



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Αποδοτικές Αρχιτεκτονικές Οπτικού Δικτύου Καθοριζόμενου από
Λογισμικό και WDMA Στρατηγικών στο Edge**

Διπλωματική Εργασία

Βαΐα Αποστολίδου

Επιβλέπων: Γεώργιος Σταμούλης

Ιούνιος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

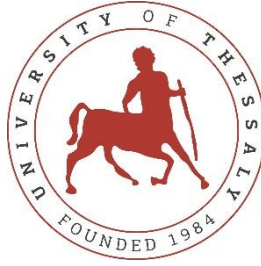
**Αποδοτικές Αρχιτεκτονικές Οπτικού Δικτύου Καθοριζόμενου από
Λογισμικό και WDMA Στρατηγικών στο Edge**

Διπλωματική Εργασία

Βαΐα Αποστολίδου

Επιβλέπων: Γεώργιος Σταμούλης

Ιούνιος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Efficient Software - Defined Optical Network Architectures
and WDMA Strategies at the Edge**

Diploma Thesis

Vaia Apostolidou

Supervisor: George Stamoulis

June 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Σταμούλης Γεώργιος Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Μπαζιάνα Περιστέρα Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Τζιρίτας Νικόλαος Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

Βαΐα Αποστολίδου

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Vaia Apostolidou

Ευχαριστίες

Στους γονείς μου και στον παππού μου, για την καθοριστική τους στήριξη, που έγινε έδαφος κάτω από τα πόδια μου και δρόμος μπροστά μου — χάρη σε εκείνους σπούδασα αυτό που δεν ήξερα ότι αγαπώ.

Αποδοτικές Αρχιτεκτονικές Οπτικού Δικτύου Καθοριζόμενου από Λογισμικό και WDMA Στρατηγικών στο Edge

Βαΐα Αποστολίδου

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη Οπτικών Δικτύων Καθοριζόμενων από Λογισμικό (Software-Defined Optical Networks – SDON), με έμφαση στην ενσωμάτωση τεχνικών Πολλαπλής Πρόσβασης με Διάρθρωση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiple Access – WDMA) σε περιβάλλοντα edge δικτύων. Η έρευνα εστιάζει στην αποδοτική αξιοποίηση του οπτικού φάσματος και στη δυναμική διαχείριση των διαθέσιμων καναλιών, υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης κίνησης και περιορισμένων πόρων. Μέσω προσομοίωσης σε γλώσσα C, αξιολογείται η συμπεριφορά του συστήματος υπό διαφορετικά μοντέλα κίνησης και παραμέτρους λειτουργίας, με στόχο την αποδοτική εξυπηρέτηση πολλαπλών σταθμών και την αποφυγή συγκρούσεων κατά την πρόσβαση σε κοινά WDMA κανάλια.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής παρουσιάζονται και αναλύονται με βάση τις γραφικές παραστάσεις των μέτρων αποδοτικότητας: προσφερόμενο φορτίο, ρυθμαπόδοση, καθυστέρηση, ρυθμός απωλειών.

Efficient Software - Defined Optical Network Architectures and WDMA Strategies at the Edge

Vaia Apostolidou

Abstract

This study focuses on Software-Defined Optical Networks (SDON), with particular emphasis on the integration of Wavelength Division Multiple Access (WDMA) techniques in edge network environments. The research aims at the efficient utilization of the optical spectrum and the dynamic management of available channels under conditions of varying traffic loads and limited resources. Through C-language simulations, the system's behavior is evaluated under different traffic models and operational parameters, with the objective of efficiently serving multiple stations and avoiding collisions during access to shared WDMA channels.

The simulation results are presented and analyzed based on graphical representations of performance metrics, including offered load, throughput, delay, and loss rate.

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvi</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>xvii</i>
<i>Κατάλογος εικόνων.....</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxiii</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στα Οπτικά Δίκτυα και το Λογισμικό Καθορισμένων Δικτύων (SDN)	1
1.1 Εισαγωγή στα Οπτικά Δίκτυα	2
1.2 Εισαγωγή στο Λογισμικό Καθορισμένων Δικτύων (SDN).....	4
1.3 SDN και Οπτικά Δίκτυα (SDON)	5
Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Τεχνολογίες	7
2.1 Οπτικά Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό (SDON).....	7
2.1.1 Αρχιτεκτονική των SDON	7
2.1.2 Πλεονεκτήματα των SDON	9
2.1.3 Πρωτόκολλα και Τεχνολογίες SDON.....	10
2.1.4 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις στα SDON	12
2.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) στα Οπτικά Δίκτυα	13
2.2.1 Βασικές Αρχές και Λειτουργία του WDM	13
2.2.2 Τύποι WDM και Εφαρμογές	13
2.2.3 Δυναμική Διαχείριση του Οπτικού Φάσματος και SDN	14
2.2.4 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις	15
2.3 Αρχιτεκτονικές Δικτύων Edge	15
2.3.1 Τι είναι το Edge Networking;	16
2.3.2 Βασικές Αρχιτεκτονικές του Edge Networking	16
2.3.3 Edge Networking και SDN	16
2.3.4 Εφαρμογές των Οπτικών Δικτύων σε Edge Architectures	17

