 27.7376\mu\text{sec}$$

$$\text{ONU1 (4160 B)} : (55.2192 - 0.0512)\mu\text{sec} - 24.1024\mu\text{sec} = 31.0656\mu\text{sec}$$

$$\text{ONU2 (3840 B)} : (39.412 - 0.0512)\mu\text{sec} - 9.0512\mu\text{sec} = 30.3096\mu\text{sec}$$

$$\text{ONU2 (5120 B)} : (61.6104 - 0.0512)\mu\text{sec} - 27.1536\mu\text{sec} = 34.4056\mu\text{sec}$$

$$\text{ONU3 (5120 B)} : (44.4032 - 0.0512)\mu\text{sec} - 10.1024\mu\text{sec} = 34.2496\mu\text{sec}$$

$$\text{ONU3 (4800 B)} : (68.3456 - 0.0512)\mu\text{sec} - 30.2048\mu\text{sec} = 38.0896\mu\text{sec}$$

οπότε θα έχουμε:

$$\text{Mean packet delay} = (27.7376 + 31.0656 + 30.3096 + 34.4056 + 34.2496 + 38.0896) / 6 \Rightarrow$$

$$\text{Mean packet delay} = 195.8576 / 6 = 32.6429 \mu\text{sec}$$

#### Ε. Υπολογισμός ρυθμοαπόδοσης δικτύου (network throughput):

Υπολογίζουμε σε πόσα μsec αντιστοιχεί το κάθε πακέτο που στάλθηκε από τις ONU:

$$\text{ONU1 (4480 B)} : 3.584 \mu\text{sec}$$

$$\text{ONU1 (4160 B)} : 3.328 \mu\text{sec}$$

$$\text{ONU2 (3840 B)} : 3.072 \mu\text{sec}$$

$$\text{ONU2 (5120 B)} : 4.096 \mu\text{sec}$$

$$\text{ONU3 (5120 B)} : 4.096 \mu\text{sec}$$

$$\text{ONU3 (4800 B)} : 3.840 \mu\text{sec}$$

Η λήψη του τελευταίου πακέτου ολοκληρώθηκε τη χρονική στιγμή  $68.3456 - 0.0512 = 68.2944$  μsec.

Έχουμε ένα κανάλι μετάδοσης επομένως θα είναι:

$$(3.584 + 3.328 + 3.072 + 4.096 + 4.096 + 3.840) / 68.2944 = 22.016 / 68.2944 = 0.32237$$

Η ρυθμοαπόδοση του δικτύου θα είναι:

$$\text{Network throughput} = 0.32237 * 10 \text{ Gbps} = 3.2237 \text{ Gbps}$$

### **4.3 Αναλυτική προσέγγιση και ανάπτυξη του νέου σχήματος**

#### **4.3.1 Πεδίο εφαρμογής και κίνητρο**

Το νέο αυτό προτεινόμενο σχήμα ενεργειακής απόδοσης στοχεύει στην ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού “πράσινου” 10G-EPON χωρίς όμως να επηρεάζεται η απόδοση του σε σχέση με την κίνηση που αυτό εξυπηρετεί. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την τοποθέτηση συνειδητά ενός τμήματος του ενεργού οπτικού εξοπλισμού σε κατάσταση ύπνωσης. Ωστόσο η πλήρης ύπνωση, δηλαδή η απενεργοποίηση τόσο του πομπού όσο και του δέκτη της ONU την καθιστά εντελώς “τυφλή” δεδομένου ότι η ONU δεν γνωρίζει την εισερχόμενη κίνηση προς αυτήν (downstream direction). Εξαιτίας αυτού η τεχνική της πλήρους ύπνωσης δεν προτείνεται προκειμένου να αποφευχθεί η υποβάθμιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών (Quality of Service – QoS). Κατά συνέπεια αυτή η εργασία εστιάζει στην ύπνωση στην κατεύθυνση της εκπομπής, η οποία εφαρμόζεται όταν δεν παρατηρείται upstream κίνηση. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) όπως είναι γνωστό αποτελούνται από ένα παθητικό στοιχείο τον διαχωριστή (splitter), ο οποίος δεν καταναλώνει ενέργεια και από δύο τύπους ενεργών εξαρτημάτων τις ONUs και το OLT. Για το OLT είναι πολύ σημαντικό να βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία αφού αυτό έχει τον έλεγχο όλου του δικτύου. Από την άλλη πλευρά μια ONU από μόνη της, διαχειρίζεται μόνο μια ομάδα συνδρομητών και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και έναν μόνο συνδρομητή. Επομένως είναι ενδιαφέρον να εξετασθεί η περίπτωση κατά την οποία μια σειρά από αδρανείς ONUs θα μπορούσαν να τεθούν σε αναμονή κάτω από ειδικές συνθήκες κίνησης. Εκτιμάται ότι σε κατάσταση ύπνωσης η κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσε να μειωθεί ακόμη και κατά 90% [51]. Επιπροσθέτως οι υπάρχουσες εμπορικά διαθέσιμες ONUs περιλαμβάνουν την κατάσταση TX\_DISABLE η οποία απενεργοποιεί τον πομπό της ONU [60]. Από αυτές τις παρατηρήσεις προκύπτει ότι ένα εκλεπτυσμένο σχήμα διαχείρισης ενέργειας θα μπορούσε να είναι αποτελεσματικό θέτοντας συνειδητά τις ελεύθερες ONUs σε κατάσταση ύπνωσης.

#### **4.3.2 Αλγόριθμος διαχείρισης της ενέργειας (Energy Management Algorithm)**

Το προτεινόμενο σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας εμπνεύστηκε από το αυτόματο μάθησης (Learning Automaton) με επίγνωση σφάλματος, το οποίο μέσω αμφίδρομης ανταλλαγής πληροφοριών με το περιβάλλον, είναι σε θέση να προσδιορίσει τον χρόνο από τη στιγμή που οι ONUs δεν θα έχουν δεδομένα για μετάδοση δηλαδή θα είναι αδρανείς μέχρι την στιγμή που θα έχουν δεδομένα προς μετάδοση, δηλαδή τον χρόνο που μπορούν να τεθούν σε κατάσταση μερικής ύπνωσης. Το σχεδιασμένο εργαλείο εκμάθησης προέρχεται από τον τομέα έρευνας των Learning

Automata και επεξεργάζεται κατάλληλα την ανατροφοδότηση που λαμβάνεται μαζί με τις καταγραφές προηγούμενων δράσεων.

Ένα αυτόματο μάθησης (Learning Automaton – LA), είναι μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που αλληλεπιδρά με ένα στοχαστικό περιβάλλον και προσπαθεί να μάθει τη βέλτιστη δράση που προσφέρεται από το περιβάλλον μέσω μιας διαδικασίας μάθησης. Το LA έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε αρκετά προβλήματα, όπως η αναγνώριση προτύπων, η προσαρμοστική ταξινόμηση, η δικτύωση δεδομένων και πρωτοκόλλων, παρουσιάζοντας αποδοτική λειτουργία και αποτελεσματική υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε δυναμικά περιβάλλοντα [61][62][63][64]. Υπάρχει μια αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του περιβάλλοντος και της μονάδας του LA. Συγκεκριμένα το LA δρα επιλέγοντας μια συγκεκριμένη δράση από ένα σύνολο πιθανών δράσεων και το περιβάλλον αντιδρά με τα μέτρα που λαμβάνονται δημιουργώντας μια ανατροφοδότηση (feedback). Η ανατροφοδότηση η οποία ελέγχει τη συμπεριφορά του LA, λαμβάνεται από το LA και επεξεργάζεται κατάλληλα έτσι ώστε να καθορίσει την επόμενη ενέργεια [65].

Το LA κληρονομεί την προσαρμοστική φύση του από την ενίσχυση της μάθησης στον τομέα της έρευνας, όπου μια μαθησιακή διαδικασία λαμβάνει χώρα για την επίτευξη της βέλτιστης κατάστασης με βάση ορισμένα κριτήρια μέσα σε ένα στοχαστικό περιβάλλον [65]. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας το περιβάλλον εκπροσωπείται από την πραγματική χρονική διάρκεια στην οποία μια ONU δεν έχει δεδομένα για αποστολή, ενώ το εύρος δράσεων εκφράζεται από το σύνολο όλων των πιθανών τιμών χρονικής διάρκειας στις οποίες μια ONU μπορεί να είναι σε αδράνεια. Η παραγόμενη ανατροφοδότηση τροφοδοτείται στην ενότητα του LA, υποστηρίζοντας την μαθησιακή διαδικασία προς την κατεύθυνση της βέλτιστης δράσης, ενώ σχετίζεται με το ρυθμό σφάλματος της αναληφθείσας δράσης προκειμένου να προσαρμόσει περαιτέρω την ταχύτητα σύγκλισης του LA.

Το LA χρησιμοποιείται σε αυτό το νέο σχήμα για να καθορίσει το χρονικό διάστημα στο οποίο κάθε φορά μια ONU (δηλαδή το τμήμα εκπομπής της) θα τίθεται σε κατάσταση αναμονής. Το κύριο κριτήριο για την έκδοση της απόφασης είναι το προφίλ της κίνησης των ONUs. Μια ONU με άδειο buffer στέλνει ένα τυπικό κενό μήνυμα REPORT στο OLT για να το ενημερώσει ότι δεν έχει δεδομένα για αποστολή. Στην αντίθετη περίπτωση η ONU στέλνει μαζί με το REPORT και τα δεδομένα στο OLT. Το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που η ONU δεν έχει δεδομένα για αποστολή μέχρι τη στιγμή που αυτή θα έχει δεδομένα είναι το διάστημα που η ONU μπορεί να τεθεί σε κατάσταση μερικής ύπνωσης. Αυτός ο χρόνος λαμβάνεται κάθε φορά από το LA και ενημερώνει το learning κομμάτι του αλγορίθμου για την πραγματική κατάσταση των ONUs. Ο

αλγόριθμος όμως έχει και το estimating κομμάτι το οποίο προηγείται πάντα από το learning. Το κομμάτι αυτό στην ουσία, βάσει πιθανοτήτων και σε συνδυασμό με τις πληροφορίες που παίρνει από το learning κομμάτι, μέσα από ένα σύνολο πιθανών τιμών (το εύρος των τιμών των χρόνων “ύπνου” των ONUs), αποδίδει κάθε φορά την εκτιμώμενη τιμή για το χρόνο ύπνωσης. Επειδή το estimating κομμάτι προηγείται από το learning κομμάτι υπάρχει μία απόκλιση της πραγματικής τιμής του χρονικού διαστήματος ύπνωσης από την εκτιμώμενη, που αρχικά και μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει είναι μεγαλύτερη και σταδιακά τείνει να εξισορροπηθεί. Η απόκλιση αυτή αποτελεί και το ρυθμό σφάλματος του μοντέλου ο οποίος υπολογίζεται κάθε φορά και είναι ίσος με την απόλυτη τιμή της διαφοράς της πραγματικής από την εκτιμώμενη τιμή διά του συνόλου των τιμών που μπορούν ληφθούν.

Συνοψίζοντας λοιπόν ο αλγόριθμος κάθε φορά εκτιμά και αποδίδει στο σύστημα μέσα από ένα εύρος τιμών χρόνου “ύπνου” για κάθε ONU μια estimating τιμή, την οποία λαμβάνει βάσει πιθανοτήτων σε συνδυασμό με την πληροφορία για την πραγματική τιμή του χρόνου ύπνωσης για κάθε ONU. Αρχικά μπορεί να υπάρξει απόκλιση μεταξύ πραγματικής και εκτιμώμενης τιμής, αλλά σταδιακά η λειτουργία του συστήματος εξισορροπείται. Ταυτόχρονα ο αλγόριθμος υπολογίζει και το ρυθμό σφάλματος του μοντέλου του οποίου οι τιμές θα πρέπει να βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ του 0 και του 1. Όσο ο ρυθμός σφάλματος είναι πιο κοντά στο μηδέν τόσο πιο αξιόπιστο είναι το σύστημα.

Ο αλγόριθμος παρακάτω περιγράφει την προαναφερθείσα λογική όπου  $m$  είναι το πλήθος των τιμών του εύρους των χρονικών διαστημάτων ύπνου:

#### Αλγόριθμος σχήματος εξοικονόμησης ενέργειας

- 1: Set the array of probabilities table (p) equal to “ $1/m$ ” and the array of probabilities sum (psum) equal to “0”
- 2: Set the variable  $L = 0.1$ ;
- 3: Initialize the arrays: learning\_time, estimating\_time, wake\_time, sleep\_time
- 4: **FOR** each cycle
- 5:     **IF** ONU is active **THEN**
- 6:         OLT polls ONU
- 7:         **IF** ONU returns empty REPORT **THEN**
- 8:             ONU is set to sleep state
- 9:         **ELSE**
- 10:             learning\_time;

```

11:     END_IF
12: END_IF
13:  i = 1; S = 0; R = rand;
14:  WHILE (R > S and i <= m)
15:      S = S + p(i);
16:      estimating_time = i;
17:      i = i+1
18: END_WHILE
19:  FOR ( i = 1 : m )
20:      IF i ~= learning_time THEN
21:          psum = psum + p(i);
22:      END_IF
23:  END_FOR
24:  FOR ( i = 1 : m )
25:      IF i = learning_time THEN
26:          p(i) = p(i) + L*psum;
27:      ELSE
28:          p(i) = p(i) - L*p(i);
29:      END_IF
30:  END_FOR
31:  WHILE (wake_time >= time and ONU is into sleep state)
32:      ONU is set to active state
33:      sleep_time = estimating_time;
34:  END_WHILE
35: END_FOR

```

#### 4.3.3 Ανάπτυξη και βασικά σημεία του κώδικα

Η υλοποίηση του εργαλείου της προσομοίωσης έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (event-driven programming). Το περιβάλλον μελέτης στο οποίο βασίστηκε η υλοποίηση είναι ένα μονο-καναλικό 10G-EPON με μεταβαλλόμενο ρυθμό υποστηριζόμενων ONUs στην online έκδοση διαμοίρασης εύρους ζώνης, πάνω στο οποίο προσαρμόστηκε ο μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας (Learning Automata). Πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση δύο βασικών συναρτήσεων (functions) που η διαφορά τους στην

ουσία είναι ο τρόπος δημιουργίας κίνησης στο δίκτυο. Στην πρώτη συνάρτηση η παραγωγή κίνησης υλοποιείται με κατανομή Poisson με χρήση της `exprnd`, ενώ στη δεύτερη η κίνηση παράγεται με τη βοήθεια ενός πίνακα που δημιουργείται από ξεχωριστά αρχεία κίνησης τύπου `.txt`, ένα για κάθε ONU (βλ. Εικόνα 4.1). Ο αριθμός των αρχείων από τα οποία δημιουργείται ο πίνακας κίνησης είναι ανάλογος του αριθμού των ONUs που επιλέγονται κάθε φορά από τη συνάρτηση.

```
%Εισαγωγή κίνησης για κάθε ONU από αρχεία κίνησης τύπου .txt
Total_Arrivals_O=[];
Number_of_Packets_O=100000;
for counter1=1:N
    test_string=int2str(counter1);
    test_string=strcat('O',test_string);
    Filename=strcat(test_string,'.txt');
    %sprintf('File %s has opened', Filename)
    fid=fopen(Filename,'r');
    A=fscanf(fid,'%g',3*Number_of_Packets_O);
    B=reshape(A,3,Number_of_Packets_O);
    C=B.';
    for i=1:Number_of_Packets_O
        for j=1:3
            Total_Arrivals_O(counter1,i,j)=C(i,j);
        end
    end
    %Total_Arrivals_O
    fclose(fid);
    %sprintf('File %s has closed', Filename)
end
```

**Εικόνα 4.1:** Εισαγωγή κίνησης για κάθε ONU από αρχεία κίνησης τύπου `.txt`

Ο κώδικας της προσομοίωσης αναπτύσσεται σε έξι γεγονότα. Ξεκινά με την αρχικοποίηση όλων των μεταβλητών (βλ. Εικόνα 4.2) και των πινάκων καθώς και τη δημιουργία του πίνακα γεγονότων και χρόνου (βλ. Εικόνα 4.3).

```

%Αρχικοποίηση μεταβλητών Learning Automata
ONU_estimating_time=[];
ONU_estimating_time=zeros(1,N);
probabilities_table=[];
|for g=1:N
|for i=1:2001
    probabilities_table(g,i)=1/2001;
·end
·end
coefficient_L=0.1;
probabilities_sum=[];
probabilities_sum=zeros(1,N);
model_error=0;
mean_model_error=0;
counter1=1;

%Αρχικοποίηση μεταβλητών
lambda =10^3; %Μέση τιμή κατανομής Poisson
c = 3*(10^8); %Ταχύτητα φωτός (m/s)
Q_size = 10048; %μήκος ουρών αναμονής (bytes)
data_rate = 10*(10^9); %Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων(bits/sec)
grant_window = 10000; %Κάθε μήνυμα REPORT μπορεί να δηλώσει μέχρι 10000 Bytes για κάθε οπτική μονάδα δικτύου.
guard_time = 0.5*(10^-6); %Χρόνος φύλαξης = 0,5 μsec
simulation_time = T; %χρόνος προσομοίωσης

```

**Εικόνα 4.2:** Αρχικοποίηση μεταβλητών

Σε αυτό το κομμάτι στην αντίστοιχη συνάρτηση, περιλαμβάνεται και ο κώδικας για την εισαγωγή κίνησης από αρχεία. Οι αποστάσεις των ONUs μπορούν να υπολογιστούν με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα από 1000 ως 20000 μέτρα αλλά για καλύτερα αποτελέσματα στις μετρήσεις απόδοσης γίνεται εκ των προτέρων ο υπολογισμός των αποστάσεων τους στον κώδικα και αυτό ισχύει μέχρι 30 ONUs και εντάσσεται σε αυτό το κομμάτι κώδικα.

```

%Δημιουργία πίνακα γεγονότων και χρόνου
%1η Γραμμή: Τύπος Γεγονότος
%2η Γραμμή: Χρόνος πραγματοποίησης του γεγονότος
%3η Γραμμή: Id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
event_list=[];
%Αρχικοποίηση του event_list
event_list=zeros(3,(2*N)+1);

event_list(1,1:N)=1; %Ορισμός για κάθε σταθμό ενός αρχικού γεγονότος παραγωγής πλαισίων για κάθε ONU
event_list(2,1:N)=0; %την χρονική στιγμή μηδέν
%Δημιουργία γεγονότων τύπου 3 για δημιουργία των αρχικών GATE μηνυμάτων
%από το OLT στις ONUs.
event_list(1,N+1)=3;
event_list(2,N+1)=0; %Την χρονική στιγμή μηδέν
event_list(3,N+1)=1; %για την ONU1

%Για τις υπόλοιπες, όταν τελειώνει η μετάδοση του προηγούμενου GATE
for i=0:(N-2)
    event_list(1,N+2+i)=3;
    event_list(2,N+2+i)=event_list(2,N+1+i)+ 0.0512*(10^-6);
    event_list(3,N+2+i)= i+2;
end
event_list(1,(2*N)+1)=6; %Τερματισμός προσομοίωσης
event_list(2,(2*N)+1)=simulation_time;%Χρόνος τερματισμού (simulation time)
%Στην τρίτη γραμμή του event_list εισάγεται το id του ONU στον οποίο απευθύνεται το γεγονός.
%Στο τελευταίο γεγονός τερματισμού της προσομοίωσης το id της ONU ίσο με μηδέν
%(δεν απευθύνεται σε κάποια συγκεκριμένη ONU).
for counter_stations=1:N
    event_list(3,counter_stations)=counter_stations;
end