2.3.5 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις στα Edge Networks	18
Κεφάλαιο 3 Τεχνολογία WDM.....	19
3.1 Γενικά & η ιστορία του WDMA	19
3.2 Βασική αρχή λειτουργίας WDMA	20
3.3 Οπτικά Δίκτυα δεύτερης γενιάς με Τεχνολογία WDMA.....	22
3.3.1 WDM Δίκτυα Σημείου προς Σημείο (Point to Point Link)	22
3.3.2 WDM Δίκτυα Εκπομπής και Επιλογής (Broadcast & Select).....	23
3.3.3 WDM Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος (Wavelength Routed)	23
3.3.4 Δίκτυα Δρομολόγησης Ζώνης Μικρών Κύματος (Waveband Routed)	23
3.3.5 WDM Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks)	23
Κεφάλαιο 4 Περιγραφή και προσομοίωση Δικτύου	25
4.1 Σκοπός και Στόχοι της Μελέτης	25
4.2 Αρχιτεκτονική του Προτεινόμενου Συστήματος	27
4.2.1 Βασικές Δικτυακές Παράμετροι.....	28
4.2.2 Κριτήρια Αξιολόγησης.....	29
4.2.3 Αποφυγή Συγκρούσεων (Collision Avoidance)	30
4.3 Υλοποίηση της Προσομοίωσης	31
4.3.1 Δομή Προγράμματος	31
4.3.2 Μονάδες Κώδικα	32
Κεφάλαιο 5 Πειράματα και Αποτελέσματα.....	39
5.1 Περιγραφή Πειραμάτων και Προσομοιώσεων.....	39
5.2 Απόδοση Συστήματος και Αποτελέσματα	40
5.2.1 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Buffer Size	41
5.2.2 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Καναλιών	46
5.2.3 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Servers	49
5.2.4 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Πιθανότητας Εκπομπής	54
5.3 Πορίσματα.....	58
Βιβλιογραφία	60

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 - Σύστημα Διασύνδεσης Διακομιστών μέσω Οπτικού Ζεύκτη σε Ενδοραχιαίο Δίκτυο	25
Εικόνα 2 - Συνάρτηση Main.....	32
Εικόνα 3 - Συνάρτηση Simulate	33
Εικόνα 4 - Συνάρτηση Load Packets	34
Εικόνα 5 - Συνάρτηση Determine Intentions	35
Εικόνα 6 - Συνάρτηση Select Senders.....	36
Εικόνα 7 - Συνάρτηση Enqueue	37
Εικόνα 8 - Συνάρτηση Dequeue	37
Εικόνα 9 - Συνάρτηση Init Queue	38
Εικόνα 10 - Load vs Throughput για $S=20$, $W=4$, $B=15$, 20, 25, $P=100\%$	41
Εικόνα 11 - Load vs Dropped Rate για $S=20$, $W=4$, $B=15$, 20, 25, $P=100\%$	42
Εικόνα 12 - Load vs Total Delay για $S=20$, $W=4$, $B=15$, 20, 25, $P=100\%$	44
Εικόνα 13 - Load vs Queuing Delay για $S=20$, $W=4$, $B=15$, 20, 25, $P=100\%$	45
Εικόνα 14 - Load vs Throughput για $S=20$, $W=4$, 6, 8, $B=15$, $P=100\%$	46
Εικόνα 15 - Load vs Dropped Rate για $S=20$, $W=4$, 6, 8, $B=15$, $P=100\%$	47
Εικόνα 16 - Load vs Total Delay για $S=20$, $W=4$, 6, 8, $B=15$, $P=100\%$	48
Εικόνα 17 - Load vs Queuing Delay για $S=20$, $W=4$, 6, 8, $B=15$, $P=100\%$	49
Εικόνα 18 - Load vs Throughput για $S=16$, 20, 24, $W=6$, $B=15$, $P=100\%$	50
Εικόνα 19 - Load vs Dropped Rate για $S=16$, 20, 24, $W=6$, $B=15$, $P=100\%$	51
Εικόνα 20 - Load vs Total Delay για $S=16$, 20, 24, $W=6$, $B=15$, $P=100\%$	52
Εικόνα 21 - Load vs Queuing Delay για $S=16$, 20, 24, $W=6$, $B=15$, $P=100\%$	53
Εικόνα 22 - Load vs Throughput για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50%, 100%.....	54
Εικόνα 23 - Load vs Dropped Rate για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50%, 100%.....	55
Εικόνα 24 - Load vs Total Delay για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50%, 100%.....	56
Εικόνα 25 - Load vs Queuing Delay για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50%, 100%	57

Κατάλογος πινάκων

Ρυθμίσεις Πειραματικών Παραμέτρων 5.1.....	39
--	----

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στα Οπτικά Δίκτυα και το Λογισμικό Καθορισμένων Δικτύων (SDN)