```

**Εικόνα 4.3:** Δημιουργία πίνακα γεγονότων και χρόνου

Χρησιμοποιείται στη συνέχεια ένα flag που σηματοδοτεί την έναρξη της προσομοίωσης και η βασική ρουτίνα (while) που αποτελεί και το κύριο μέρος του κώδικα. Στη ρουτίνα γίνεται αρχικά η επιλογή του γεγονότος χρονικά. Στο γεγονός 1 που ακολουθεί λαμβάνει χώρα η διαδικασία παραγωγής κίνησης. Η παραγωγή κίνησης γίνεται με δύο τρόπους έναν για κάθε μια βασική συνάρτηση που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Στο γεγονός 1 γίνεται και η κλήση του γεγονότος 2, αλλά στη συνέχεια και η κλήση του γεγονότος 1 από τον εαυτό του για τη δημιουργία του επόμενου πλαισίου (βλ. Εικόνα 4.4).



```

%Γεγονός 1ο -Παραγωγή πλαισίων
if event==1
    %Ανανέωση ρολογιού
    time=event_list(2,1);
    %Ο τυχαίος χρόνος που περνά για να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο, ο οποίος ακολουθεί κατανομή Poisson
    generated_time = exprnd(1/lambda,1,1);
    %generated_time = Total_Arrivals_O(event_list(3,1),number_generated_time(event_list(3,1)),2);
    total_frames=total_frames+1;
    %total_frames
    %time
    s=size(event_list);
    event_list(1,s(2)+1)=2; %Δημιουργία γεγονότος 2 για την τοποθέτηση του πλαισίου στην αντίστοιχη ουρά αναμονής
    event_list(2,s(2)+1)=time + generated_time; %Χρόνος που δημιουργείται το πλαίσιο
    %event_list(2,s(2)+1)= generated_time;
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποίο απευθύνεται το γεγονός

    s=size(event_list);
    event_list(1,s(2)+1)=1; %Δημιουργία γεγονότος 1, για δημιουργία του επόμενου πλαισίου
    event_list(2,s(2)+1)=time + generated_time;
    %event_list(2,s(2)+1)= generated_time;
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
    %number_generated_time(event_list(3,1)) = number_generated_time(event_list(3,1)) + 1;

```

**Εικόνα 4.4:** Γεγονός  $I^0$  – Παραγωγή πλαισίων

Στο γεγονός 2 και όταν αυτό κληθεί γίνεται η εισαγωγή των παραγόμενων πλαισίων στις ουρές αναμονής (μια για κάθε ONU) εφόσον φυσικά υπάρχει ο διαθέσιμος χώρος σε αυτές. Σε αντίθετη περίπτωση αυτά απορρίπτονται. Το μέγεθος των πλαισίων προσδιορίζεται είτε με ομοιόμορφη κατανομή (όταν η παραγωγή κίνησης γίνεται με Poisson), είτε λαμβάνεται από τον πίνακα που δημιουργείται από τα αρχεία κίνησης και γίνεται η χρήση του στην αντίστοιχη συνάρτηση (βλ. Εικόνα 4.5).

```

%Γεγονός 2ο -Εισαγωγή πλαισίων στις αντίστοιχες ουρές αναμονής (αν δεν απορριφθούν)
elseif event==2
    %Ανανέωση ρολογιού
    time=event_list(2,1);
    frame_size = round((1518-64)*rand+64); %Μέγεθος δημιουργηθέντος πλαισίου
    %frame_size =Total_Arrivals_O(event_list(3,1),number_frame_size(event_list(3,1)),3);
    occupied_size1 = sum(Q,2); %Εύρεση του κατειλημμένου χωρου (bytes) στην ουρά της αντίστοιχης ONU
    %Εύρεση του κατειλημμένου χώρου σε (σε bytes) στον πίνακα των δηλωμένων bytes της αντίστοιχης ONU
    occupied_size2 = sum(stated_frames,2);
    Q_ONU_size = occupied_size1(event_list(3,1),1);
    stated_frames_ONU_size = occupied_size2(event_list(3,1),1);
    %Q_ONU_size

    %Αν δεν χωράει να μπει το πλαίσιο στην ουρά απορρίπτεται
    if ((Q_ONU_size+stated_frames_ONU_size+frame_size)>Q_size)
        dropped_frames = dropped_frames+1;
        dropped_bytes = dropped_bytes+frame_size;
    else %Αλλιώς προστίθεται στην ουρά
        temp = find(Q(event_list(3,1),:)==0,1); %Εύρεση κενής θέσης στην ουρά για το πλαίσιο.
        Q(event_list(3,1),temp) = frame_size; %Πρόσθεση του πλαισίου στην ουρά και αντίστοιχα
        created_time(event_list(3,1),temp) = time; %την χρονική στιγμή που δημιουργήθηκε
    end
    %number_frame_size(event_list(3,1)) = number_frame_size(event_list(3,1)) + 1;

```

**Εικόνα 4.5:** Γεγονός  $2^0$  - Εισαγωγή πλαισίων στις ουρές αναμονής

Το γεγονός 3 στην πρώτη του κλήση από το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των αρχικών GATE μηνυμάτων από το OLT προς τις ONUs και για το σκοπό αυτό προβαίνει στην κλήση του γεγονότος 4. Οι επόμενες κλήσεις του γίνονται από το γεγονός 5 και εφόσον οι ONUs είναι ενεργοποιημένες (βλ. Εικόνα 4.6).

```

    %Γεγονός 3ο - Αποστολή GATE μηνυμάτων (στο κανάλι downstream(ld))
elseif event==3
    %Ανανέωση ρολογιού
    time=event_list(2,1);

    %Ανανέωση του πίνακα last_gate με τον χρόνο δημιουργίας του τελευταίου δημιουργηθέντος GATE
    last_gate(1,event_list(3,1)) = time;

    s=size(event_list);
    event_list(1,s(2)+1)=4; %Δημιουργία γεγονότος 4 την στιγμή που φτάνει το GATE
    %Εισαγωγή + 0.0512μsec (χρόνος μετάδοσης), γιατί το GATE είναι 64 bytes (αντιστοιχεί σε 0.0512μsec)
    event_list(2,s(2)+1)=time + 0.0512*(10^-6) + rtt_half(1,event_list(3,1)); %στην ONU στην οποία απευθύνεται
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Βάζουμε το id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός

```

**Εικόνα 4.6:** Γεγονός 3<sup>ο</sup> – Αποστολή GATE μηνυμάτων στο κανάλι downstream (ld)

Στο γεγονός 4 το οποίο είναι και το πιο σημαντικό, γίνεται ο έλεγχος διαθεσιμότητας καναλιού μετάδοσης, η διαχείριση των REPORT μηνυμάτων, η ενεργοποίηση του μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας, ο υπολογισμός του συνολικού χρόνου ύπνωσης των ONUs και ο έλεγχος ύπαρξης πλαισίων που πρέπει να δηλωθούν από τις ONUs.

Πιο αναλυτικά αν το κανάλι για μετάδοση είναι διαθέσιμο και οι ONUs ενεργοποιημένες, τότε αν δεν έχουν δηλωμένα bytes για μετάδοση, δημιουργείται το γεγονός 5 για τη μετάδοση του επόμενου GATE από το OLT και λαμβάνεται μόνο το REPORT μήνυμα από το OLT χωρίς δεδομένα, ενώ οι ONUs μεταβαίνουν σε κατάσταση μερικής ύπνωσης. Αν έχουν δεδομένα προς μετάδοση τότε υπολογίζεται το πραγματικό χρονικό διάστημα “ύπνου” τους, δημιουργείται το γεγονός 5 για τη μετάδοση του επόμενου GATE από το OLT και λαμβάνεται από το OLT το REPORT μήνυμα και τα bytes που έχουν δηλώσει οι ONUs (βλ. Εικόνα 4.7).

```

if (stated_bytes(1,event_list(3,1))==0 && (ONU_state(1,event_list(3,1))==1)) %Αν δεν υπάρχουν δηλωμένα bytes
    ONU_state(1,event_list(3,1))=0; %Απενεργοποίηση της ONU
    started_ONU_learning_time(1,event_list(3,1))=time;

    s=size(event_list);
    %Δημιουργία γεγονότος 5 την στιγμή λήψης του REPORT της ONU από το OLT,
    %ώστε να προχωρήσει στην δημιουργία του επόμενου GATE μηνύματος
    event_list(1,s(2)+1)=5;
    %Πρόσθεση +0.0512μsec, όσος δηλαδή χρόνος χρειάζεται για να μεταδοθούν 64 bytes
    %(Ελάχιστο μέγεθος Ethernet πλαισίου)
    event_list(2,s(2)+1)=send_time + 0.0512*(10^-6) + rtt_half(1,event_list(3,1));
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
    %Ανανέωση του χρόνου διαθεσιμότητας του καναλιού στο οποίο θα γίνει η μετάδοση
    cat(1,channel)=send_time + 0.0512*(10^-6) + rtt_half(1,event_list(3,1))+guard_time;

elseif (stated_bytes(1,event_list(3,1))>0 && (ONU_state(1,event_list(3,1))==1)) %Αν υπάρχουν δηλωμένα bytes

    ONU_learning_time1(1,event_list(3,1))=time-started_ONU_learning_time(1,event_list(3,1));
    ONU_learning_time(1,event_list(3,1))=ceil(ONU_learning_time1(1,event_list(3,1))*10^5);

    %Εύρεση του χρόνου μετάδοσης των δηλωμένων bytes
    transmission_time = ((stated_bytes(1,event_list(3,1)))/(data_rate/8));
    s=size(event_list);
    %Δημιουργία γεγονότος 5 την στιγμή λήψης του REPORT της ONU από το OLT,
    %ώστε να προχωρήσει στην δημιουργία του επόμενου GATE μηνύματος
    event_list(1,s(2)+1)=5;
    event_list(2,s(2)+1)=send_time + 0.0512*(10^-6) + transmission_time + rtt_half(1,event_list(3,1));
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
    %Ανανέωση του χρόνου διαθεσιμότητας του καναλιού στο οποίο θα γίνει η μετάδοση
    cat(1,channel)=send_time + 0.0512*(10^-6) + transmission_time + rtt_half(1,event_list(3,1))+guard_time;
end

```

**Εικόνα 4.7:** Γεγονός 4<sup>ο</sup> – Διαχείριση REPORT μηνυμάτων, πραγματικός χρόνος ύπνου ONUs

Ακολουθεί στο ίδιο γεγονός 4, ο μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας βασισμένος στο Learning Automata. Το learning κομμάτι του αλγορίθμου ενημερώνεται για την πραγματική κατάσταση των ONUs (πραγματικός χρόνος ύπνου ONUs) και το estimating κομμάτι - το οποίο προηγείται από το learning - βάσει πιθανοτήτων και σε συνδυασμό με τις πληροφορίες που παίρνει από το learning κομμάτι μέσα από ένα σύνολο πιθανών τιμών (το εύρος των τιμών των χρόνων “ύπνου” των ONUs), αποδίδει κάθε φορά την εκτιμώμενη τιμή για το χρόνο ύπνωσης, η οποία και λαμβάνεται τελικά υπόψη για τον υπολογισμό του χρόνου μερικής ύπνωσης (doze sleep) των ONUs. Εδώ γίνεται και ο υπολογισμός του μέσου σφάλματος του μοντέλου (mean model error) (βλ. Εικόνα 4.8).

```

%Learning Automata
if (total_frames>100)
i=1;
S=0;
R=rand;
while (R>S) && (i<=2001)
S=S+probabilities_table(event_list(3,1),i);
ONU_estimating_time(1,event_list(3,1))=i;
i=i+1;
end

for i=1:2001
if (i~=ONU_learning_time(1,event_list(3,1)))
probabilities_sum(1,event_list(3,1))=probabilities_sum(1,event_list(3,1))+probabilities_table(event_list(3,1),i);
end
end

for i=1:2001
if (i==ONU_learning_time(1,event_list(3,1)))
probabilities_table(event_list(3,1),i)=probabilities_table(event_list(3,1),i) + coefficient_L*probabilities_sum(1,event_list(3,1));
else
probabilities_table(event_list(3,1),i)=probabilities_table(event_list(3,1),i)-coefficient_L*probabilities_table(event_list(3,1),i);
end
end
end

%Υπολογισμός μέσου σφάλματος μοντέλου (Learning Automata)
model_error=model_error+abs((ONU_learning_time(1,event_list(3,1))-ONU_estimating_time(1,event_list(3,1)))/2001);
mean_model_error=model_error/counter1;
counter1=counter1+1;

```

**Εικόνα 4.8:** Γεγονός 4<sup>ο</sup> – Learning Automata και mean model error

Το επόμενο κομμάτι του κώδικα αφορά την ενεργοποίηση και τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου “ύπνου” των ONUs καθώς και το μηδενισμό των προηγούμενων δηλωμένων bytes εφόσον αυτά επρόκειτο να σταλούν (βλ. Εικόνα 4.9).

```

%Ενεργοποίηση και υπολογισμός συνολικού χρόνου "ύπνου" ONUs
ONU_wake_time(1,event_list(3,1)) = started_ONU_learning_time(1,event_list(3,1)) + (ONU_estimating_time(1,event_list(3,1))*10^-5);
%ONU_wake_time

%Υπολογισμός συνολικού χρόνου ύπνου ONUs
while ((ONU_wake_time(1,event_list(3,1)) >= time) && (ONU_state(1,event_list(3,1))==0))
ONU_state(1,event_list(3,1))=1; %Ενεργοποίηση ONU
ONU_sleep_time(1,event_list(3,1)) = ONU_estimating_time(1,event_list(3,1))*(10^-5); %Χρόνος ύπνου ONU
%ONU_sleep_time
total_ONU_sleep_time = total_ONU_sleep_time + ONU_sleep_time(1,event_list(3,1)); %Συνολικός χρόνος ύπνου ONUs
end

%Μηδενισμός των προηγούμενων δηλωμένων bytes, εφόσον επρόκειτο να σταλούν
stated_bytes(1,event_list(3,1))=0;

```

**Εικόνα 4.9:** Γεγονός 4<sup>ο</sup> – Ενεργοποίηση και υπολογισμός του συνολικού χρόνου “ύπνου” των ONUs, μηδενισμός των προηγούμενων δηλωμένων bytes

Στη συνέχεια ακολουθεί ο έλεγχος της ύπαρξης πλαisiών τα οποία πρέπει να δηλωθούν από τις ONUs. Όσο υπάρχουν πλαίσια στην ουρά και αν δεν γίνεται υπέρβαση του μέγιστου αριθμού δεδομένων (bytes) που μπορούν να δηλωθούν (grant window), υπολογίζεται ο αριθμός των

δηλωμένων bytes προς μετάδοση και γίνεται η ολίσθηση των πλαισίων στις ουρές αναμονής βλ. Εικόνα 4.10).

```

%Ελεγχος ύπαρξης πλαισίων (bytes) τα οποία πρέπει να δηλωθούν από την ONU
k=1; flag1=true;

while (Q(event_list(3,1),1)~=0) && (flag1==true) %Όσο βρίσκει πλαίσια στην ουρά της ONU

    %Αν δεν γίνεται υπέρβαση του μέγιστου αριθμού bytes που μπορούν να δηλωθούν από τις ONUs
    if (stated_bytes(1,event_list(3,1))+Q(event_list(3,1),1)<=grant_window
        stated_bytes(1,event_list(3,1)) = stated_bytes(1,event_list(3,1)) + Q(event_list(3,1),1);
        stated_frames(event_list(3,1),k) = Q(event_list(3,1),1);
        stated_created_time(event_list(3,1),k) = created_time(event_list(3,1),1);

        for j=1:156 %Ολίσθηση των πλαισίων στην ουρά
            Q(event_list(3,1),j)=Q(event_list(3,1),j+1);
            Q(event_list(3,1),157)=0;
            created_time(event_list(3,1),j)=created_time(event_list(3,1),j+1);
            created_time(event_list(3,1),157)=0;
        end

        k=k+1;
    else
        flag1=false;
    end
end

```

**Εικόνα 4.10:** Γεγονός 4<sup>ο</sup> – Υπολογισμός των δηλωμένων bytes προς μετάδοση και ολίσθηση των πλαισίων στις ουρές αναμονής

Τέλος στο γεγονός 4, αν το κανάλι για μετάδοση δεν είναι διαθέσιμο οι ONUs περιμένουν μέχρι να γίνει διαθέσιμο και κατόπιν μεταδίδουν σε αυτό τα REPORT μηνύματα (βλ. Εικόνα 4.11).

```

%Αν χρησιμοποιείται από κάποια άλλη ONU, περιμένει να τελειώσει αυτή
%και κατόπιν μεταδίδει σε εκείνο τον χρόνο το REPORT
else
    send_time = cat(1,channel);
    s=size(event_list);
    %Δημιουργία γεγονότος 4 για την δημιουργία REPORT μηνύματος την στιγμή που το κανάλι θα μείνει διαθέσιμο
    event_list(1,s(2)+1)=4;
    event_list(2,s(2)+1)=send_time;
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποίο απευθύνεται το γεγονός
end

```

**Εικόνα 4.11:** Γεγονός 4<sup>ο</sup> –Αναμονή των ONUs μέχρι το κανάλι για μετάδοση να γίνει διαθέσιμο

Στο γεγονός 5 και όταν συμβαίνει επιτυχημένη αποστολή των δηλωμένων πλαισίων, υπολογίζονται ο συνολικός χρόνος αναμονής των πακέτων (total wait time), ο αριθμός των πλαισίων (sent frames) καθώς και ο αριθμός των bytes που μεταδίδονται (sent bytes). Στο ίδιο

γεγονός γίνεται και ο έλεγχος του αν το GATE μήνυμα που πρόκειται να δημιουργηθεί μέσω του γεγονότος 3, απέχει ένα διάστημα ασφαλείας από τα άλλα GATE μηνύματα (βλ. Εικόνα 4.12).

```

%Επιτυχημένη λήψη δηλωμένων πλαισίων
w=1;
while (stated_frames(event_list(3,1),w)~=0)
    total_wait_time = total_wait_time + time - stated_created_time(event_list(3,1),w);
    sent_frames = sent_frames + 1;
    sent_bytes = sent_bytes + stated_frames(event_list(3,1),w);
    stated_frames(event_list(3,1),w)=0;
    stated_created_time(event_list(3,1),w)=0;
    w=w+1;
end

%Έλεγχος αν το GATE μήνυμα που πρόκειται να δημιουργηθεί απέχει ένα διάστημα ασφαλείας από τα άλλα GATE μηνύματα
temp1 = find(last_gate==max(last_gate),1);
last_gt = last_gate(1,temp1);
min_gate_interval = 0.0512*(10^-6); %GATE μήνυμα -> 64 bytes -> 0.0512μsec χρόνος μετάδοσης
%Αν το REPORT φτάσει πριν να περάσει ένα διάστημα ασφαλείας από την δημιουργία του τελευταίου GATE μηνύματος
%Δημιουργία γεγονότος 3 (αποστολή GATE) μόνο αν η ONU είναι σε κατάσταση "on"
if (time<(last_gt+min_gate_interval)&&(ONU_state(1,event_list(3,1))==1))
    s=size(event_list);
    %Δημιουργία γεγονότος 3 για να προχωρήσει στην δημιουργία του επόμενου GATE μηνύματος μετά από ένα ασφαλές διάστημα
    event_list(1,s(2)+1)=3;
    event_list(2,s(2)+1)=last_gt+min_gate_interval;
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
elseif (time>=(last_gt+min_gate_interval)&&(ONU_state(1,event_list(3,1))==1))
    s=size(event_list);
    %Δημιουργία γεγονότος 3 για να προχωρήσει στην δημιουργία του επόμενου GATE μηνύματος στον τρέχων χρόνο
    event_list(1,s(2)+1)=3;
    event_list(2,s(2)+1)=time;
    event_list(3,s(2)+1)=event_list(3,1); %Εισαγωγή του id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
end

```

**Εικόνα 4.12:** Γεγονός 5<sup>ο</sup> –Επιτυχημένη αποστολή δηλωμένων πλαισίων, δημιουργία επόμενου GATE μηνύματος

Στο γεγονός 6 γίνεται ο τερματισμός της προσομοίωσης, η διαγραφή του γεγονότος και το σορτάρισμα του event list (βλ. Εικόνα 4.13).

```

%Γεγονός 6ο – Τερματισμός Προσομοίωσης
elseif event==6
    %Ανανέωση ρολογιού
    time=event_list(2,1);
    %disp('Simulation End')
    flag=false; %Για να τερματίσει το while
end %του if των events

event_list(:,1)=[]; %Διαγραφή γεγονότος
temp=sortrows(event_list',2);%Σορτάρισμα του event_list
event_list=temp';
end %while

```

**Εικόνα 4.13:** Γεγονός 6<sup>ο</sup> –Τερματισμός Προσομοίωσης

Στο τελευταίο κομμάτι του κώδικα υπολογίζονται κάποιες βασικές παράμετροι και εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (βλ. Εικόνα 4.14).