Τα οπτικά δίκτυα αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών, καθώς επιτρέπουν τη μεταφορά τεράστιων όγκων δεδομένων με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Η τεχνολογία των οπτικών ινών αξιοποιεί παλμούς φωτός για τη μεταφορά πληροφορίας, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά χάλκινα μέσα, όπως μεγαλύτερη χωρητικότητα, μικρότερες απώλειες και αυξημένη ασφάλεια. [1]

Μία από τις βασικότερες τεχνολογίες που έχουν ενισχύσει τη δυνατότητα των οπτικών δικτύων να καλύπτουν συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες είναι η Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Με το WDM, πολλά ανεξάρτητα σήματα μεταφέρονται ταυτόχρονα στην ίδια οπτική ίνα, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος, γεγονός που αυξάνει εκθετικά τη χωρητικότητα του δικτύου χωρίς ανάγκη πρόσθετων φυσικών υποδομών [2].

Ωστόσο, τα παραδοσιακά οπτικά δίκτυα σχεδιάστηκαν με βάση στατικές αρχιτεκτονικές, όπου η διαχείριση της κίνησης και η κατανομή πόρων ήταν χειροκίνητη, κατανεμημένη και συχνά μη ευέλικτη. Αυτό τα καθιστά ανεπαρκή όταν καλούνται να εξυπηρετήσουν δυναμικές εφαρμογές, όπως real-time video, IoT ή υπηρεσίες cloud, οι οποίες απαιτούν γρήγορη προσαρμογή των ροών, επανεκχώρηση πόρων και χαμηλή καθυστέρηση [3].

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών, εισάγεται το Λογισμικό Καθορισμένων Δικτύων (Software-Defined Networking – SDN), μια καινοτόμος αρχιτεκτονική που διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου (control plane) από το επίπεδο δεδομένων (data plane). Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει την κεντρική και προγραμματιζόμενη διαχείριση του δικτύου μέσω ενός SDN controller, που έχει πλήρη εικόνα της τοπολογίας και μπορεί να παίρνει βελτιστοποιημένες αποφάσεις για τη δρομολόγηση και τη χρήση των πόρων [4].

Η ενοποίηση του SDN με τα οπτικά δίκτυα οδηγεί σε αυτό που ονομάζεται Software-Defined Optical Networks (SDON). Τα SDON επιτρέπουν τη δυναμική εκχώρηση μήκους κύματος, την προσαρμοστική χρήση φάσματος (flex-grid), καθώς και την αντιμετώπιση σφαλμάτων ή αποτυχιών σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι δυνατότητες καθιστούν τα SDON ιδανικά για εφαρμογές σε περιβάλλοντα υψηλής μεταβλητότητας, όπως η περιφέρεια του δικτύου (edge), όπου η διαχείριση πρέπει να είναι ταχεία, έξυπνη και αυτοματοποιημένη [5].

Ειδικά στο πλαίσιο των edge υποδομών, όπου οι απαιτήσεις για καθυστέρηση είναι πολύ αυστηρές, η δυνατότητα προσαρμογής του δικτύου σε πραγματικό χρόνο αποκτά καθοριστική σημασία. Η μελέτη και κατανόηση διαφορετικών μοντέλων κυκλοφορίας (traffic models), σε συνδυασμό με αποτελεσματικές στρατηγικές πολυπλεξίας και διαχείρισης φάσματος, είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Μέσω τέτοιων προσεγγίσεων, είναι δυνατό να επιτευχθεί υψηλότερη αξιοποίηση των πόρων, καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και ευκολότερη επεκτασιμότητα σε δικτυακές υποδομές επόμενης γενιάς [6].

1.1 Εισαγωγή στα Οπτικά Δίκτυα

Η συνεχής και ταχύρρυθμη αύξηση της ζήτησης για μετάδοση δεδομένων υψηλού όγκου, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας έχει καταστήσει τα **οπτικά δίκτυα** θεμέλιο των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών [1]. Η τεχνολογία των οπτικών ινών επιτρέπει τη μεταφορά πληροφορίας μέσω παλμών φωτός, προσφέροντας μοναδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους μετάδοσης μέσω χάλκινων αγωγών. Τα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα κορμού (backbone), διασύνδεση κέντρων δεδομένων, υποθαλάσσια καλώδια και ολοένα και περισσότερο σε δίκτυα πρόσβασης (access networks), ανταποκρινόμενα στις ανάγκες εφαρμογών όπως το cloud computing, το Internet of Things (IoT), τα δίκτυα 5G και οι real-time πολυμεσικές υπηρεσίες [2]. Η τεχνολογία Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) έχει συμβάλει καθοριστικά στην επεκτασιμότητα των οπτικών δικτύων. Μέσω της DWDM, πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα μέσω της ίδιας οπτικής ίνας, σε διαφορετικά μήκη κύματος, επιτυγχάνοντας τεράστια αύξηση χωρητικότητας χωρίς φυσική