Αναλυτικά υπολογίζονται:

- η μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) σε msec,
- το ποσοστό απόρριψης πακέτων (packet drop ratio) επί τις %,
- η ρυθμοαπόδοση του σχήματος (throughput) σε bps,
- ο μέσος χρόνος ύπνου των ONUs (mean ONU sleep time) σε msec,
- η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt και
- η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας του σχήματος (energy efficiency) επί τις %.

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται ή μπορούν να εμφανιστούν είναι:

- Οι αποστάσεις των ONUs (ONU Distances) σε m,
- Οι χρόνοι μετάβασης και επιστροφής (Round Trip Time – RTT) σε msec,
- Ο αριθμός των bytes που απορρίπτονται (Dropped Bytes),
- Ο αριθμός των bytes που μεταδίδονται (Sent Bytes),
- Το ποσοστό των πακέτων που απορρίπτονται (Packet drop ratio) επί τις %,
- Η ρυθμοαπόδοση του σχήματος (throughput) σε bps,
- Ο μέσος χρόνος ύπνου των ONUs (Mean ONU sleep time) σε msec,
- Η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (Mean ONU consumption) σε Watt,
- Η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας του σχήματος (Energy efficiency) επί τις %,
- Το μέσο σφάλμα του μοντέλου (Mean model error) και
- Η μέση καθυστέρηση του πακέτου (mean packet delay) σε msec.

```

%Εμφάνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης
mean_packet_delay = (total_wait_time/sent_frames)*10^3; %σε msec
if sent_frames==0, mean_packet_delay=0;
end
packet_drop_ratio=(dropped_bytes/(dropped_bytes+sent_bytes))*100;
throughput = (sent_bytes*8)/T; %σε bps
mean_ONU_sleep_time = (total_ONU_sleep_time/N)*10^3; %σε msec
mean_ONU_consumption = (4.69*((T*10^3)-mean_ONU_sleep_time)+1.7*mean_ONU_sleep_time)/(T*10^3);
energy_efficiency=((4.69-mean_ONU_consumption)*100)/4.69;
disp('ONU Distances (m):')
disp(distance)
disp('Round Trip Time-RTT (μsec):')
disp(RTT)
%disp('Dropped Bytes:')
%disp(dropped_bytes)
disp('Sent Bytes:')
disp(sent_bytes)
%disp('Packet drop ratio (%):')
%disp(packet_drop_ratio)
disp('Throughput (bps):')
disp(throughput)
disp('Mean ONU sleep time (msec) :')
disp(mean_ONU_sleep_time)
disp('Mean ONU consumption (Watt) :')
disp(mean_ONU_consumption)
disp('Energy efficiency(%) :')
disp(energy_efficiency)
disp('Mean model error:')
disp(mean_model_error)
disp('Mean packet delay (msec) :')
disp(mean_packet_delay)

```

**Εικόνα 4.14:** Γεγονός  $\delta^o$  –Εμφάνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

#### 4.4 Αξιολόγηση απόδοσης και αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα περιέχονται τα πειραματικά αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης τα οποία είναι ενδεικτικά της απόδοσης του προτεινόμενου σχήματος. Η νέα αυτή ενεργειακά αποδοτική στρατηγική αξιολογείται στο 10G-EPON στην online έκδοση διαμοίρασης εύρους ζώνης (online scheduling). Εξετάζονται δύο βασικά σενάρια προσομοίωσης με βάση τον τρόπο παραγωγής της κίνησης στο δίκτυο. Στο πρώτο σενάριο η παραγωγή κίνησης υλοποιείται με κατανομή Poisson με χρήση της `exprnd`, ενώ στο δεύτερο η κίνηση παράγεται με τη βοήθεια ενός πίνακα που δημιουργείται από ξεχωριστά αρχεία κίνησης τύπου `.txt`, ένα για κάθε ONU. Οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption), αποδοτικότητα ενέργειας (energy efficiency), μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) και ρυθμοαπόδοση (throughput).



Η υιοθετηθείσα αρχιτεκτονική 10G-EPON για τα παραπάνω σενάρια αποτελείται από ένα OLT και μεταβαλλόμενο αριθμό (από 2 μέχρι 30) ONUs. Η τοποθέτηση των ONUs γίνεται σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τα 1000 μέτρα ως τα 20000 μέτρα ώστε να παρέχουν ένα ρεαλιστικό σενάριο. Με βάση τις αποστάσεις αυτές υπολογίζονται και οι χρόνοι μετάβασης και επιστροφής (Round Trip Time – RTT) σε ένα εύρος από 6,666 μsec ως 133,333 μsec. Ο ρυθμός μετάδοσης (Transmission Rate) είναι 10Gbps και χρησιμοποιείται ένα κανάλι μετάδοσης. Οι ONUs διαθέτουν μια μονάδα προσωρινής αποθήκευσης (buffer), για την προσωρινή αποθήκευση της κίνησης που παράγεται. Υποτίθεται ότι ο buffer καταναλώνει αμελητέα ενέργεια. Κάθε buffer στα συγκεκριμένα σενάρια, είναι σε θέση να αποθηκεύσει 10048 bytes ανά ONU, δηλαδή όχι περισσότερα από  $10048/64=157$  πλαίσια Ethernet. Όσον αφορά το grant window, δηλαδή τον μέγιστο αριθμό των bytes που μπορεί να μεταδοθεί μαζί με το REPORT μήνυμα από κάθε ONU, υιοθετείται η τεχνική του limited grant sizing η οποία είναι αρκετά χρήσιμη καθώς αποτρέπει κάθε ONU από το να μονοπωλεί το κοινό εύρος ζώνης. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή το μέγεθος του GRANT ρυθμίζεται σε σχέση με το αναφερόμενο μέγεθος του buffer μέχρι το μέγιστο grant window. Για τα πειράματα που ακολουθούν αυτό το παράθυρο είναι ίσο με 10000 bytes, εκτός των μετρήσεων εκείνων όπου χρειάστηκε να μεταβάλλεται από 1800 ως 3400 bytes. Όλα τα πειράματα έχουν εκτελεστεί με χρόνο προσομοίωσης ίσο με τρία δευτερόλεπτα (Simulation time =3sec). Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το guard time (ένα μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ των κατανομών για λόγους προστασίας) έχει οριστεί στα 0.5 μsec. Ο πίνακας 4.1 συνοψίζει τις κύριες παραμέτρους προσομοίωσης.

ONUs Distances	1000 – 20000 m
Transmission Rate	10 Gbps
Generated Traffic	a) Poisson with exprnd ( $\lambda=1000$ ) b) From archives type .txt one for each ONU
Buffer size	10048 bytes
GRANT window	10000 bytes
GUARD_TIME	0.5 μsec
GRANT policy	Limited sizing
REPORT message	64 bytes

**Πίνακας 4.1:** Κύριες παράμετροι προσομοίωσης

Ακολουθούν παρακάτω οι μετρήσεις απόδοσης και τα πειραματικά αποτελέσματα των δυο βασικών σεναρίων προσομοίωσης.

#### **4.4.1 Πρώτο σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις απόδοσης και αποτελέσματα**

Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης η παραγωγή της κίνησης στο δίκτυο γίνεται με κατανομή Poisson με χρήση της  $\text{exprnd}$ . Ο χρόνος άφιξης δηλαδή μεταξύ των πλαισίων ακολουθεί μια εκθετική κατανομή με μέση τιμή  $\lambda$  (ανά μονάδα χρόνου). Οι μετρήσεις απόδοσης για το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνουν: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption), αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency), μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) και ρυθμοαπόδοση throughput και προστίθεται στο τέλος και η μέτρηση του μέσου σφάλματος μοντέλου (mean model error) που σχετίζεται με το Learning Automata. Συνολικά στο πρώτο σενάριο έγιναν δεκατρείς μετρήσεις και προέκυψαν τα αντίστοιχα γραφήματα από αυτές. Οι μετρήσεις αυτές και τα αποτελέσματα αυτών έχουν ως εξής:

#### **A.1 - Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 1)**

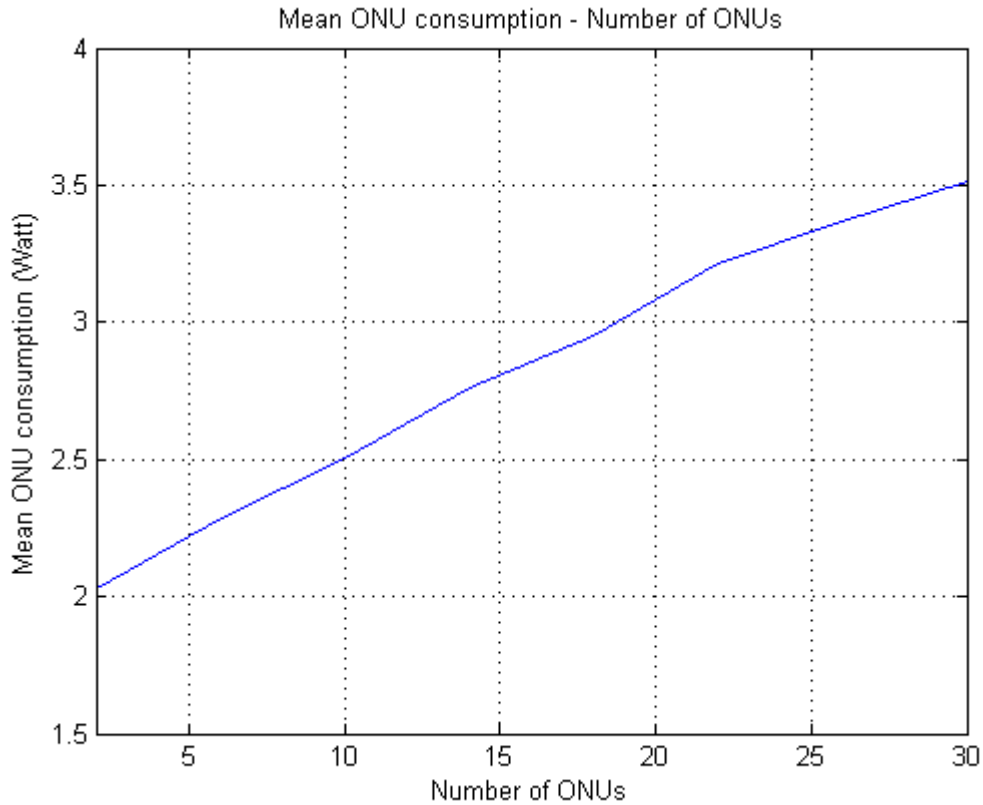
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του  $\lambda$  σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt, δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs} = ( 4.69 * (\text{χρόνος προσομοίωσης} - \text{μέσος χρόνος ύπνου ONUs}) + 1.7 * \text{μέσος χρόνος ύπνου ONUs} ) / \text{χρόνος προσομοίωσης}$$

ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.1. Σε αυτό το γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί μειώνεται αντίστοιχα ο μέσος χρόνος ύπνου των ONUs.



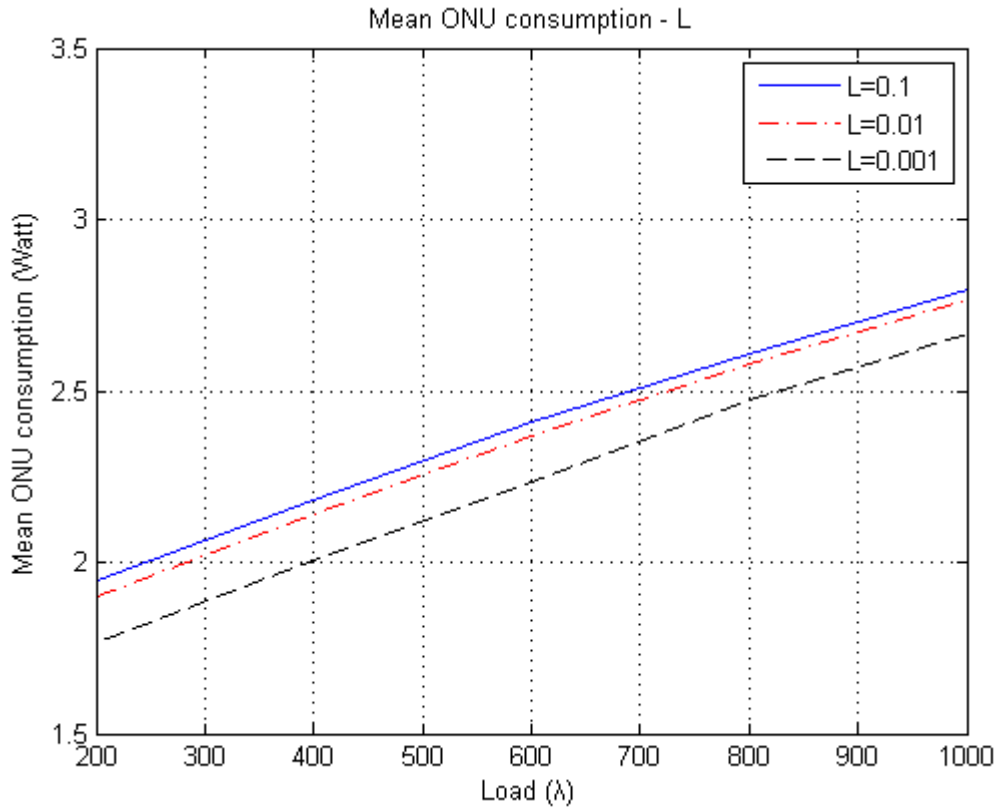
**Γράφημα 4.1:** Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs – αριθμός ONUs (Σενάριο 1)

## A.2 - Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs σε σχέση με τη μεταβλητή L του Learning Automata (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του λ από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) μεταβαλλόμενη, με τιμές  $L = 0.1$ ,  $L = 0.01$ ,  $L = 0.01$

Ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt, προκύπτει όπως και στην προηγούμενη μέτρηση A.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.2 παρακάτω:



**Γράφημα 4.2:** Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs – μεταβλητή  $L$  (Σενάριο 1)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η κίνηση (φόρτος) του δικτύου, η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί μειώνεται αντίστοιχα ο μέσος χρόνος ύπνου των ONUs (έχουμε μείωση του χρονικού διαστήματος στο οποίο οι ONU είναι ανενεργές λόγω αύξησης της κίνησης).

Σε ότι αφορά τη μεταβλητή  $L$  παρατηρούμε ότι η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs με  $L = 0.1$  είναι μεγαλύτερη συνολικά σε σχέση με αυτήν με  $L = 0.01$  και ακόμη μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτήν με  $L = 0.001$ . Η μεταβλητή  $L$  είναι ο πολλαπλασιαστής της αντίστοιχης τιμής του αθροίσματος των πιθανοτήτων όταν η εκτιμώμενη τιμή του Learning Automata είναι διαφορετική με την πραγματική και ο πολλαπλασιαστής της αντίστοιχης τιμής του πίνακα των πιθανοτήτων όταν η εκτιμώμενη τιμή είναι διαφορετική από την πραγματική. Επειδή το γινόμενο του  $L$  με την τιμή του αθροίσματος των πιθανοτήτων προστίθεται στην αντίστοιχη τιμή του πίνακα πιθανοτήτων όταν έχουμε σύγκλιση εκτιμώμενης και πραγματικής τιμής και αφαιρείται από αυτόν όταν αυτές διαφέρουν αυτό σημαίνει ότι όταν το  $L$  είναι ίσο με 0.1 το περιβάλλον του Learning Automata προσαρμόζεται πιο γρήγορα στις πραγματικές συνθήκες του δικτύου, λιγότερο γρήγορα όταν το  $L$  είναι ίσο με 0.01 και πολύ πιο αργά όταν το  $L$  είναι ίσο με 0.001.

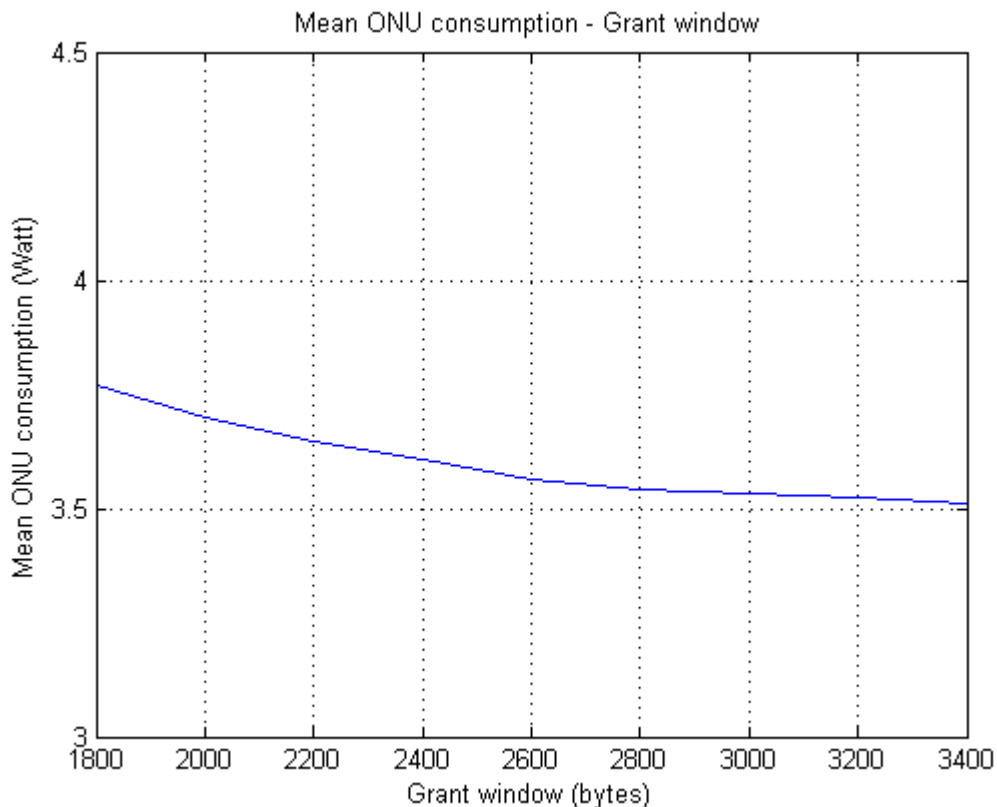
Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλη της μέσης κατανάλωσης ισχύος των ONUs που προκύπτει με την τιμή του  $L = 0.1$  αντικατοπτρίζει την καλύτερη προσαρμογή του Learning Automata στις πραγματικές συνθήκες του δικτύου.

### A.3 - Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs σε σχέση με το Grant window (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του  $\lambda$  σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 30
- μεταβλητή  $L$  (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$
- Grant window μεταβαλλόμενο με τιμές 1800 ως 3400 bytes, με βήμα 200 bytes

Ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt, προκύπτει όπως και στην μέτρηση A.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.3 παρακάτω:



**Γράφημα 4.3:** Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs – Grant window (Σενάριο 1)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το Grant window δηλαδή το περιθώριο του αριθμού των bytes που μπορούν να μεταδοθούν κάθε φορά από κάθε ONU προς το OLT μαζί με το REPORT, η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs μειώνεται και αυτό συμβαίνει γιατί οι ONUs μεταδίδοντας μεγαλύτερο όγκο δεδομένων κάθε φορά μένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ανενεργές.

### B.1 – Energy efficiency σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 1)

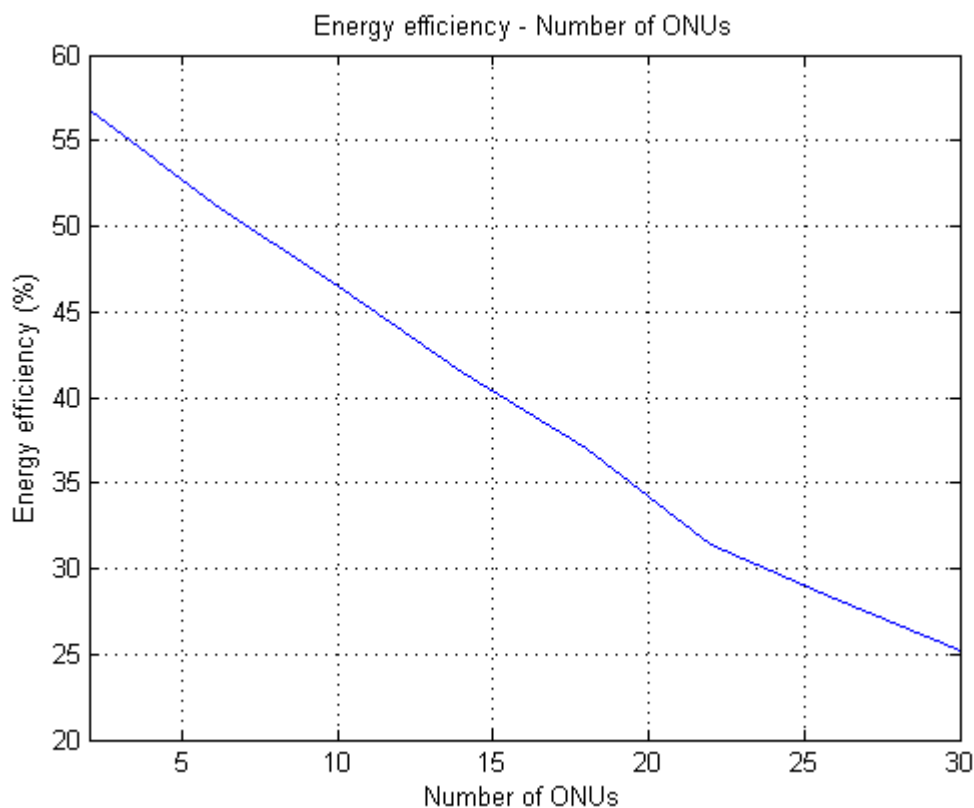
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή, L = 0.1

Ο υπολογισμός του Energy efficiency επί τις %, δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Energy efficiency} = ((4.69 - \text{μέση κατανάλωση ισχύος ONUs}) * 100) / 4.69$$

ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.4 παρακάτω:



**Γράφημα 4.4:** Energy efficiency – Αριθμός ONUs (Σενάριο 1)

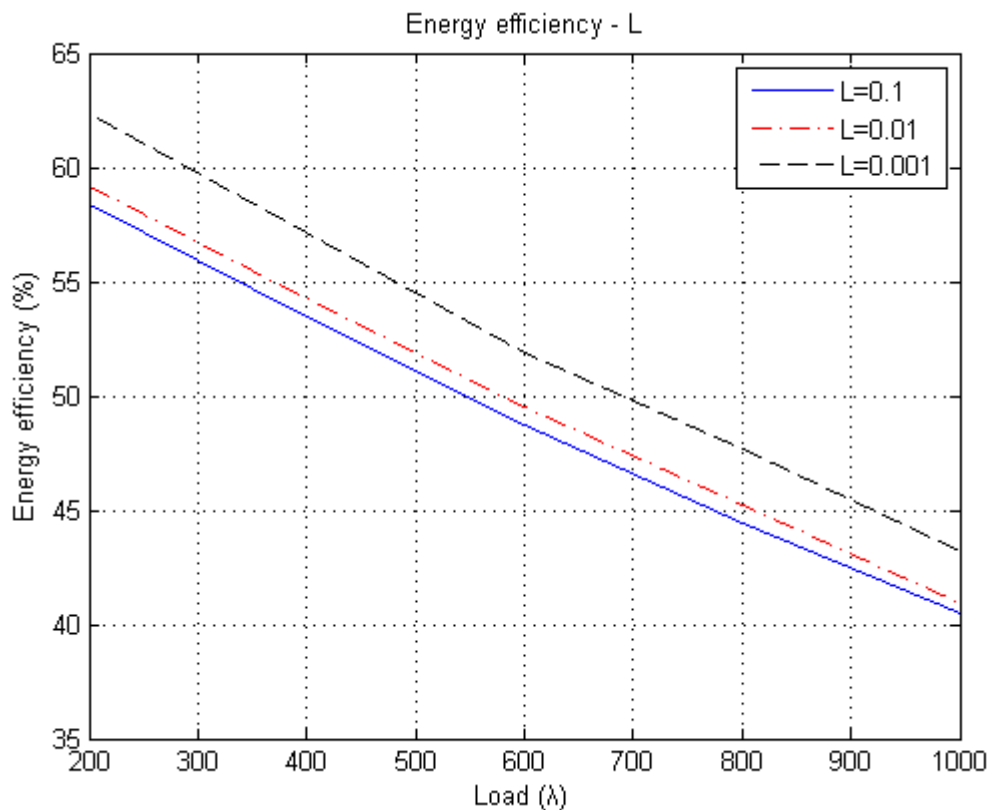
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) μειώνεται και αυτό είναι λογικό γιατί αυξάνεται αντίστοιχα η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs.

## B.2 – Energy efficiency σε σχέση με τη μεταβλητή L του Learning Automata (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του  $\lambda$  από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) μεταβαλλόμενη, με τιμές  $L = 0.1$ ,  $L = 0.01$ ,  $L = 0.001$

Ο υπολογισμός του energy efficiency επί τις %, προκύπτει όπως και στην προηγούμενη μέτρηση B.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.5 παρακάτω:



**Γράφημα 4.5:** Energy efficiency – μεταβλητή L (Σενάριο 1)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η κίνηση (φόρτος) του δικτύου, η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) μειώνεται και αυτό είναι λογικό γιατί αυξάνεται αντίστοιχα η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs.

Σε ότι αφορά τη μεταβλητή  $L$  παρατηρούμε ότι η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) με  $L = 0.1$  είναι μικρότερη συνολικά σε σχέση με αυτήν με  $L = 0.01$  και ακόμη μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν με  $L = 0.01$ . Κατά τα άλλα ισχύουν αυτά που αναφέρονται στη μέτρηση A.2, με την τιμή του  $L = 0.1$  αντικατοπτρίζει την καλύτερη προσαρμογή του Learning Automata στις πραγματικές συνθήκες του δικτύου.

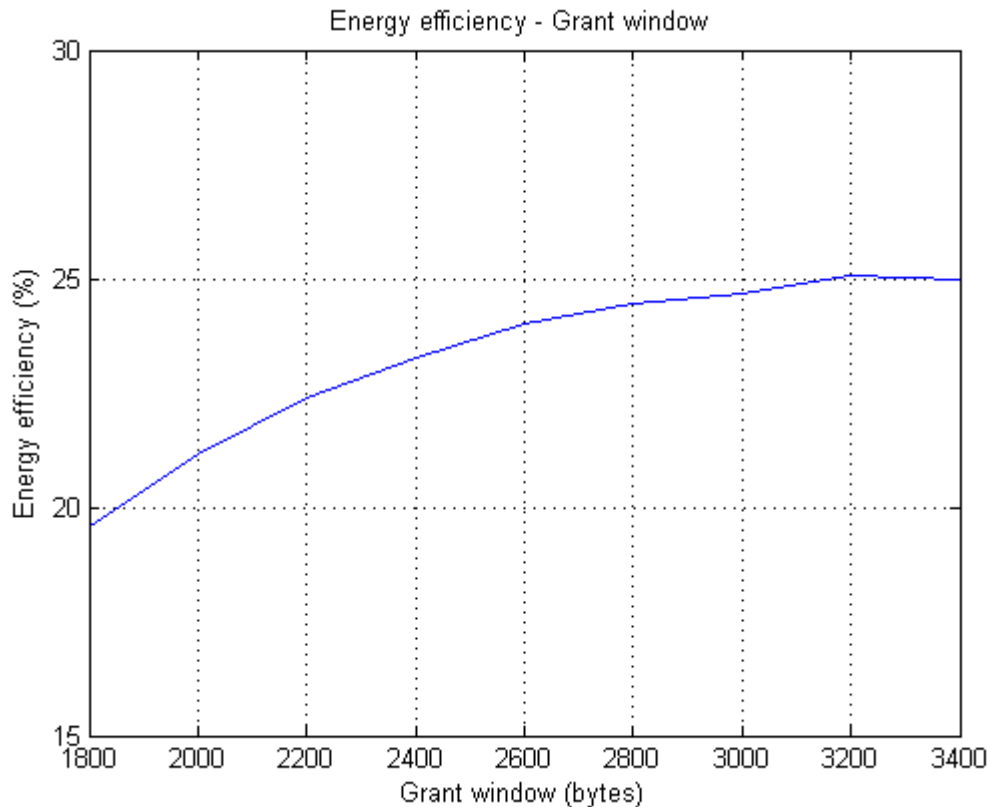
### **B.3 – Energy efficiency σε σχέση με το Grant window (Σενάριο 1)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του  $\lambda$  σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 30
- μεταβλητή  $L$  (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$
- Grant window μεταβαλλόμενο με τιμές 1800 ως 3400 bytes, με βήμα 200 bytes

Ο υπολογισμός του energy efficiency επί τις %, προκύπτει όπως και στην μέτρηση B.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.6. Σε αυτό το γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το Grant window, η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) αυξάνεται και αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται αντίστοιχα η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs.





**Γράφημα 4.6:** *Energy efficiency – Grant window (Σενάριο 1)*

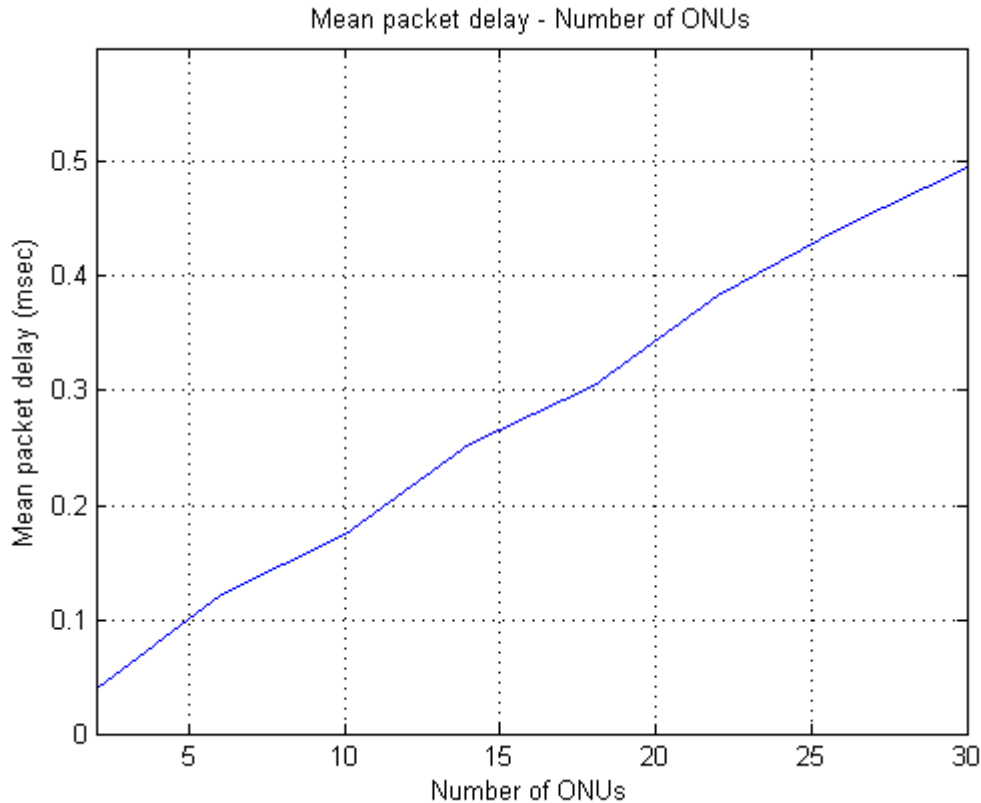
### **Γ.1 - Μέση καθυστέρηση πακέτου σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 1)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή, L = 0.1

Ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) σε msec δίνεται από τη σχέση:

μέση καθυστέρηση πακέτου = (συνολικός χρόνος καθυστέρησης / απεσταλμένα πλαίσια) \* 10<sup>3</sup>  
 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.7 παρακάτω:



**Γράφημα 4.7:** Μέση καθυστέρηση πακέτου – Αριθμός ONUs (Σενάριο 1)

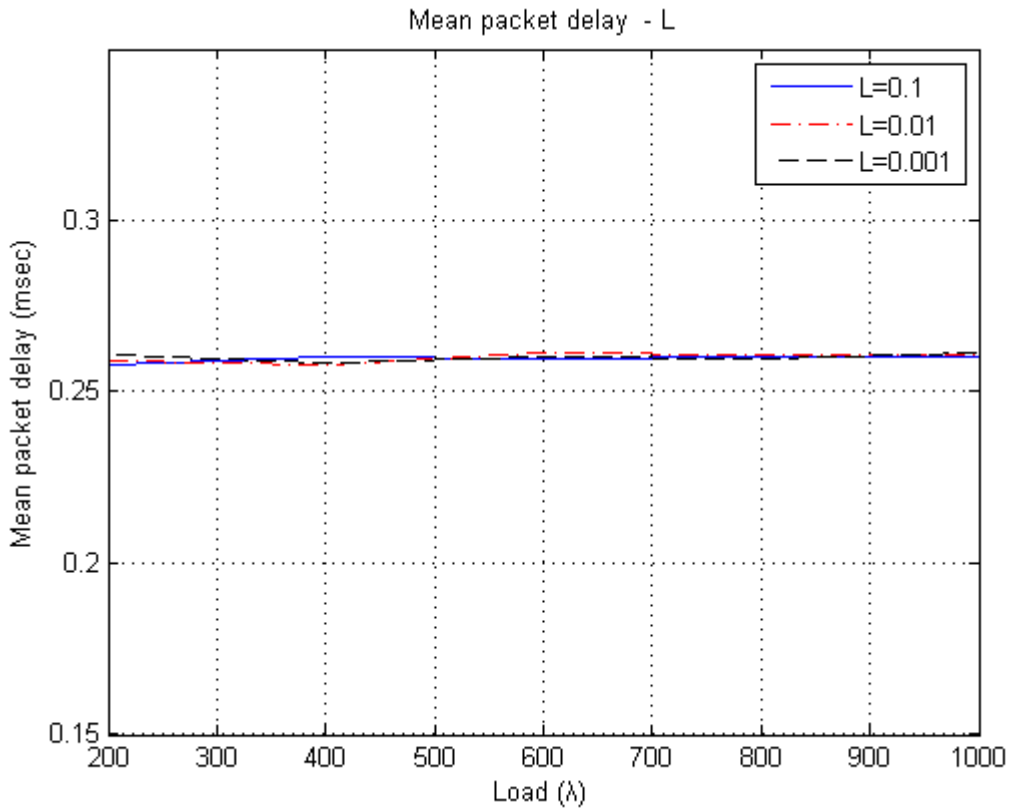
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η μέση καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ONUs τόσο πιο δύσκολο είναι να βρει η κάθε ONU το κανάλι μετάδοσης πάντα διαθέσιμο και αυτό σημαίνει μεγαλύτερη καθυστέρηση από την άφιξη του πακέτου σε αυτή μέχρι και τη μετάδοση του στο OLT .

## Γ.2 – Μέση καθυστέρηση πακέτου σε σχέση με τη μεταβλητή L του Learning Automata (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του λ από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) μεταβαλλόμενη, με τιμές  $L = 0.1$ ,  $L = 0.01$ ,  $L = 0.01$

Ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) σε msec, προκύπτει όπως και στην προηγούμενη μέτρηση Γ.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.8 παρακάτω:



**Γράφημα 4.8:** Μέση καθυστέρηση πακέτου – μεταβλητή  $L$  (Σενάριο 1)

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της κίνησης (φόρτου) στο δίκτυο, η μέση καθυστέρηση πακέτου δεν μεταβάλλεται και αυτό είναι λογικό γιατί δεν μεταβάλλεται το πότε η κάθε ONU θα βρει διαθέσιμο το κανάλι μετάδοσης για να αποστείλει τα δεδομένα της στο OLT και συνεπώς η καθυστέρηση παραμένει η ίδια.

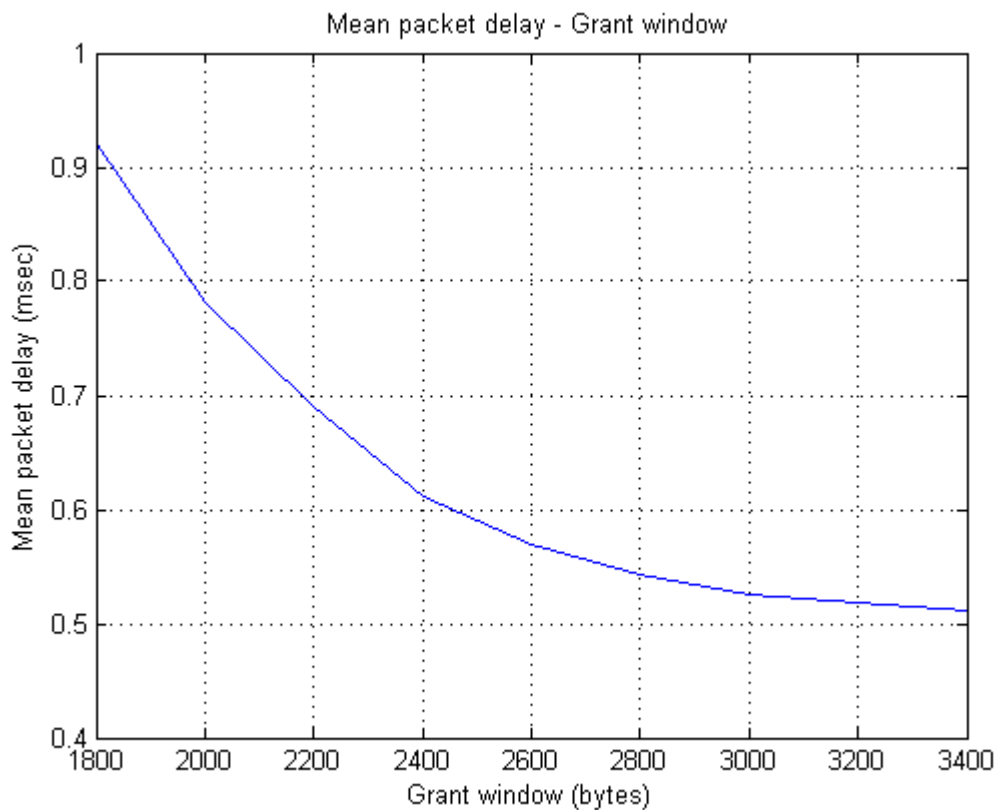
Επίσης παρατηρούμε ότι η μεταβλητή  $L$  δεν επηρεάζει την μέση καθυστέρηση πακέτου και ότι και για τις τρεις τιμές του αυτή παραμένει σταθερή και αυτό είναι λογικό με την έννοια ότι το Learning Automata και η μεταβλητή  $L$  δεν μεταβάλλουν το χρονικό διάστημα που χρειάζονται οι ONUs για να μεταδώσουν τα δηλωμένα bytes τους στο OLT, αλλά έχουν σχέση μόνο με το χρονικό διάστημα που αυτές είναι ανενεργές δηλαδή δεν θα έχουν δηλωμένα bytes για μετάδοση.

### Γ.3 - Μέση καθυστέρηση πακέτου σε σχέση με το Grant window (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 30
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$
- Grant window μεταβαλλόμενο με τιμές 1800 ως 3400 bytes, με βήμα 200 bytes

Ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) σε msec, προκύπτει όπως και στην μέτρηση Γ.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.9 παρακάτω:



**Γράφημα 4.9:** Μέση καθυστέρηση πακέτου – Grant window (Σενάριο 1)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το Grant window δηλαδή το περιθώριο του αριθμού των bytes που μπορούν να μεταδοθούν κάθε φορά από κάθε ONU προς το OLT μαζί με το REPORT, η μέση καθυστέρηση πακέτου μειώνεται και αυτό συμβαίνει γιατί οι ONUs

μεταδίδοντας μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, τα δεδομένα μεταδίδονται ταχύτερα με αποτέλεσμα μικρότερη καθυστέρηση στη μετάδοση των πακέτων.