αναβάθμιση υποδομής [6]. Τα κύρια πλεονεκτήματα των οπτικών δικτύων περιλαμβάνουν:

- Υψηλή Χωρητικότητα: Τα οπτικά δίκτυα προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης που ξεπερνούν τα 100 Gbps ανά κανάλι, με συνολική χωρητικότητα ανά ίνα που μπορεί να φτάσει ή και να υπερβεί το 1 Tbps [7].
- Χαμηλή Καθυστέρηση: Η ταχύτητα διάδοσης φωτός στις οπτικές ίνες προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός στο κενό, μειώνοντας σημαντικά τη λανθάνουσα καθυστέρηση, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου [8].
- Μικρές Απώλειες Σήματος: Οι απώλειες εξασθένισης σε μία τυπική ίνα είναι της τάξης των 0,2 dB/km, γεγονός που επιτρέπει μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστη ανάγκη για ενίσχυση [2] [9].
- Ασφάλεια: Η υποκλοπή σημάτων από οπτικές ίνες είναι ιδιαίτερα δύσκολη χωρίς να εντοπιστεί, προσφέροντας αυξημένο επίπεδο ασφάλειας για κρίσιμες επικοινωνίες [10].

Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα αυτά συνοδεύονται από σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση πόρων του δικτύου, την εκχώρηση καναλιών (μήκη κύματος) και τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές βασίζονται σε στατικό σχεδιασμό, γεγονός που τις καθιστά δυσκίνητες στην αντιμετώπιση δυναμικά μεταβαλλόμενων συνθηκών ή αιφνίδιων αιχμών κυκλοφορίας [3].

Η δυναμική κατανομή πόρων, η ελαστικότητα στη χρήση φάσματος και η ανάγκη για αυτόματη επαναδρομολόγηση σε περιπτώσεις συμφόρησης ή αστοχίας είναι παράγοντες που οδηγούν την έρευνα προς πιο ευέλικτες και έξυπνες δικτυακές αρχιτεκτονικές. Ειδικότερα, η αποδοτική διαχείριση των μηκών κύματος (λ) στο WDM και η διατήρηση ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε περιβάλλοντα αυξημένης μεταβλητότητας καθίστανται κρίσιμες απαιτήσεις για τα δίκτυα επόμενης γενιάς [6] [8].

Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών, όπως η πολυπλεξία flex-grid, η προβλεπτική διαχείριση κυκλοφορίας και η συνεργασία με λογισμικά καθορισμένους ελεγκτές (SDN), εξελίσσεται σε αναγκαίο βήμα προς τη δημιουργία αυτόνομων, αποδοτικών και προσαρμοστικών οπτικών υποδομών.

1.2 Εισαγωγή στο Λογισμικό Καθορισμένων Δικτύων (SDN)

Το Λογισμικό Καθορισμένων Δικτύων (Software-Defined Networking – SDN) αποτελεί μία από τις πλέον καθοριστικές τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των δικτύων τα τελευταία χρόνια. Εισάγει ένα νέο μοντέλο αρχιτεκτονικής και διαχείρισης, το οποίο στοχεύει στην απλοποίηση, ευελιξία και αυτοματοποίηση των λειτουργιών δικτύου, υπερβαίνοντας τους περιορισμούς των παραδοσιακών, στατικά διαμορφωμένων υποδομών [4].

Η βασική αρχή του SDN έγκειται στον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου (control plane) από το επίπεδο δεδομένων (data plane). Αντί ο κάθε μεταγωγέας ή δρομολογητής να λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις προώθησης πακέτων, όλες οι αποφάσεις μεταφέρονται σε έναν κεντρικό SDN ελεγκτή (controller), ο οποίος έχει πλήρη γνώση της τοπολογίας και της κατάστασης του δικτύου [5]. Αυτή η κεντριοποιημένη νοημοσύνη επιτρέπει την υλοποίηση προγραμματιζόμενων πολιτικών, τη δυναμική δρομολόγηση ροών και τη βελτιστοποίηση πόρων σε πραγματικό χρόνο.

Η επικοινωνία μεταξύ του SDN ελεγκτή και των μεταγωγικών συσκευών γίνεται μέσω ανοιχτών διεπαφών και πρωτοκόλλων, με κυριότερο το OpenFlow, το οποίο επιτρέπει την εγκατάσταση κανόνων προώθησης απευθείας σε switches και routers [11]. Μέσω του OpenFlow, ο ελεγκτής μπορεί να διαχειρίζεται τις ροές, να αναπροσαρμόζει διαδρομές, να ελέγχει την κυκλοφορία και να ενεργοποιεί μηχανισμούς ανάκτησης από βλάβες, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής SDN είναι πολλαπλά και αφορούν τόσο την τεχνική ευελιξία όσο και τη λειτουργική αποδοτικότητα:

- Δυναμική διαχείριση πόρων: Ο ελεγκτής μπορεί να προσαρμόζει την κυκλοφορία ανάλογα με το προφίλ των εφαρμογών και τις απαιτήσεις QoS [12].
- Αναδιάταξη σε πραγματικό χρόνο: Το δίκτυο ανταποκρίνεται άμεσα σε μεταβολές φόρτου, αποτυχίες ή αλλαγές πολιτικής.
- Ενισχυμένη ασφάλεια: Η κεντρική διαχείριση προσφέρει ενιαίο έλεγχο πρόσβασης, εντοπισμό ανωμαλιών και ταχύτερη αντίδραση σε απειλές.
- Εφαρμογή πολιτικών ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και διαφοροποιημένη εξυπηρέτηση εφαρμογών ή χρηστών.