#### Δ.1 – Ρυθμοαπόδοση του δικτύου σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 1)

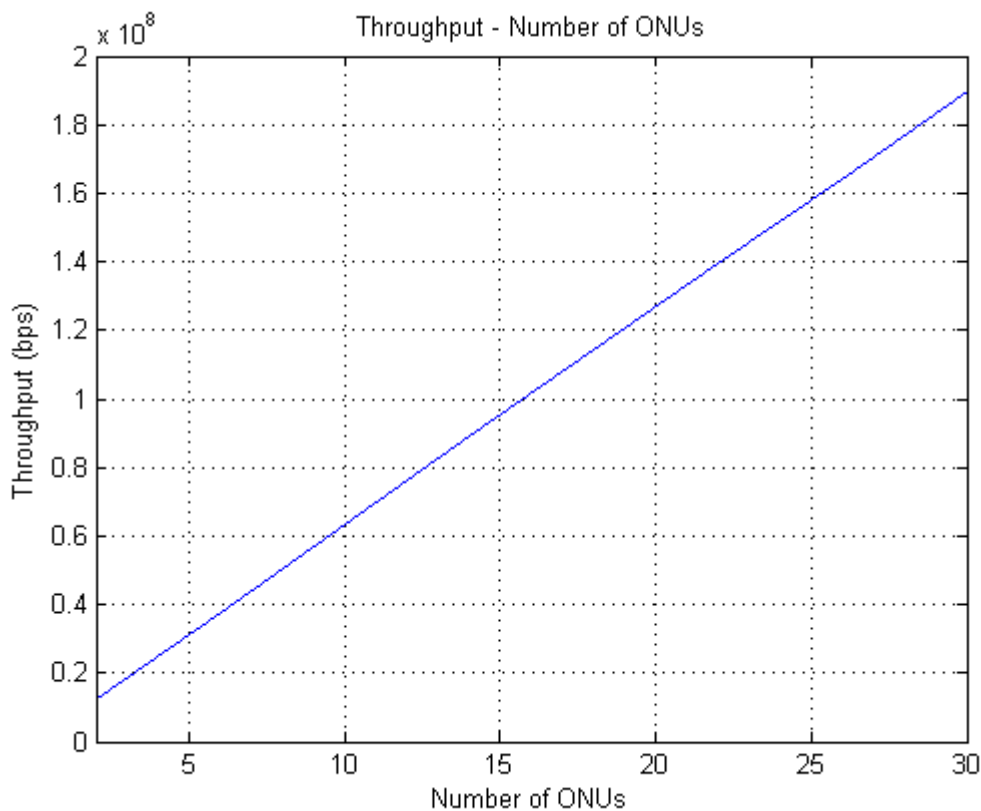
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου (throughput) σε bps δίνεται από τη σχέση:

$$\text{ρυθμοαπόδοση} = (\text{απεσταλμένα bytes} * 8) / \text{Χρόνος προσομοίωσης}$$

ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.10 παρακάτω:



**Γράφημα 4.10:** Ρυθμοαπόδοση δικτύου – Αριθμός ONUs (Σενάριο 1)

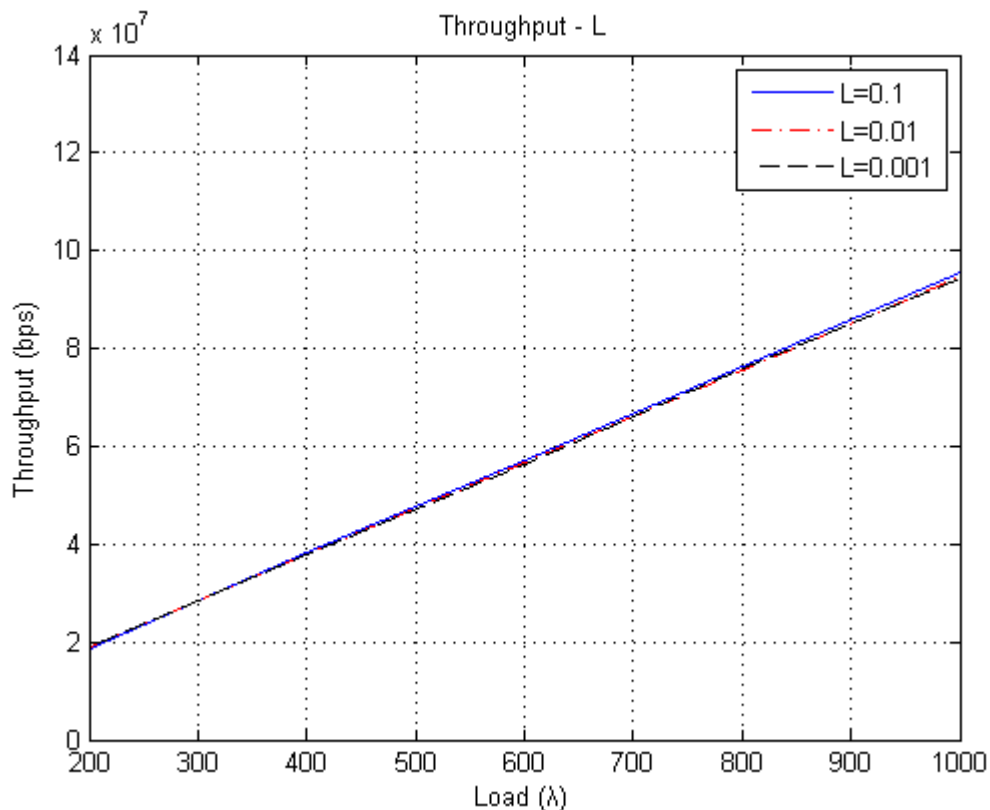
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ONUs τόσο περισσότερα δεδομένα σε bytes αποστέλλονται.

## Δ.2 – Ρυθμοαπόδοση του δικτύου σε σχέση με τη μεταβλητή $L$ του Learning Automata (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του  $\lambda$  από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή  $L$  (Learning Automata) μεταβαλλόμενη, με τιμές  $L = 0.1$ ,  $L = 0.01$ ,  $L = 0.001$

Ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου (throughput) σε bps, προκύπτει όπως και στην προηγούμενη μέτρηση Δ.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.11 παρακάτω:



Γράφημα 4.11: Ρυθμοαπόδοση δικτύου – μεταβλητή  $L$  (Σενάριο 1)

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της κίνησης (φόρτου) στο δίκτυο, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου αυξάνεται αντίστοιχα και αυτό είναι λογικό γιατί στο δίκτυο για αποστολή από τις ONU δημιουργείται μεγαλύτερος όγκος δεδομένων που αυτό σημαίνει και περισσότερα απεσταλμένα bytes κάθε φορά από τις ONUs στο OLT.

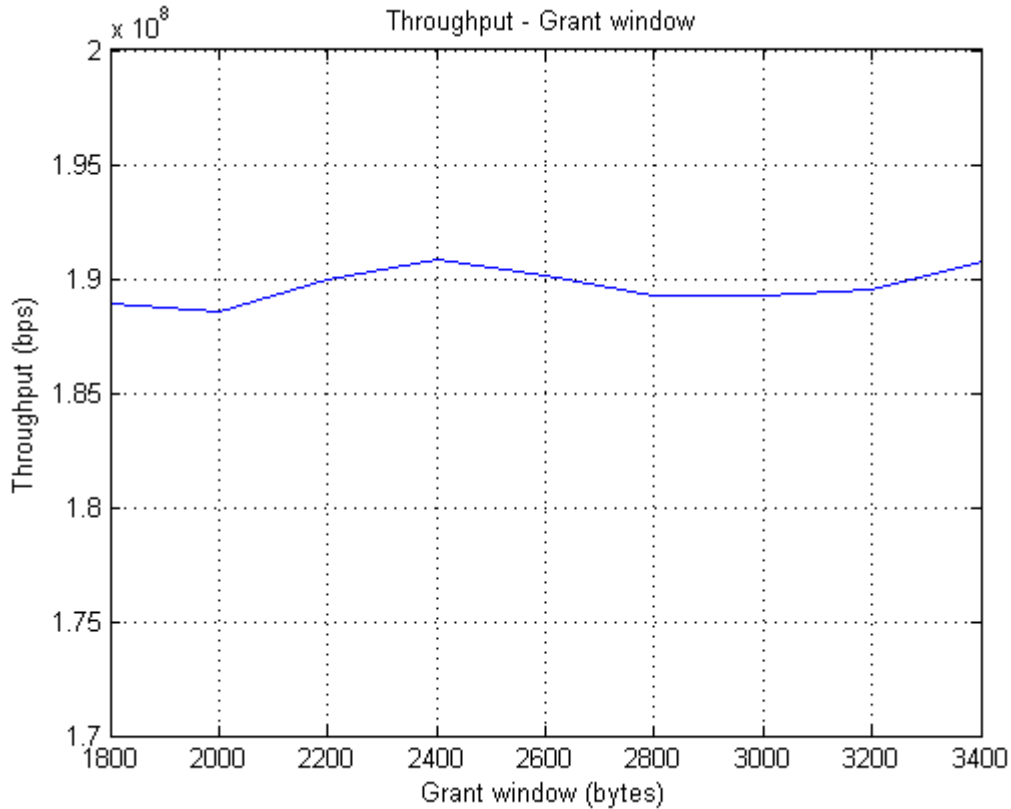
Επίσης παρατηρούμε ότι η μεταβλητή L δεν επηρεάζει την ρυθμοαπόδοση του δικτύου και ότι και για τις τρεις τιμές του αυτή παραμένει σταθερή και αυτό είναι λογικό με την έννοια ότι το Learning Automata και η μεταβλητή L δεν μεταβάλλουν το χρονικό διάστημα που χρειάζονται οι ONUs για να μεταδώσουν τα δηλωμένα bytes τους στο OLT και συνεπώς τον αριθμό των συνολικών bytes που θα μεταδοθούν, αλλά έχουν άμεση σχέση μόνο με το χρονικό διάστημα που αυτές είναι ανενεργές δηλαδή δεν θα έχουν δηλωμένα bytes για μετάδοση.

### **Δ.3 – Ρυθμοαπόδοση του δικτύου σε σχέση με το Grant window (Σενάριο 1)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 30
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$
- Grant window μεταβαλλόμενο με τιμές 1800 ως 3400 bytes, με βήμα 200 bytes

Ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου (throughput) σε msec, προκύπτει όπως και στην μέτρηση Δ.1 ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.12. Σε αυτό το γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το Grant window δηλαδή το περιθώριο του αριθμού των bytes που μπορούν να μεταδοθούν κάθε φορά από κάθε ONU προς το OLT μαζί με το REPORT, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου δεν μεταβάλλεται και αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των συνολικών bytes που μεταδίδονται δεν μεταβάλλεται.



**Γράφημα 4.12:** Ρυθμοαπόδοση του δικτύου – Grant window (Σενάριο 1)

### **E.1 – Μέσο σφάλμα μοντέλου σε σχέση με τη μεταβλητή L του Learning Automata (Σενάριο 1)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

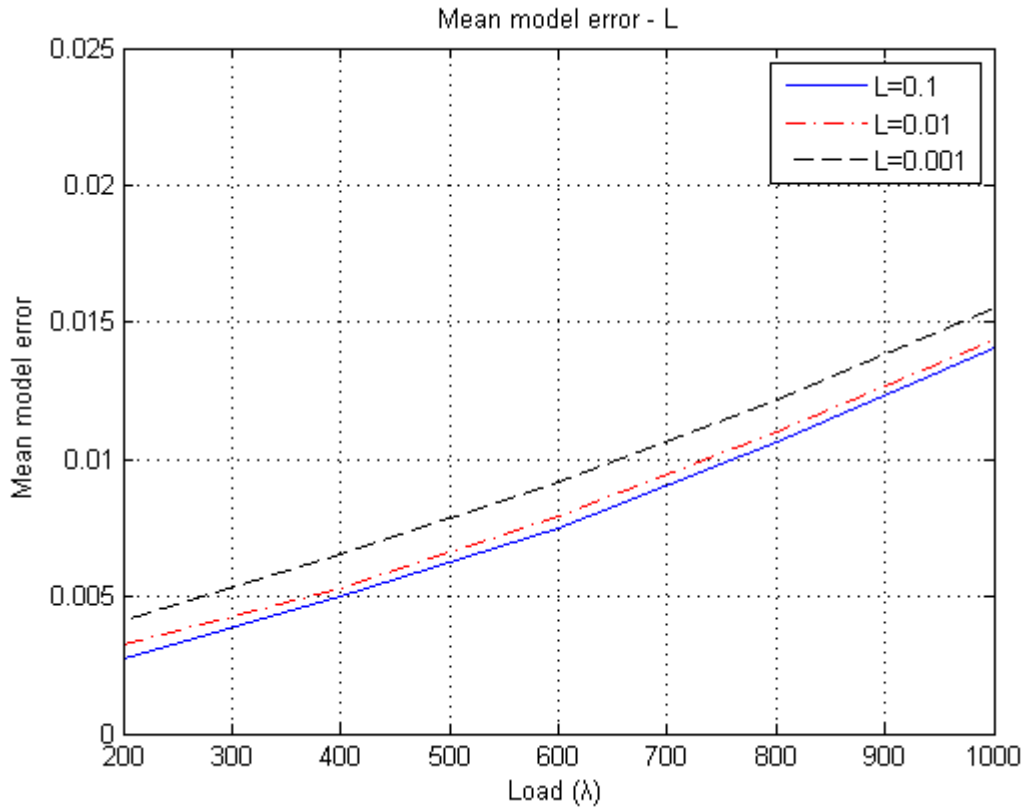
- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του λ από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) μεταβαλλόμενη, με τιμές  $L = 0.1$ ,  $L = 0.01$ ,  $L = 0.01$

Ο υπολογισμός του σφάλματος μοντέλου (model error) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{σφάλμα μοντέλου} = \frac{\text{απόλυτη τιμή (πραγματικός χρόνος ύπνου - εκτιμώμενος χρόνος ύπνου)}}{\text{εύρος τιμών διαστημάτων ύπνου}}$$

ενώ το μέσο σφάλμα μοντέλου (mean model error) προκύπτει από το άθροισμα των σφαλμάτων του μοντέλου διά του αριθμού των κύκλων ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.13 παρακάτω:





**Γράφημα 4.13:** Μέσο σφάλμα μοντέλου – μεταβλητή  $L$  (Σενάριο 1)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η κίνηση (φόρτος) του δικτύου, το μέσο σφάλμα μοντέλου (mean model error) αυξάνεται κατά ένα μικρό ποσοστό και αυτό είναι λογικό γιατί μεγαλύτερη κίνηση σημαίνει μεγαλύτερος αριθμός πακέτων με αποτέλεσμα το εύρος των τιμών του πραγματικού χρόνου ύπνου να μεγαλώνει και να επηρεάζει και την απόκλιση της πραγματικής τιμής από την εκτιμώμενη τιμή.

Σε ότι αφορά τη μεταβλητή  $L$  παρατηρούμε ότι το μέσο σφάλμα μοντέλου με  $L = 0.1$  είναι μικρότερο συνολικά σε σχέση με αυτό με  $L = 0.01$  και ακόμη μικρότερο σε σύγκριση με αυτό με  $L = 0.001$ . Κατά τα άλλα ισχύουν αυτά που αναφέρονται στη μέτρηση A.2, με την τιμή του  $L = 0.1$  να αντικατοπτρίζει την καλύτερη προσαρμογή του Learning Automata στις πραγματικές συνθήκες του δικτύου.

#### 4.4.2 Δεύτερο σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις απόδοσης και αποτελέσματα

Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης η παραγωγή της κίνησης στο δίκτυο γίνεται με τη βοήθεια ενός πίνακα που δημιουργείται από ξεχωριστά αρχεία κίνησης τύπου .txt, ένα για κάθε ONU. Οι μετρήσεις απόδοσης για το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνουν: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption), αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency),

μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) και ρυθμοαπόδοση throughput. Συνολικά στο δεύτερο σενάριο έγιναν τέσσερις μετρήσεις και προέκυψαν τα αντίστοιχα γραφήματα από αυτές. Οι μετρήσεις αυτές και τα αποτελέσματα αυτών έχουν ως εξής:

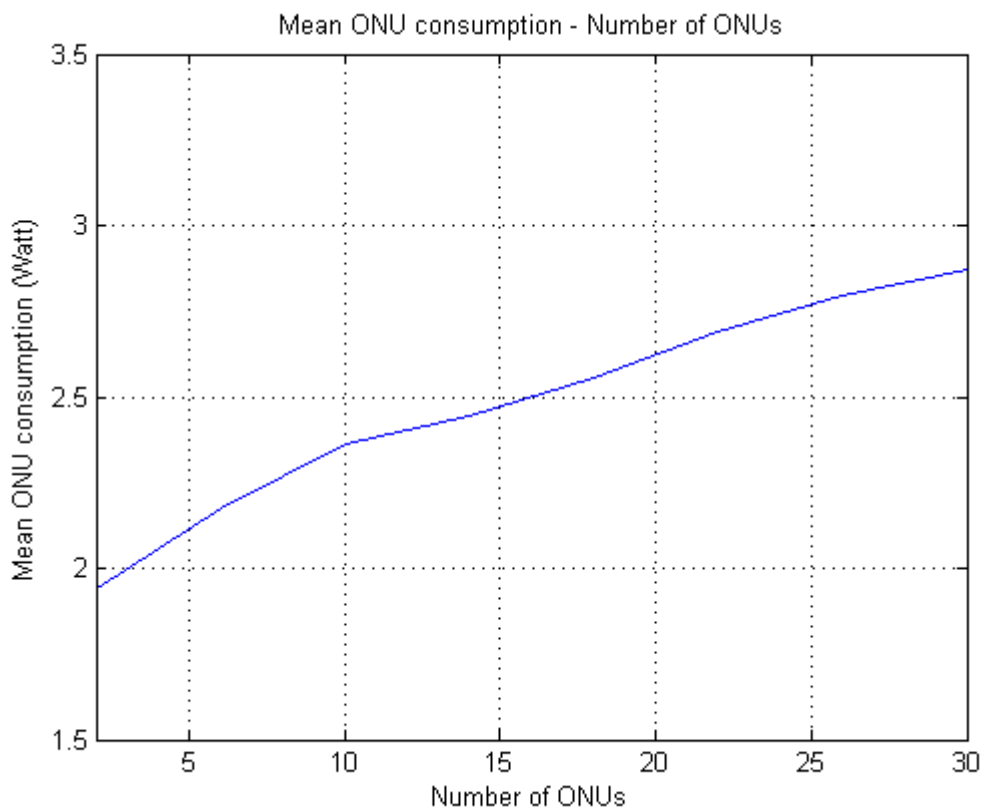
#### **A - Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 2)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης από ξεχωριστά αρχεία κίνησης τύπου .txt, ένα για κάθε ONU
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή, L = 0.1

Ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt, δίνεται από τη σχέση:

Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs =  $(4.69 * (\text{χρόνος προσομοίωσης} - \text{μέσος χρόνος ύπνου ONUs}) + 1.7 * \text{μέσος χρόνος ύπνου ONUs}) / \text{χρόνος προσομοίωσης}$   
ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο παρακάτω Γράφημα 4.14:



**Γράφημα 4.14:** Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs – αριθμός ONUs (Σενάριο 2)

Στο παραπάνω γράφημα όπως και στην αντίστοιχη μέτρηση του πρώτου σεναρίου (A.1), παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί μειώνεται αντίστοιχα ο μέσος χρόνος ύπνου των ONUs.

### **B – Energy efficiency σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 2)**

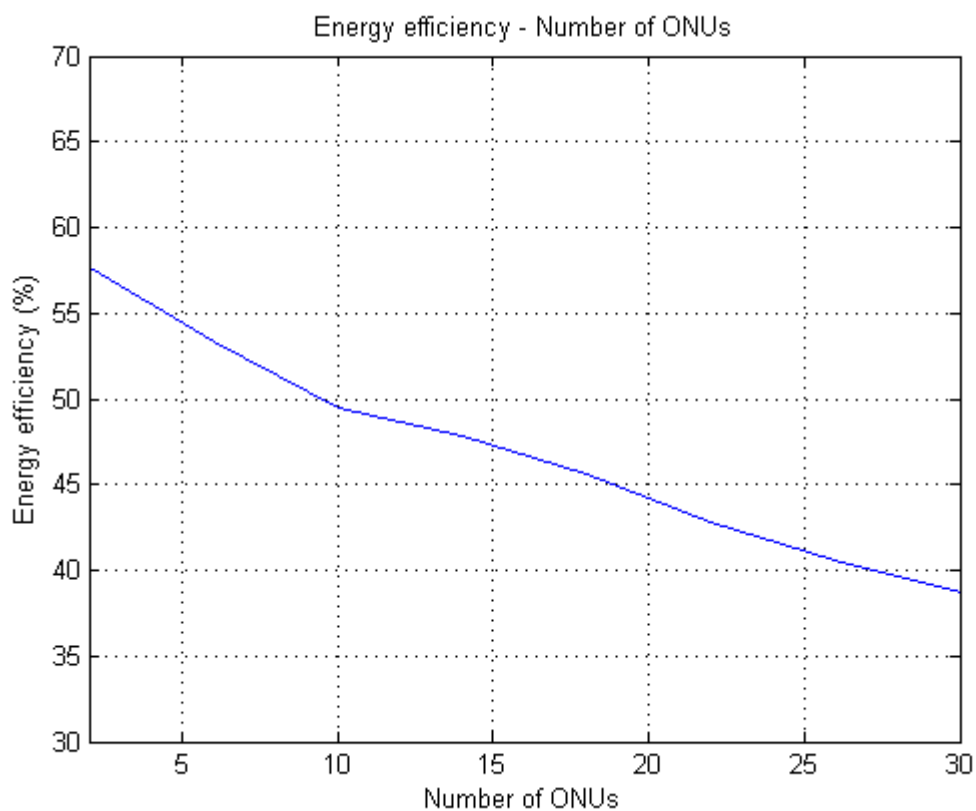
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης από ξεχωριστά αρχεία κίνησης τύπου .txt, ένα για κάθε ONU
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός του Energy efficiency επί τις %, δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Energy efficiency} = ((4.69 - \text{μέση κατανάλωση ισχύος ONUs}) * 100) / 4.69$$

ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.15 παρακάτω:



**Γράφημα 4.15:** *Energy efficiency – Αριθμός ONUs (Σενάριο 2)*

Στο παραπάνω γράφημα όπως και στην αντίστοιχη μέτρηση του πρώτου σεναρίου (B.1), παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) μειώνεται και αυτό είναι λογικό γιατί αυξάνεται αντίστοιχα η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs.

### Γ - Μέση καθυστέρηση πακέτου σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 2)

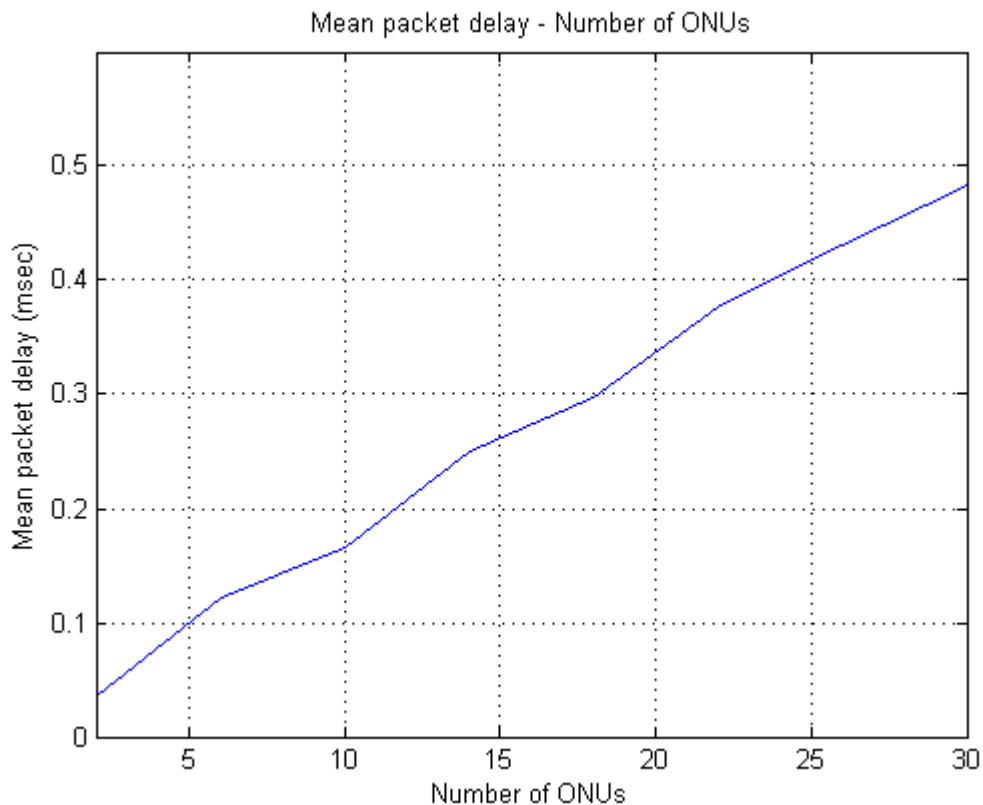
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης από ξεχωριστά αρχεία κίνησης τύπου .txt, ένα για κάθε ONU
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) σε msec δίνεται από τη σχέση:

$$\text{μέση καθυστέρηση πακέτου} = (\text{συνολικός χρόνος καθυστέρησης} / \text{απεσταλμένα πλαίσια}) * 10^3$$

ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.16 παρακάτω:



**Γράφημα 4.16:** Μέση καθυστέρηση πακέτου – Αριθμός ONUs (Σενάριο 2)

Στο παραπάνω γράφημα όπως και στην αντίστοιχη μέτρηση του πρώτου σεναρίου (Γ.1), παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η μέση καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ONUs τόσο πιο δύσκολο είναι να βρει η κάθε ONU το κανάλι μετάδοσης πάντα διαθέσιμο και αυτό σημαίνει μεγαλύτερη καθυστέρηση από την άφιξη του πακέτου σε αυτή μέχρι και τη μετάδοση του στο OLT .

#### Δ – Ρυθμοαπόδοση του δικτύου σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Σενάριο 2)

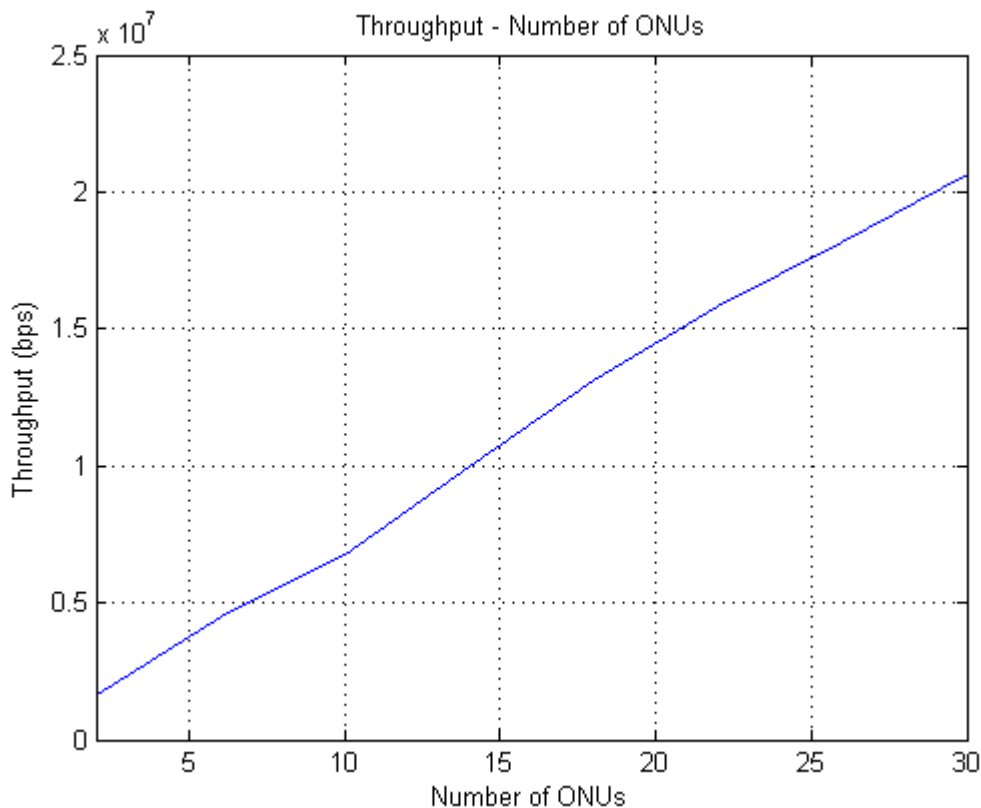
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) σταθερή, L = 0.1

Ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου (throughput) σε bps δίνεται από τη σχέση:

$$\text{ρυθμοαπόδοση} = (\text{απεσταλμένα bytes} * 8) / \text{Χρόνος προσομοίωσης}$$

ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.17 παρακάτω:



**Γράφημα 4.17:** Ρυθμοαπόδοση δικτύου – Αριθμός ONUs (Σενάριο 2)

Στο παραπάνω γράφημα όπως και στην αντίστοιχη μέτρηση του πρώτου σεναρίου (Δ.1), παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου αυξάνεται και αυτό είναι λογικό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ONUs τόσο περισσότερα δεδομένα σε bytes αποστέλλονται.

#### **4.5 Σύγκριση - Μετρήσεις απόδοσης και αποτελέσματα σύγκρισης**

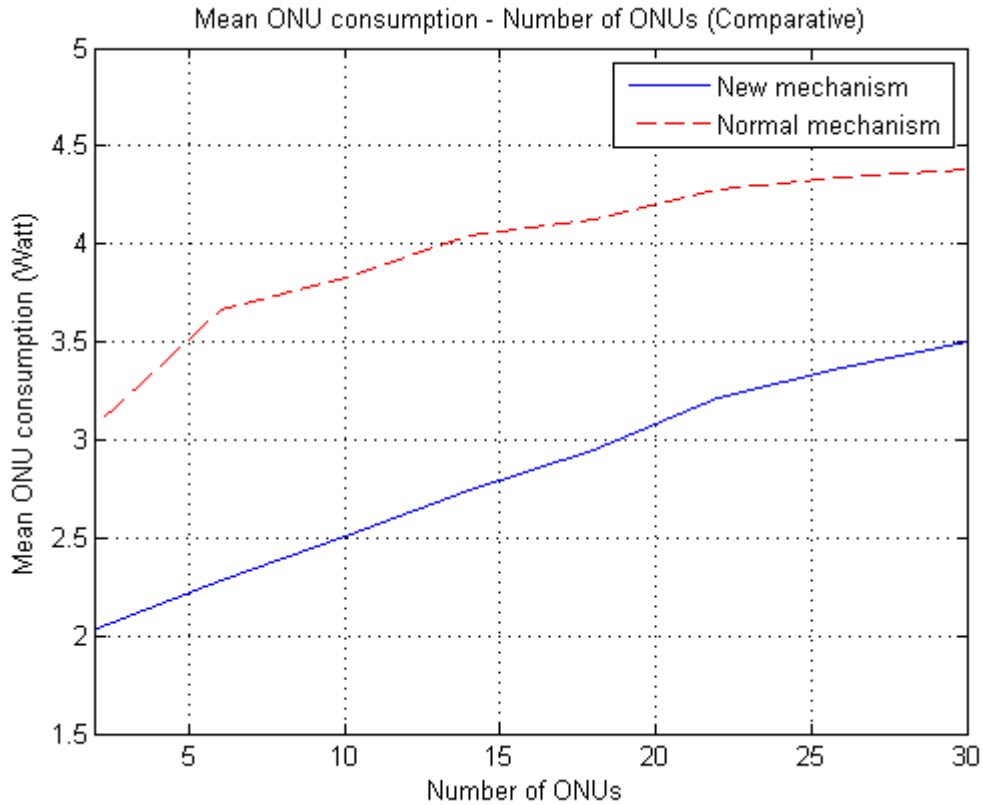
Προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού με κάποιον άλλο μηχανισμό μείωσης κατανάλωσης ενέργειας, έγινε η υλοποίηση με προσομοίωση ενός μηχανισμού στον οποίο το χρονικό διάστημα απενεργοποίησης των ONUs κάθε φορά που μια ONU δεν έχει να δηλώσει bytes είναι συγκεκριμένο και μεταβάλλεται μόνο με βάση τον αριθμό των ONUs. Το χρονικό αυτό διάστημα αυξάνει αναλογικά όσο μεγαλώνει ο αριθμός των ONUs. Οι μετρήσεις απόδοσης για τη σύγκριση των δυο μηχανισμών περιλαμβάνουν: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption), αποδοτικότητα ενέργειας (energy efficiency), μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) και ρυθμοαπόδοση (throughput). Έγιναν συνολικά οκτώ μετρήσεις και προέκυψαν τα αντίστοιχα γραφήματα από αυτές. Οι μετρήσεις αυτές και τα συγκριτικά αποτελέσματα αυτών έχουν ως εξής:

##### **A.1 - Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Συγκριτικό)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς σταθερή, με μέση τιμή του  $\lambda$  ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt, προκύπτει όπως και στην μέτρηση A.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.18 παρακάτω:



**Γράφημα 4.18:** Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs – αριθμός ONUs (Συγκριτικό)

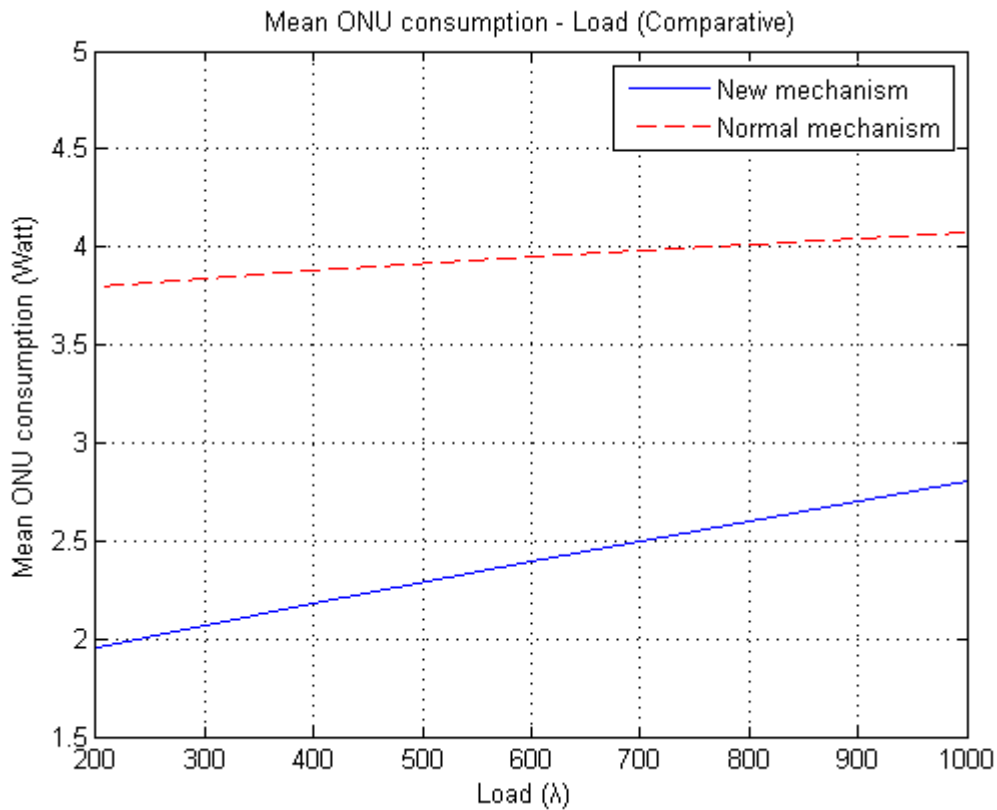
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs και στους δυο μηχανισμούς αυξάνεται, με τη διαφορά ότι αυτή του προτεινόμενου μηχανισμού (New mechanism) είναι αισθητά μικρότερη ως τιμή κάθε φορά, από αυτή του τυπικού μηχανισμού (Normal mechanism). Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της μέσης κατανάλωσης ισχύος των ONUs ως προς τον αριθμό των ONUs, η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος είναι πολύ καλύτερη από αυτή του τυπικού σχήματος.

#### **A.2 - Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs σε σχέση με το φόρτο του δικτύου (Συγκριτικό)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του λ από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης των ONUs (mean ONU consumption) σε Watt, προκύπτει όπως και στην μέτρηση A.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.19 παρακάτω:



**Γράφημα 4.19:** Μέση κατανάλωση ισχύος ONUs – φόρτος του δικτύου (Συγκριτικό)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η κίνηση (φόρτος) του δικτύου, η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs αυξάνεται και στους δυο μηχανισμούς, με τη διαφορά ότι αυτή του προτεινόμενου μηχανισμού (New mechanism) είναι αισθητά μικρότερη ως τιμή κάθε φορά, από αυτή του τυπικού μηχανισμού (Normal mechanism). Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της μέσης κατανάλωσης ισχύος των ONUs ως προς τον φόρτο του δικτύου, η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος είναι πολύ καλύτερη από αυτή του τυπικού σχήματος.