- Μειωμένο κόστος λειτουργίας και εξοπλισμού, λόγω της αυτοματοποίησης και της ανεξαρτητοποίησης από κατασκευαστές (vendor-agnostic) [13].

Η χρήση SDN έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς: κέντρα δεδομένων (data centers), δίκτυα ISP, βιομηχανικά δίκτυα, και ολοένα περισσότερο σε οπτικά δίκτυα (SDON), όπου η ανάγκη για διαχείριση φάσματος και χαμηλή καθυστέρηση είναι κρίσιμη [8].

Επιπλέον, η αρχιτεκτονική SDN διευκολύνει την ενσωμάτωση με τεχνολογίες όπως το NFV (Network Function Virtualization) και την υλοποίηση επιχειρησιακής λογικής μέσω APIs, δημιουργώντας ευέλικτα και προσαρμοζόμενα δίκτυα.

Καθώς η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις των εφαρμογών αυξάνονται, η προσέγγιση του SDN καθίσταται αναπόσπαστο μέρος της σχεδίασης σύγχρονων και μελλοντικών υποδομών δικτύου.

1.3 SDN και Οπτικά Δίκτυα (SDON)

Η ενσωμάτωση της αρχιτεκτονικής **Software-Defined Networking (SDN)** στα **οπτικά δίκτυα** έχει οδηγήσει στη δημιουργία των λεγόμενων **Software-Defined Optical Networks (SDON)**, τα οποία συνδυάζουν την υψηλή χωρητικότητα και αποδοτικότητα της τεχνολογίας οπτικών ινών με την ευελιξία και τον κεντρικό έλεγχο που παρέχει το SDN [11] [14].

Τα παραδοσιακά οπτικά δίκτυα που βασίζονται στην πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (**Wavelength Division Multiplexing – WDM**) προσφέρουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα, αλλά χαρακτηρίζονται από στατική ή περιορισμένη δυναμική διαχείριση των πόρων τους. Αυτό τα καθιστά αναποτελεσματικά όταν αντιμετωπίζουν ραγδαία μεταβαλλόμενες απαιτήσεις σε ζήτηση, όπως συμβαίνει σε περιβάλλοντα edge ή σε data centers [6].

Η αρχιτεκτονική SDON επιτρέπει την **προγραμματιζόμενη και κεντρικά ελεγχόμενη διαχείριση του οπτικού φάσματος**, καθιστώντας δυνατή την άμεση ανταπόκριση του δικτύου σε μεταβολές κίνησης, αποτυχίες συνδέσεων ή αλλαγές πολιτικής. Μέσω κατάλληλων διεπαφών (π.χ. OpenFlow extensions, ONOS, PCEP), ο **SDN**

controller διαχειρίζεται με ευφυή τρόπο τη δρομολόγηση, την εκχώρηση μήκους κύματος και τη χρήση καναλιών σε πραγματικό χρόνο [15].

Το SDON επιτρέπει:

- Δυναμική κατανομή εύρους ζώνης: Ο ελεγκτής SDN μπορεί να εκχωρεί και να ανακτά φάσμα ανάλογα με τη ζήτηση και τις προτεραιότητες των εφαρμογών, βελτιστοποιώντας τη χρήση των διαθέσιμων πόρων [16].
- Αυτοματοποίηση διαχείρισης μήκους κύματος: Μέσω αλγορίθμων RSA (Routing and Spectrum Assignment), το SDON μπορεί να ελαχιστοποιεί το fragmentation και να μειώνει την πιθανότητα αποκλεισμού ζεύξεων (blocking) [17].
- Αυξημένη ανθεκτικότητα: Σε περίπτωση αστοχίας ή συμφόρησης, το SDON μπορεί να αναδρομολογήσει αυτόματα την κίνηση (reconfiguration), διατηρώντας τη συνέχεια της υπηρεσίας χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση [18].
- Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης: Μέσω έξυπνης διαχείρισης και δυναμικής απενεργοποίησης μη ενεργών πόρων, το SDON μπορεί να μειώσει τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου [8].
- Ευκολότερη ενσωμάτωση με τεχνολογίες cloud, 5G και IoT: Οι SDON υποδομές θεωρούνται πλέον βασική αρχιτεκτονική για την υποστήριξη δικτύων επόμενης γενιάς, καθώς μπορούν να προσφέρουν SLA με βάση εφαρμογές και να κλιμακώνονται οριζόντια και κάθετα [19].