### **B.1 – Energy efficiency σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Συγκριτικό)**

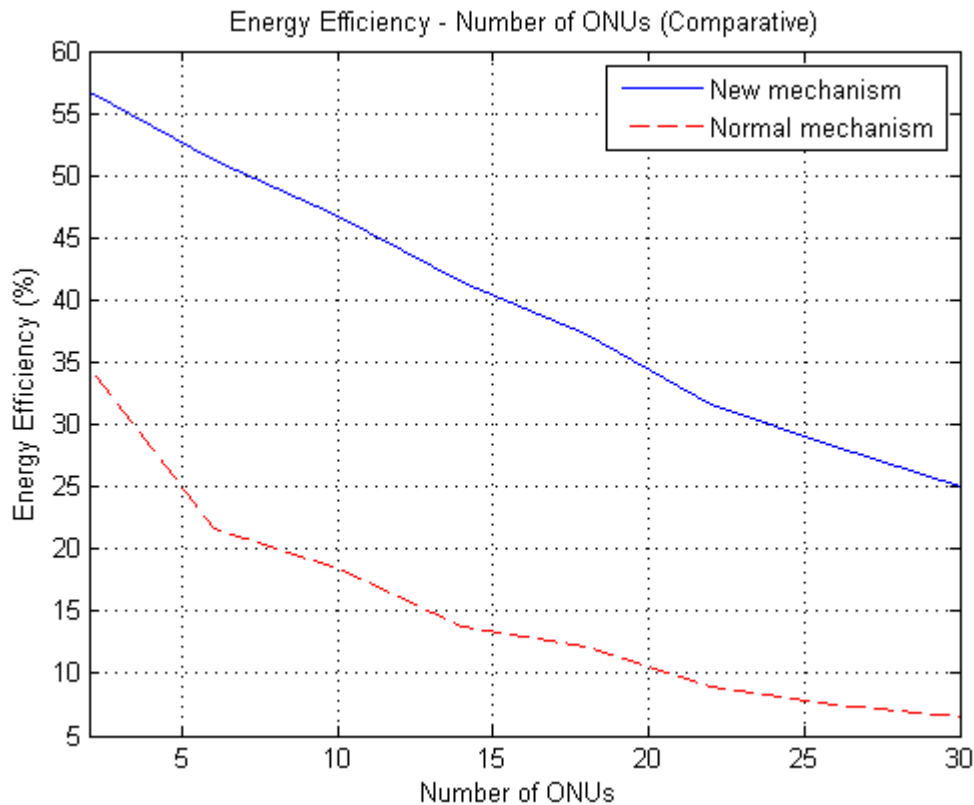
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς σταθερή, με μέση τιμή του  $\lambda$  ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt



- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός του energy efficiency επί τις %, προκύπτει όπως και στην μέτρηση B.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.20 παρακάτω:



**Γράφημα 4.20:** *Energy efficiency – αριθμός ONUs (Συγκριτικό)*

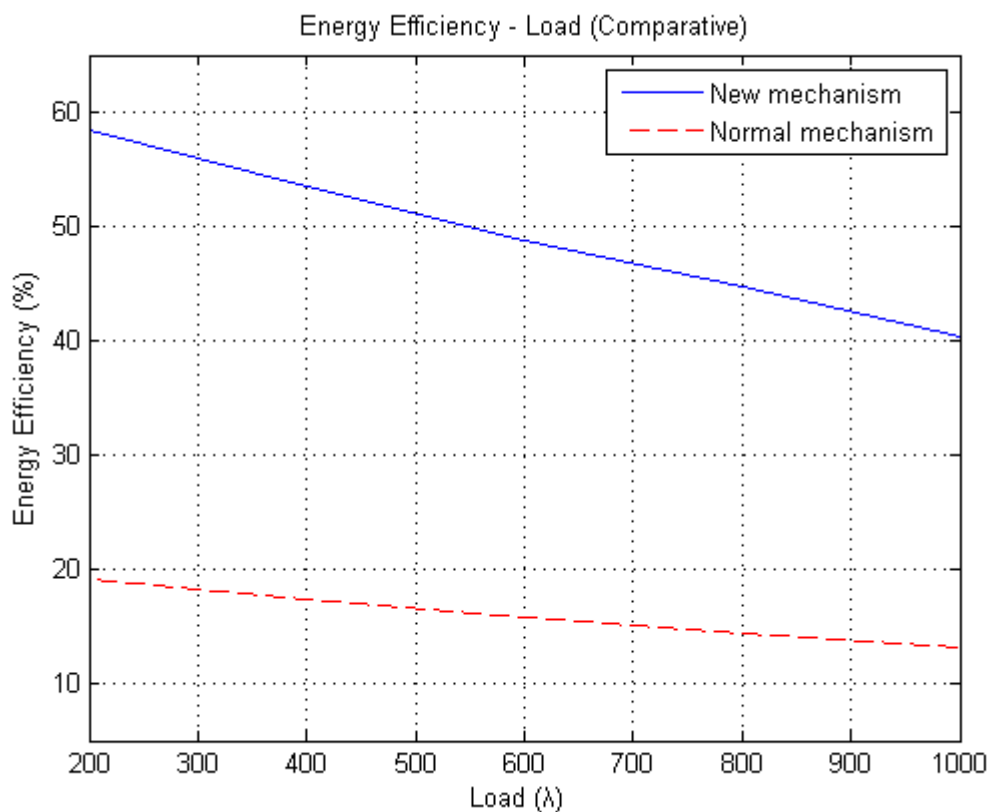
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) και στους δυο μηχανισμούς μειώνεται, με τη διαφορά ότι αυτή του προτεινόμενου μηχανισμού (New mechanism) είναι αισθητά μεγαλύτερη ως τιμή κάθε φορά, από αυτή του τυπικού μηχανισμού (Normal mechanism). Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας ως προς τον αριθμό των ONUs, η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος είναι πολύ καλύτερη από αυτή του τυπικού σχήματος.

## **B.2 – Energy efficiency σε σχέση με το φόρτο του δικτύου (Συγκριτικό)**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του  $\lambda$  από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός του energy efficiency επί τις %, προκύπτει όπως και στην μέτρηση B.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.21 παρακάτω:



**Γράφημα 4.21:** *Energy efficiency – φόρτος του δικτύου (Συγκριτικό)*

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η κίνηση (φόρτος) του δικτύου, η αποδοτικότητα (εξοικονόμηση) ενέργειας (energy efficiency) μειώνεται και στους δυο μηχανισμούς, με τη διαφορά ότι αυτή του προτεινόμενου μηχανισμού (New mechanism) είναι αισθητά μεγαλύτερη ως τιμή κάθε φορά, από αυτή του τυπικού μηχανισμού (Normal mechanism).

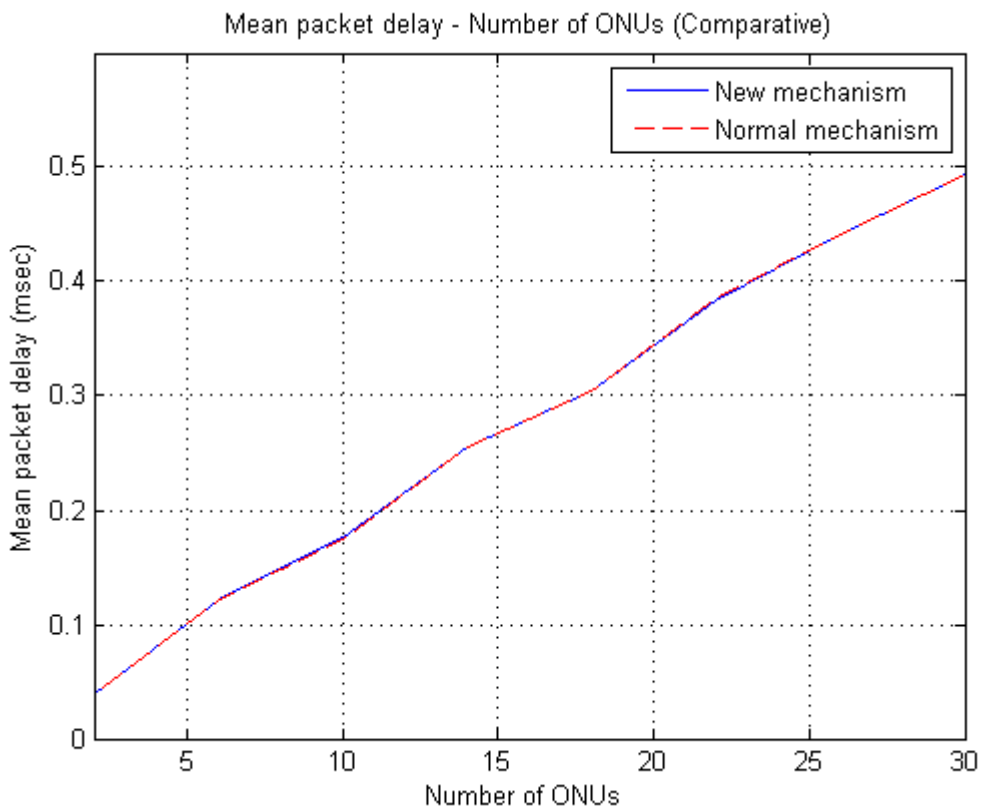
Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας ως προς τον φόρτο του δικτύου, η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος είναι πολύ καλύτερη από αυτή του τυπικού σχήματος.

### Γ.1 - Μέση καθυστέρηση πακέτου σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Συγκριτικό)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς σταθερή, με μέση τιμή του λ ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) σε msec, προκύπτει όπως και στην μέτρηση Γ.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.22 παρακάτω:



**Γράφημα 4.22:** Μέση καθυστέρηση πακέτου – Αριθμός ONUs (Συγκριτικό)

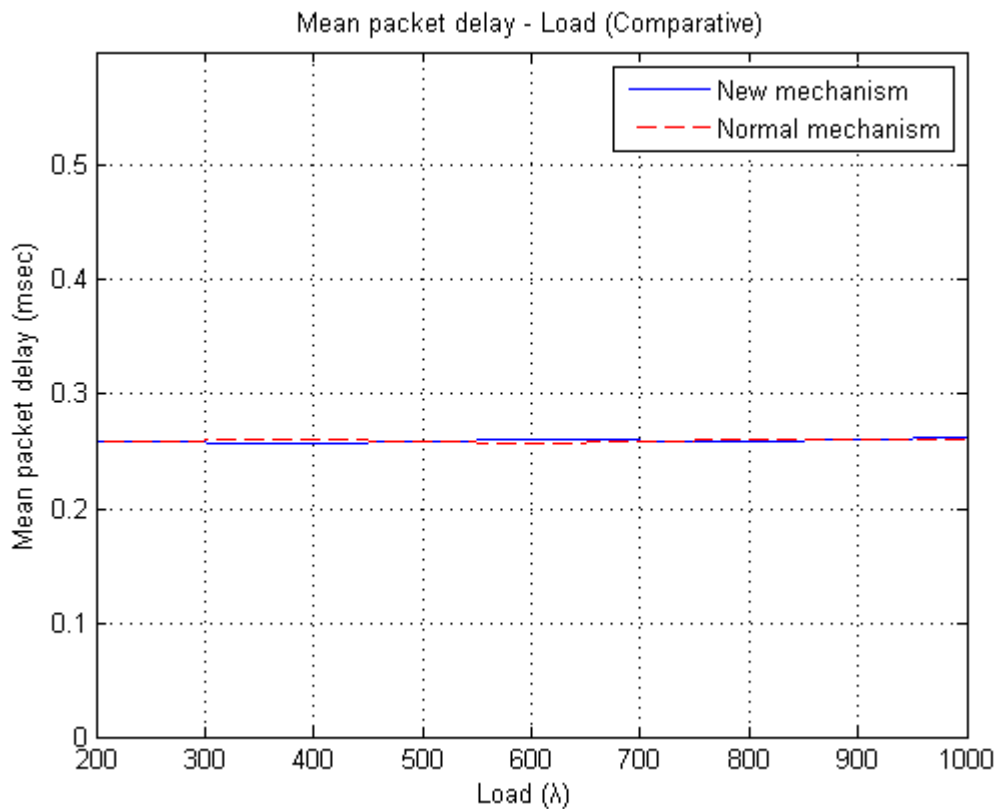
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η μέση καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται και είναι η ίδια κάθε φορά και στους δυο μηχανισμούς. Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της μέσης καθυστέρησης πακέτου ως προς τον αριθμό των ONUs, οι δύο μηχανισμοί έχουν την ίδια απόδοση.

## Γ.2 – Μέση καθυστέρηση πακέτου σε σχέση με το φόρτο του δικτύου (Συγκριτικό)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του  $\lambda$  από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης πακέτου (mean packet delay) σε msec, προκύπτει όπως και στην μέτρηση Γ.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.23 παρακάτω:



Γράφημα 4.23: Μέση καθυστέρηση πακέτου – φόρτος του δικτύου (Συγκριτικό)

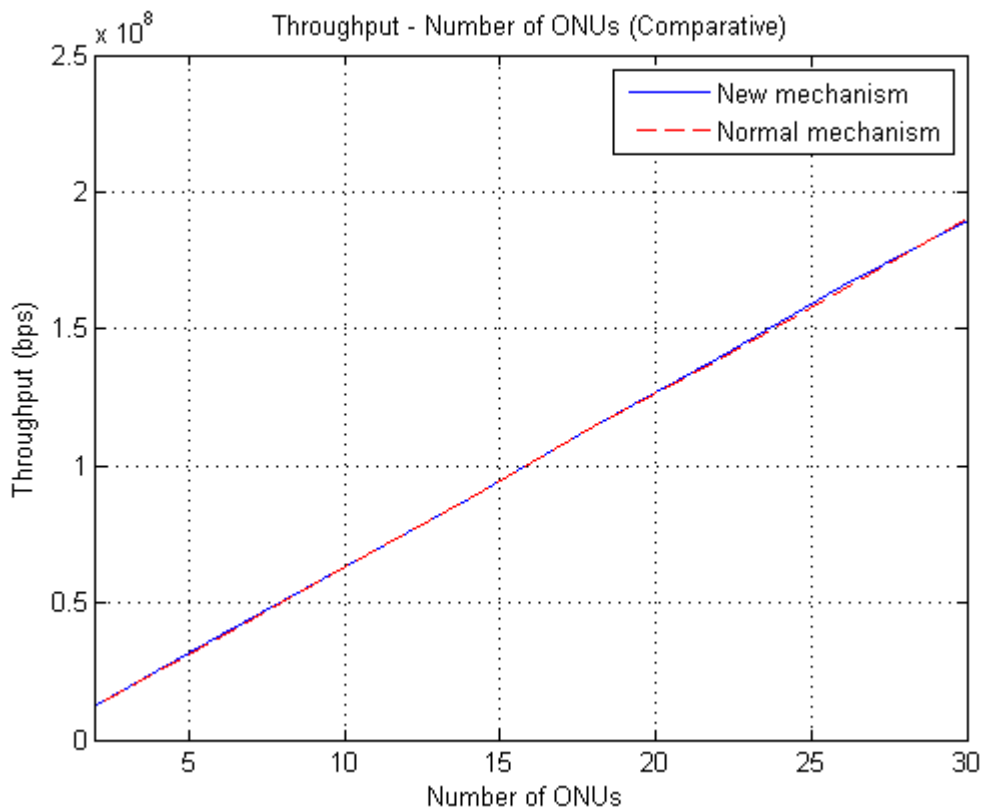
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο φόρτος (κίνηση) του δικτύου μεγαλώνει, η μέση καθυστέρηση πακέτου παραμένει σταθερή και η ίδια κάθε φορά και στους δυο μηχανισμούς. Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της μέσης καθυστέρησης πακέτου ως προς τον φόρτο του δικτύου, οι δύο μηχανισμοί έχουν την ίδια απόδοση.

#### Δ.1 – Ρυθμοαπόδοση του δικτύου σε σχέση με τον αριθμό των ONUs (Συγκριτικό)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς σταθερή, με μέση τιμή του λ ίση με 1000
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs μεταβαλλόμενος από 2 μέχρι 30 με βήμα 4
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου (throughput) σε bps, προκύπτει όπως και στην μέτρηση Δ.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.24 παρακάτω:



**Γράφημα 4.24:** Ρυθμοαπόδοση του δικτύου – Αριθμός ONUs (Συγκριτικό)

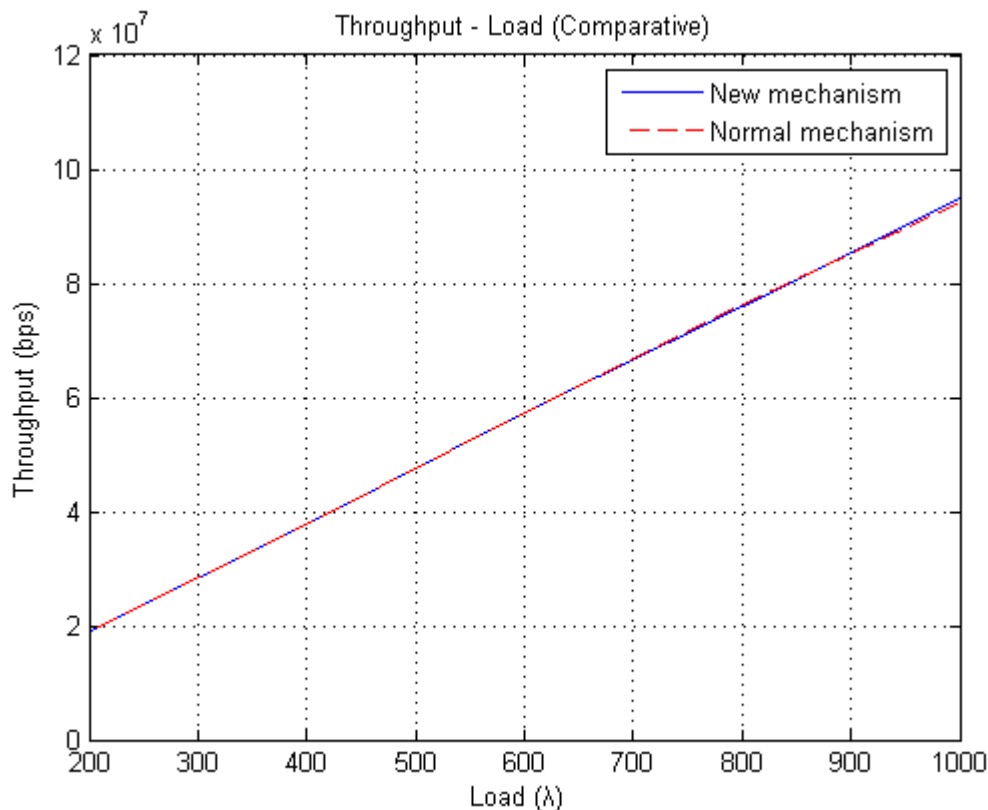
Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο αριθμός των ONUs μεγαλώνει, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου αυξάνεται και είναι η ίδια κάθε φορά και στους δύο μηχανισμούς. Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου ως προς τον αριθμό των ONUs, οι δύο μηχανισμοί έχουν την ίδια απόδοση.

#### Δ.2 – Ρυθμοαπόδοση του δικτύου σε σχέση με το φόρτο του δικτύου (Συγκριτικό)

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 3 sec
- παραγωγή κίνησης και στους δύο μηχανισμούς μεταβαλλόμενη με μέση τιμή του  $\lambda$  από 200 ως 1000 με βήμα 200
- κατανάλωση ισχύος ONU σε κανονική λειτουργία 4.69 Watt
- κατανάλωση ισχύος ONU σε μερική ύπνωση 1.7 Watt
- αριθμός ONUs σταθερός και ίσος με 15
- μεταβλητή L (Learning Automata) για το προτεινόμενο σχήμα σταθερή,  $L = 0.1$

Ο υπολογισμός της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου (throughput) σε msec, προκύπτει όπως και στην μέτρηση Δ.1 του πρώτου σεναρίου ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο Γράφημα 4.25 παρακάτω:



Γράφημα 4.25: Ρυθμοαπόδοση του δικτύου – φόρτος του δικτύου (Συγκριτικό)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όσο ο φόρτος του δικτύου μεγαλώνει, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου αυξάνεται και είναι η ίδια κάθε φορά και στους δυο μηχανισμούς. Αυτό σημαίνει ότι στον τομέα της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου ως προς τον φόρτο του δικτύου, οι δύο μηχανισμοί έχουν την ίδια απόδοση.

## 5. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 5.1 Συμπεράσματα

Με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης η κατανάλωση ενέργειας των παθητικών οπτικών δικτύων τύπου 10G-EPON μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε σύγκριση με εκείνη των 1G-EPON δικτύων. Είναι πολύ σημαντικό να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας των 10G-EPON δικτύων για χαμηλά λειτουργικά έξοδα αλλά και για φιλικότητα προς το περιβάλλον.

Για το σκοπό αυτό στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένας νέος μηχανισμός μείωσης κατανάλωσης ενέργειας για Παθητικά Οπτικά Δίκτυα τύπου 10G-EPON. Το νέο αυτό σχήμα, χρησιμοποιεί με αποδοτικό τρόπο την ύπνωση των ONUs στην κατεύθυνση της εκπομπής (transmitter sleep), ώστε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας των μονάδων οπτικού δικτύου (Optical Network Units - ONUs) , όταν υπάρχει έλλειψη δικτυακής κίνησης ή υπολειτουργία των αυτών. Ο μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας εμπνεύστηκε από τον τομέα έρευνας των Learning Automata. Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης που κατασκευάστηκε από την αρχή σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (event-driven programming). Τα συγκριτικά συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα των δυο βασικών σεναρίων προσομοίωσης και της σύγκρισης του νέου σχήματος με ένα άλλο τυπικό σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας που υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε για το σκοπό αυτό. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από τις μετρήσεις απόδοσης οι οποίες είναι οι εξής: μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption), αποδοτικότητα ενέργειας (energy efficiency), μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) και ρυθμοαπόδοση (throughput).

Σε ότι αφορά την μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (mean ONU consumption) το συμπέρασμα που εξάγεται τόσο από τα δύο βασικά σεναρία αλλά και από τη σύγκριση των δυο μηχανισμών, είναι ότι αυτή μεγαλώνει ανάλογα με την αύξηση του αριθμού των ONUs (σεναρία 1 και 2, σύγκριση δύο σχημάτων), με τις τιμές που πάρθηκαν για το νέο σχήμα να είναι σε πολύ καλά χαμηλά επίπεδα. Ειδικά στη σύγκριση των δυο σχημάτων και από τη γραφική παράσταση απόδοσης που προέκυψε φαίνεται καθαρά η διαφορά και η καλύτερη απόδοση του νέου σχήματος από το τυπικό σχήμα. Το ίδιο παρατηρείται και στις μετρήσεις που έγιναν με μεταβολή του φόρτου (κίνησης) στο δίκτυο, τόσο στο πρώτο σενάριο όσο και κατά τη σύγκριση των δυο μηχανισμών, όπου η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs βρέθηκε να είναι σε πολύ ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα σε ότι αφορά τον νέο μηχανισμό με αποτέλεσμα αυτός να έχει πολύ καλύτερη απόδοση από τον τυπικό . Στο πρώτο σενάριο η μέτρηση αυτή έγινε για τρεις



διαφορετικές τιμές της μεταβλητής  $L$  του learning Automata όπου φαίνεται ότι για μικρότερη τιμή του  $L$  η μέση κατανάλωση ισχύος είναι χαμηλότερη. Βέβαια η τιμή που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματική λειτουργία του δικτύου είναι η  $L=0.1$ . Σε σχέση τώρα με τη μεταβολή του grant window με βάση τη μέτρηση που έγινε στο πρώτο σενάριο, το συμπέρασμα είναι ότι όσο μεγαλώνει το grant window η μέση κατανάλωση ισχύος των ONU's ελαττώνεται και βρίσκεται σε πολύ ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα.

Το συμπέρασμα σε ότι αφορά την αποδοτικότητα της ενέργειας (energy efficiency), τόσο από τα δύο βασικά σενάρια αλλά και από τη σύγκριση των δύο μηχανισμών, είναι ότι αυτή μειώνεται ανάλογα με την αύξηση του αριθμού των ONU's (σενάρια 1 και 2, σύγκριση δύο σχημάτων), με τις τιμές που πάρθηκαν για το νέο σχήμα να είναι σε πολύ ικανοποιητικά υψηλά επίπεδα, που αυτό σημαίνει ικανοποιητική εξοικονόμηση ενέργειας. Ειδικά στη σύγκριση των δύο σχημάτων και από τη γραφική παράσταση απόδοσης που προέκυψε φαίνεται καθαρά η διαφορά και η καλύτερη απόδοση του νέου σχήματος από το τυπικό σχήμα σε ότι αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας. Στις μετρήσεις που έγιναν με μεταβολή του φόρτου (κίνησης) στο δίκτυο, τόσο στο πρώτο σενάριο όσο και κατά τη σύγκριση των δύο μηχανισμών, η εξοικονόμηση ενέργειας με τον νέο μηχανισμό μετρήθηκε σε πολύ ικανοποιητικά υψηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα αυτός να έχει πολύ καλύτερη απόδοση από τον τυπικό. Στο πρώτο σενάριο η μέτρηση αυτή έγινε για τρεις διαφορετικές τιμές της μεταβλητής  $L$  του learning Automata όπου φαίνεται ότι για μικρότερη τιμή του  $L$  η εξοικονόμηση ενέργειας είναι υψηλότερη. Η τιμή παρόλα αυτά που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματική λειτουργία του δικτύου είναι η  $L=0.1$ . Σε σχέση τώρα με τη μεταβολή του grant window με βάση τη μέτρηση που έγινε στο πρώτο σενάριο, το συμπέρασμα είναι ότι όσο μεγαλώνει το grant window η εξοικονόμηση ενέργειας μεγαλώνει και η γραφική παράσταση της απόδοσης δείχνει ότι βρίσκεται σε πολύ καλά υψηλά επίπεδα.

Το συμπέρασμα για το προτεινόμενο σχήμα σε σχέση με την μέση καθυστέρηση πακέτου (mean packet delay) και με βάση τις μετρήσεις από τα δύο βασικά σενάρια και την σύγκριση των δύο μηχανισμών είναι ότι αυτή μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των ONU's (σενάρια 1 και 2, σύγκριση σχημάτων) και μικραίνει με την αύξηση του grant window (σενάριο 1) ενώ παραμένει σταθερή στη μεταβολή του φόρτου του δικτύου (σενάριο 1, σύγκριση σχημάτων). Η απόδοση των δύο σχημάτων είναι η ίδια σε σχέση με την μέση καθυστέρηση πακέτου όπως φαίνεται και από τη γραφική παράσταση της απόδοσης στη σύγκριση των δύο σχημάτων. Ένα πιο γενικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός δεν επιβαρύνει το δίκτυο με μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση πακέτου.

Σε ότι αφορά την ρυθμοαπόδοση (throughput) του δικτύου το συμπέρασμα με βάσει τις μετρήσεις από τα δύο βασικά σενάρια και την σύγκριση των δύο μηχανισμών είναι ότι αυτή μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των ONUs (σενάρια 1 και 2, σύγκριση σχημάτων) και παραμένει σταθερή με μεταβολή του grant window (σενάριο 1) ενώ μεγαλώνει με την αύξηση του φόρτου του δικτύου (σενάριο 1, σύγκριση σχημάτων). Η απόδοση των δύο σχημάτων σε σχέση με την ρυθμοαπόδοση του δικτύου είναι η ίδια, όπως φαίνεται και από τη γραφική παράσταση της απόδοσης στη σύγκριση των δύο σχημάτων. Ένα πιο γενικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός δεν επιδρά αρνητικά στο δίκτυο σε ότι αφορά τη ρυθμοαπόδοση.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το νέο αυτό προτεινόμενο σχήμα μείωσης κατανάλωσης ενέργειας για Παθητικά Οπτικά Δίκτυα τύπου 10G-EPON, βάσει των δύο σεναρίων προσομοίωσης καθώς και της σύγκρισης του με έναν άλλο μηχανισμό, παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε ότι έχει να κάνει με την μείωση της μέσης κατανάλωσης ισχύος των ONUs και συνεπώς και στην εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητική απόδοση. Στα πλεονεκτήματα του νέου σχήματος συμπεριλαμβάνεται το ότι δεν επιβαρύνει αρνητικά την μέση καθυστέρηση πακέτου αλλά και την ρυθμοαπόδοση του δικτύου. Συνεπώς καλύπτει τους στόχους και τις απαιτήσεις που τέθηκαν για την υλοποίηση του, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του σε σχέση με την κίνηση που αυτό εξυπηρετεί.

## 5.2 Μελλοντική εργασία

Είναι γνωστό ότι η τεχνολογία των οπτικών ινών και ειδικότερα τα παθητικά οπτικά δίκτυα θα συνεχίσουν επί πολλά χρόνια να αποτελούν τη βασική τεχνολογία αιχμής για τη μετάδοση και την υποστήριξη των ευρυζωνικών υπηρεσιών. Με βάση τα παραπάνω αλλά και τη σημαντικότητα και τη βαρύτητα που έχει το ζήτημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στην εξέλιξη και την βελτίωση της απόδοσης των παθητικών οπτικών δικτύων και ειδικότερα των 10G-EPON δικτύων, η ερευνητική δραστηριότητα σε αυτό τον τομέα της τεχνολογίας είναι ήδη σημαντική και θα συνεχίσει να είναι και στο μέλλον με το να επιδεικνύει αμείωτο ενδιαφέρον και να ασχολείται συνεχώς προτείνοντας νέες ενεργειακά αποδοτικές λύσεις.

Η μελλοντική εργασία σε σχέση με το νέο αυτό προτεινόμενο σχήμα που εμπνεύστηκε από το Learning Automata, θα μπορούσε να είναι αρχικά η υλοποίηση και άλλων νέων σεναρίων προσομοίωσης και η σύγκριση και με άλλους αντίστοιχους μηχανισμούς μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας για την εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων χρήσιμων για την απόδοση και τη λειτουργικότητα του προτεινόμενου σχήματος.

Επιπλέον θα μπορούσε πάνω σε αυτό το βασικό μοντέλο να γίνει επέκταση του κώδικα είτε για την προσθήκη ποιότητας υπηρεσιών (QoS), είτε για τη βελτίωση του μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας όχι μόνο στην κατεύθυνση της μερικής ύπνωσης (απενεργοποίηση του πομπού της ONU), αλλά και της πλήρους ύπνωσης της ONU, δηλαδή της απενεργοποίησης τόσο του πομπού όσο και του δέκτη της ONU με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται αυτή να καθίσταται εντελώς “τυφλή” δεδομένου ότι δεν θα γνωρίζει την εισερχόμενη κίνηση προς αυτήν. Θα πρέπει δηλαδή να καταβληθεί προσπάθεια ώστε να αποφευχθεί η υποβάθμιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) που αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα στην παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών και ειδικά υπηρεσιών triple play.

## Βιβλιογραφία

- [1] Yi Zhang, Pulak Chowdhury, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee, “Energy Efficiency in Telecom Optical Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no 4, Fourth Quarter 2010.
- [2] G. Shen and R. S. Tucker, “Energy-minimized design for IP over WDM networks,” *IEEE/OSA J. Optical Commun. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 176–186, June 2009.
- [3] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsang, and S. Wright, “Power awareness in network design and routing,” *IEEE INFOCOM’08*, Phoenix, AZ, pp. 1130–1138, 2008.
- [4] C.-S. Li, Y. Ofek, and M. Yung, “Time-driven priority flow control for real-time heterogeneous Internetworking,” *IEEE INFOCOM’96*, San Francisco, CA, Mar. 1996.
- [5] M. Baldi and Y. Ofek, “Time for a greener Internet,” *IEEE International Conference on Communications Workshops (GreenComm’09)*, pp. 1–6, June 2009.
- [6] D. Grieco, A. Pattavina, and Y. Ofek, “Fractional lambda switching for flexible bandwidth provisioning in WDM networks: principles and performance,” *Photonic Network Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 281–296, May 2005.
- [7] C. Lange and A. Gladisch, “Energy consumption of telecommunication networks – a network operator’s view,” *OFC/NFOEC’09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, March 2009.
- [8] J. Baliga, R. Ayre, W. V. Sorin, K. Hinton, and R. S. Tucker, “Energy consumption in access networks,” *OFC/NFOEC’08*, San Diego, CA, Feb. 2008.
- [9] K. Ley, R. Bianchiniy, M. Martonosiz, and T. D. Nguyeny, “Cost and energy-aware load distribution across data centers,” *HotPower’09*, Big Sky, MT, Oct. 2009.
- [10] B. St. Arnaud, “CANet - news,” <http://emperor.canarie.ca/pipermail/news/2009/000720.html>, June 2009.
- [11] D. A. B. Miller, “Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips,” *Proc. IEEE*, vol. 88, no. 6, pp. 728–749, June 2000.
- [12] J. G. Koomey, “Estimating total power consumption by servers in the U.S. and the world,” Technical Report, Lawrence Berkeley National Laboratory, Feb. 2007.
- [13] K. J. Christensen, C. Gunaratne, B. Nordman, and A. D. George, “The next frontier for communications networks: power management,” *Elsevier Computer Communications*, vol. 27, no. 18, pp. 1758–1770, Aug. 2004.
- [14] M. Gupta and S. Singh, “Greening of the Internet,” *ACM SIGCOMM’ 03*, Karlsruhe, Germany, pp. 19–26, Aug. 2003.

- [15] M. Abrams *et al.*, “FTTP Deployments in the United States and Japan — Equipment Choices and Service Provider Imperatives,” *IEEE/OSA J. Lightwave Tech.*, vol. 23, no. 1, Jan. 2005, pp. 236–46.
- [16] Michael P. McGarry and Martin Reisslein, Arizona State University Martin Maier, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), “WDM Ethernet Passive Optical Networks”, IEEE Optical Communications, February 2006.
- [17] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, “IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (EPON),” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 2, Feb. 2002, pp. 74–80.
- [18] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, “Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network,” *Photonic Network Commun.*, vol. 3, no. 3, July 2001, pp. 307–19.
- [19] Michael P. McGarry, University of Akron Martin Reisslein, Arizona State University Martin Maier, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), “Ethernet Passive Optical Network Architectures and Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 3rd Quarter 2008.
- [20] T. Holmberg, “Analysis of EPONs under the Static Priority Scheduling Scheme with Fixed Transmission Times,” *Proc. IEEE Conf. Next Generation Internet Design and Engineering (NGI)*, Apr. 2006, pp. 192–99.
- [21] S.Bhatia, D. Garbuzov, and R. Bartos, “Analysis of the Gated IPACT Scheme for EPONs,” *Proc. IEEE ICC*, June 2006, pp. 2693–98.
- [22] F. Aurzada *et al.*, “Delay Analysis of Ethernet Passive Optical Networks with Gated Service,” Arizona State University Technical Report, Mar. 2007.
- [23] J. Zheng and H. Moustah, “Media Access Control for Ethernet Passive Optical Networks: An Overview,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 2, Feb. 2005, pp. 145–50.
- [24] C.Assi *et al.*, “Dynamic Bandwidth Allocation for Quality-of-Service over Ethernet PONs,” *IEEE JSAC*, vol. 21, no. 9, Nov. 2003, pp. 1467–77.
- [25] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks, 2nd Ed.*, Prentice Hall, 1991.
- [26] G.Kramer *et al.*, “Fair Queuing with Service Envelopes (FQSE): A Cousin-Fair Hierarchical Scheduler For Subscriber Access Networks,” *IEEE JSAC*, vol. 22, no. 8, Oct. 2004, pp. 1497–1513.
- [27] G. Kramer *et al.*, “Supporting Differentiated Classes of Service in Ethernet Passive Optical Networks,” *OSA J. Opt. Net.*, vol. 1, no. 8, Aug. 2002, pp. 280–98.
- [28] Y.Zhu, M. Ma, and T. Cheng, “Hierarchical Scheduling to Support Differentiated Services in Ethernet Passive Optical Networks,” *Computer Networks*, vol. 50, no. 3, Feb. 2006, pp. 350–66.

- [29] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, "Analysis and Simulation of a Fair Queuing Algorithm," *Internetworking: Research and Experience*, vol. 1, no. 1, Sept. 1990, pp. 3–26.
- [30] M. P. McGarry, M. Maier, and M. Reisslein, "Ethernet PONs: A Survey of Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) Algorithms," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 8, Aug. 2004, pp. S8–S15.
- [31] M. Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Prentice Hall, 2nd ed., 2002.
- [32] L. Valcarenghi, *Member, IEEE*, D. Pham Van, P. Castoldi, *Member, IEEE*, "How to Save Energy in Passive Optical Networks", *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2011 13th International Conference on.
- [33] E. Trojer and P. Eriksson: Power Saving Modes for GPON and VDSL, in *Proc. of 13th Euro. Conf. Netw. & Optical Commun. (NOC)*, Austria, Jun. 30–Jul. 3, 2008.
- [34] *IEEE Std 802.3az-2010 (Amendment to IEEE Std 802.3-2008)*, pp. 1-302, Oct. 27, 2010.
- [35] She-Hwa Yen *et al.*: Photonic components for future fiber access networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 6, Aug. 2010.
- [36] R. S. Tucker: Green Optical communications—Part II: Energy limitations in networks, *IEEE JSTQE*, vol. 17, no. 2, pp. 261-274, Mar.-Apr. 2011.
- [37] D. C. Kilper *et al.*: Fundamental limits on energy use in optical networks, in *Proc. of ECOC 2010*.
- [38] L. Valcarenghi, *et al.*: Impact of modulation formats on ONU energy saving, in *Proc. of ECOC 2010*.
- [39] "GPON Power Conservation", *ITU-T G-series Recommendations – Supplement 45 (G.sup45)*, 05/2009.
- [40] W. Freude *et al.*: Optically powered fiber networks, *Optics Express*, vol. 16, no. 26, 2008.
- [41] R. Kubo *et al.*: Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON, *IEEE/OSA JOCN*, vol. 2, no. 9, pp. 716-729, Sep. 2010.
- [42] Shing-Wa Wong, L. Valcarenghi, She-Hwa Yen, D.R. Campelo, S. Yamashita, L. Kazovsky: Sleep mode for energy saving PONs: Advantages and drawbacks, *GreenComm2, IEEE GLOBECOM Workshops*, 2009.
- [43] Klaus Grobe, Markus Roppelt, Achim Autenrieth, Jörg-Peter Elbers, and Michael Eiselt, ADVA AG Optical Networking, "Cost and Energy Consumption Analysis of Advanced WDM-PONs", *IEEE Communications Magazine*, February 2011.
- [44] Y. Luo and N. Ansari, "Bandwidth Allocation for Multiservice Access on EPONs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 2, 2005, pp. S16–S21.

- [45] Jingjing Zhang and Nirwan Ansari, New Jersey Institute of Technology, "Toward Energy-Efficient 1G-EPON and 10G-EPON with Sleep-Aware MAC Control and Scheduling", *IEEE Communications Magazine*, February 2011.
- [46] K. Cho *et al.*, "The Impact and Implications of the Growth in Residential User-to-User Traffic," *Proc. Conf. Apps., Tech., Architectures, Protocols for Comp. Commun.*, 2006.
- [47] R. Kubo *et al.*, "Sleep and Adaptive Link Rate Control for Power Saving in 10G-EPON Systems," *Proc. 2009 IEEE GLOBECOM*, 2009, pp. 1573–78.
- [48] C. Lange and A. Gladisch, "On the Energy Consumption of FTTH Access Networks," *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.*, 2009.
- [49] J. Baliga *et al.*, "Energy Consumption in Optical IP Networks," *IEEE/OSA J. Lightwave Tech.*, vol. 27, no. 13, 2009, pp. 2391–2403.
- [50] K. Tanaka, A. Agata, and Y. Horiuchi, "IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status," *IEEE/OSA J. Lightwave Tech.*, vol. 28, no. 4, Feb.15, 2010, pp. 651–61.
- [51] J. Mandin, "EPON Power Saving via Sleep Mode," IEEE P802. 3av 10GEPON Task Force Meeting, 2008.
- [52] R. Kubo *et al.*, "Adaptive Power Saving Mechanism for 10 Gigabit Class PON Systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E93-B, no.2, 2010, pp. 280–88.
- [53] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network," *Photonic Net. Commun.*, vol. 3, no. 3, 2001, pp. 307–19.
- [54] S. Lee and A. Chen, "Design and Analysis of a Novel Energy Efficient Ethernet Passive Optical Network," *Proc. 9th Int'l. Conf. Net.*, 2010.
- [55] Danping Ren, Hui Li, Yuefeng Ji, "Power Saving Mechanism and Performance Analysis for 10 Gigabit Class Passive Optical Network Systems", *Proceedings of IC-NIDC2010*.
- [56] G. Kramer and B. Mukherjee, "Interleaved polling with adaptive cycle time (IPACT): a dynamic bandwidth distribution scheme in an optical access network," *Photonic Network Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 89-107, 2002.
- [57] Kubo, J. Kani, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and K. Kumozaki , "Proposal and Performance Analysis of a Power-saving Mechanism for 10-Gigabit-class Passive Optical Network Systems," *Proc. NOC 2009 , Vol. 1, No. 1, pp. 87–94, Valladolid, Spain, 2009*.
- [58] IEEE 802.16e-2006, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems C Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, 2006.

- [59] Y. Xiao, "Energy saving Mechanism in the IEEE 802.16e Wireless MAN," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, pp. 595-597, Jul .2005.
- [60] NEC GE-PON Data Sheets, 2009 [Online], Available: <http://www.mec.co.jp>.
- [61] B. J. Oommen, "Recent advances in Learning Automata systems," *2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET 2010)*, pp.V1-724-V1-735, 16-18 April 2010.
- [62] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou, A. S. Pomportsis, "Adaptive Data Broadcasting in Underwater Wireless Networks," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol.35, no.3, pp.623-634, July 2010.
- [63] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou, P. G. Sarigiannidis, M. S. Obaidat, A. S. Pomportsis, "Adaptive Wireless Networks Using Learning Automata", *IEEE Wireless Communications Magazine*, accepted.
- [64] S. Misra, B. J. Oommen, S. Yanamandra, M. S. Obaidat, "Random Early Detection for Congestion Avoidance in Wired Networks: A Discretized Pursuit Learning-Automata-Like Solution," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol.40, no.1, pp.66-76, Feb. 2010.
- [65] Antonios Sarigiannidis, *Student Member, IEEE*, Petros Nicopolitidis, *Senior Member, IEEE*, Georgios Papadimitriou, *Senior Member, IEEE*, Panagiotis Sarigiannidis, *Member, IEEE*, Malamati Louta, *Member, IEEE*, "An Adaptive Model for Efficient Adjustment of the Downlink-to-Uplink Ratio in Mobile WiMAX Wireless Networks", Manuscript received August 8, 2011.