Ειδικά σε περιβάλλοντα edge computing, όπου οι απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση, δυναμική δρομολόγηση και τοπική ευφυΐα είναι έντονες, τα SDON προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των στατικών οπτικών δικτύων. Η ικανότητα του SDN να παρακολουθεί, να αποφασίζει και να αναδιαμορφώνει τη ροή κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο καθιστά το SDON κατάλληλο για περιβάλλοντα υψηλής πολυπλοκότητας και μεταβλητότητας.

Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Τεχνολογίες

2.1 Οπτικά Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό (SDON)

Τα **Οπτικά Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό (Software-Defined Optical Networks – SDON)** αποτελούν μια προηγμένη αρχιτεκτονική που ενσωματώνει τις αρχές του **Software-Defined Networking (SDN)** στα οπτικά δίκτυα. Ο βασικός στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η **προγραμματιζόμενη, ευέλικτη και κεντρικά ελεγχόμενη διαχείριση** των πόρων του οπτικού επιπέδου, με σκοπό την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση του φάσματος και την υποστήριξη εφαρμογών υψηλής απαιτητικότητας [11].

Η ανάγκη για SDON προκύπτει από τους περιορισμούς των παραδοσιακών WDM δικτύων, τα οποία συνήθως απαιτούν **στατική ή ημι-στατική διαμόρφωση** και αδυνατούν να προσαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο σε αλλαγές κυκλοφορίας ή αιχμές ζήτησης. Αντίθετα, το SDON επιτρέπει **δυναμική δρομολόγηση, εκχώρηση φάσματος κατά ζήτηση, και γρήγορη αποκατάσταση μετά από αστοχίες**, καθιστώντας τα δίκτυα πιο προσαρμοστικά και ανθεκτικά [20].

2.1.1 Αρχιτεκτονική των SDON

Η αρχιτεκτονική των **Software-Defined Optical Networks (SDON)** βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή του **λογισμικού καθορισμένου ελέγχου**, όπως αυτή εφαρμόζεται στο γενικό πλαίσιο των Software-Defined Networks (SDN), αλλά επεκτείνεται ώστε να καλύπτει τις ιδιαιτερότητες των **οπτικών επιπέδων μετάδοσης**. Ο στόχος είναι η παροχή ενός **ευέλικτου, κεντρικά διαχειριζόμενου και προγραμματιζόμενου πλαισίου**, το οποίο επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης φάσματος, της δρομολόγησης και της αποδοτικότητας του οπτικού δικτύου.

Επίπεδα Αρχιτεκτονικής SDON

Η SDON αρχιτεκτονική είναι δομημένη σε τρία βασικά επίπεδα:

- **Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer):** Περιλαμβάνει τις εφαρμογές δικτυακής διαχείρισης, όπως δρομολόγηση με ποιότητα υπηρεσίας (QoS), πολιτικές ασφάλειας, διαχείριση κυκλοφορίας (traffic engineering), και SLA monitoring. Οι εφαρμογές αυτές επικοινωνούν με τον SDN controller μέσω **northbound διεπαφών**.
- **Επίπεδο Ελέγχου (Control Layer):** Ο **SDN controller** λειτουργεί ως ενδιάμεσος μεταξύ εφαρμογών και φυσικού επιπέδου. Διαθέτει πλήρη εικόνα του δικτύου, αναλύει τις ανάγκες των εφαρμογών και λαμβάνει αποφάσεις για τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων.
- **Επίπεδο Υποδομής (Infrastructure Layer):** Περιλαμβάνει τον φυσικό εξοπλισμό του οπτικού δικτύου, όπως **οπτικούς μεταγωγείς (optical switches), ROADM, transponders, WDM κανάλια**, και συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων. Η επικοινωνία με τον controller γίνεται μέσω **southbound διεπαφών**, όπως το OpenFlow, το NETCONF ή το RESTCONF.

Ο Ρόλος του SDN Controller

Ο SDN controller είναι ο πυρήνας του SDON. Ο ελεγκτής λαμβάνει πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου, όπως **διαθέσιμο φάσμα, φορτίο κυκλοφορίας, ενεργές συνδέσεις και απαιτήσεις QoS**, και λαμβάνει αποφάσεις με βάση αλγόριθμους δρομολόγησης και κατανομής φάσματος (**RSA – Routing and Spectrum Assignment**) [11].

Διεπαφές και Πρωτόκολλα

- **Northbound APIs:** Παρέχουν πρόσβαση στις εφαρμογές για την παρακολούθηση, προγραμματισμό και αυτοματοποίηση πολιτικών. Συνήθως βασίζονται σε RESTful APIs.
- **Southbound APIs:** Επιτρέπουν την επικοινωνία με τον εξοπλισμό. Το OpenFlow χρησιμοποιείται ευρέως, με επεκτάσεις για οπτική δρομολόγηση (π.χ. wavelength-specific rules) [14].

Ενσωμάτωση Πολυτεχνολογικών Επιπέδων

Η αρχιτεκτονική SDON υποστηρίζει την **ενοποίηση packet και optical layers**, επιτρέποντας τη διαχείριση ολόκληρης της δικτυακής στοίβας από κοινού. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις **multi-layer or multi-domain orchestration**, π.χ. σε inter-DC συνδέσεις ή σε οπτικά δίκτυα παρόχων υπηρεσιών.

Η SDON αρχιτεκτονική επιτρέπει την **προσαρμογή σε νέες τεχνολογίες**, όπως το flex-grid (μεταβλητό φάσμα), τα sliceable transponders, και η υποστήριξη πολυκαναλικών υπηρεσιών (multi-flow service delivery). Επιπλέον, η modular δομή των SDN controllers διευκολύνει την **κλιμάκωση του συστήματος**, επιτρέποντας την παράλληλη διαχείριση πολλών domains ή υπηρεσιών [18].

2.1.2 Πλεονεκτήματα των SDON

Η αρχιτεκτονική των **Software-Defined Optical Networks (SDON)** προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές στατικές υποδομές οπτικών δικτύων. Συνδυάζοντας τη **δυναμική διαχείριση** και την **προγραμματιζόμενη λειτουργία** των SDN με τη **μεγάλη χωρητικότητα και αξιοπιστία** των WDM οπτικών δικτύων, τα SDON επιτρέπουν την ευέλικτη και αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ζήτησης και κυκλοφορίας.

- **Δυναμική διαχείριση του οπτικού φάσματος:** Τα SDON επιτρέπουν την αποδοτικότερη κατανομή των οπτικών πόρων, καθώς ο SDN controller μπορεί να εκχωρεί μήκη κύματος, διαδρομές και φάσμα **σε πραγματικό χρόνο**, με βάση τις εκάστοτε ανάγκες του δικτύου [21]. Αυτό μειώνει τη στατική υπερδέσμευση πόρων και αυξάνει την **εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος**.
- **Γρήγορη Ανάκαμψη από Αστοχίες και Συμφόρηση:** Χάρη στην κεντρική ορατότητα του SDN controller στο συνολικό δίκτυο, το SDON μπορεί να εντοπίσει αστοχίες ή σημεία συμφόρησης και να αναδρομολογήσει αυτόματα την κυκλοφορία (fast rerouting) χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης ή στατικής διαμόρφωσης [18].
- **Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και SLA:** Τα SDON μπορούν να εφαρμόζουν διαφορετικά επίπεδα QoS ανάλογα με την εφαρμογή ή την υπηρεσία, μέσω της δημιουργίας εικονικών οπτικών διαδρομών (virtual optical paths). Έτσι, είναι δυνατή η παροχή εγγυημένου εύρους, χαμηλής καθυστέρησης και αξιοπιστίας για εφαρμογές όπως video streaming, 5G backhaul ή inter-DC επικοινωνία [20].
- **Καλύτερη Ενεργειακή Απόδοση:** Η δυναμική διαχείριση φάσματος και διαύλων επιτρέπει την **απενεργοποίηση αδρανών πόρων**, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Σε περιβάλλοντα όπου η κυκλοφορία παρουσιάζει χρονική

μεταβλητότητα (π.χ. edge, metro δίκτυα), τα SDON προσφέρουν σημαντική ενεργειακή εξοικονόμηση σε σύγκριση με στατικές υλοποιήσεις [22].

- Υποστήριξη Πολυτεχνολογικών και Πολυτομεακών Δικτύων: Τα SDON είναι σχεδιασμένα να συνεργάζονται με άλλες τεχνολογίες, όπως MPLS, IP και Ethernet, επιτρέποντας ενοποιημένη διαχείριση διαφόρων επιπέδων δικτύου (packet-optical integration). Επίσης, προσφέρουν δυνατότητες multi-domain orchestration, ενισχύοντας την διαλειτουργικότητα μεταξύ παρόχων ή περιοχών [23].
- Ευελιξία στην Υλοποίηση Υπηρεσιών και Δικτυακή Καινοτομία: Χρησιμοποιώντας **ανοιχτά APIs και προγραμματιστικά interfaces**, τα SDON επιτρέπουν την ταχεία ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, πειραματικών εφαρμογών ή αυτοματοποιημένων πολιτικών, χωρίς την ανάγκη τροποποίησης του φυσικού εξοπλισμού.

Συνολικά, τα πλεονεκτήματα των SDON επιβεβαιώνουν τη στρατηγική σημασία τους για τη μετάβαση σε **δικτυακές υποδομές επόμενης γενιάς**, όπου η επεκτασιμότητα, η αυτονομία και η προσαρμοστικότητα αποτελούν κεντρικούς στόχους σχεδιασμού.

2.1.3 Πρωτόκολλα και Τεχνολογίες SDON

Η υλοποίηση και λειτουργία των Software-Defined Optical Networks (SDON) βασίζεται σε ένα σύνολο από εξειδικευμένα πρωτόκολλα και τεχνολογικές πλατφόρμες που επιτρέπουν την επικοινωνία, τον έλεγχο και την προγραμματιζόμενη διαχείριση του οπτικού δικτύου. Οι τεχνολογίες αυτές καλύπτουν τόσο το επίπεδο υποδομής (π.χ. optical switching, flex-grid), όσο και τα control planes (π.χ. OpenFlow, NETCONF), επιτρέποντας την υλοποίηση ενοποιημένων, ευέλικτων και αυτοματοποιημένων δικτυακών λειτουργιών.

OpenFlow και οι Επεκτάσεις του για Οπτικά Δίκτυα

Το OpenFlow αποτελεί το βασικό πρωτόκολλο southbound επικοινωνίας στο SDN, επιτρέποντας στον SDN controller να εγκαθιστά κανόνες δρομολόγησης σε switches και routers. Ωστόσο, για να υποστηριχθούν οι ανάγκες των SDON, έχουν προταθεί επεκτάσεις του OpenFlow για:

- ο Εκχώρηση μήκους κύματος (λ) σε optical flows
- ο Εντολές για ROADMs, OXC και transponders
- ο Υποστήριξη cross-layer συντονισμού, π.χ. IP-over-WDM mapping [24]

Οι επεκτάσεις αυτές επιτρέπουν τη διαχείριση optical λογικών κυκλωμάτων μέσω OpenFlow μηνυμάτων και flow tables.

NETCONF/YANG και RESTCONF

Το NETCONF/YANG αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση για διαχείριση παραμετροποίησης εξοπλισμού, κυρίως για optical transponders, amplifiers και switches. Με τη χρήση YANG μοντέλων, ο controller μπορεί να τροποποιεί ή να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους όπως bitrate, modulation format, wavelength, και optical power levels [23]. Επιπλέον, RESTCONF χρησιμοποιείται συχνά για απλοποιημένη, HTTP-based πρόσβαση σε συσκευές, ιδανική για cloud-native αρχιτεκτονικές.

Flex-Grid και Elastic Optical Networking

- Το NETCONF είναι ένα πρωτόκολλο διαχείρισης που επιτρέπει την απομακρυσμένη ρύθμιση και διαχείριση των δικτυακών συσκευών, ενώ το YANG χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των διαμορφώσεων του δικτύου [16].
- Path Computation Element (PCE): Ένα στοιχείο του SDN που αναλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης και τη διαχείριση των οπτικών πόρων.

Οπτικές Πλατφόρμες και Orchestration Tools

Στην πράξη, πολλές πλατφόρμες υποστηρίζουν την SDON αρχιτεκτονική, όπως:
ONOS (Open Network Operating System): Υποστηρίζει optical intent-based networking
OpenDaylight (ODL): Επεκτάσιμο controller με Optical Transport plugins
Transport SDN από ITU-T και ONF: Προδιαγραφές για SDN-based control στα transport επίπεδα

Η SDON αρχιτεκτονική απαιτεί συντονισμό μεταξύ πολλών τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων GMPLS, OTN και IP/MPLS. Ο στόχος είναι η ενοποιημένη διαχείριση σε multi-layer και multi-domain περιβάλλοντα [25].

- Optical Performance Monitoring (OPM): Ενσωματώνεται στα SDON για real-time έλεγχο ποιότητας σημάτων
- Machine Learning αλγόριθμοι: Χρησιμοποιούνται για πρόβλεψη ζήτησης φάσματος και αυτόματη βελτιστοποίηση πόρων
- Network Function Virtualization (NFV): Συμπληρώνει το SDON για παροχή δυναμικών virtual optical services [26].

2.1.4 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις στα SDON

Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ενοποίηση του Λογισμικού Καθορισμένων Δικτύων (SDN) με τις τεχνολογίες των οπτικών δικτύων, η υλοποίηση των Software-Defined Optical Networks (SDON) συνοδεύεται από πληθώρα προκλήσεων, τεχνικών, οργανωτικών και επιχειρησιακών. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι κρίσιμη για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των SDON σε περιβάλλοντα επόμενης γενιάς.

Κύριες Προκλήσεις

1. Ετερογένεια Υποδομής

Τα οπτικά δίκτυα περιλαμβάνουν πλήθος από διαφορετικές τεχνολογίες (ROADM, OXC, WDM transceivers), προερχόμενες συχνά από διαφορετικούς κατασκευαστές. Η απουσία καθολικών προτύπων δημιουργεί δυσκολίες στην ενοποίηση και τον έλεγχο μέσω SDN controllers [27].

2. Κλιμάκωση και Απόδοση Ελεγκτή (Controller Scalability)

Η κεντρική αρχιτεκτονική των SDN απαιτεί υψηλές επιδόσεις και ανθεκτικότητα από τον ελεγκτή. Σε μεγάλης κλίμακας οπτικά δίκτυα, η επεξεργασία routing πληροφοριών, spectrum assignment και optical impairments δημιουργεί σημαντικό φόρτο [28].

3. Χρονικά Κρίσιμες Αποφάσεις

Η καθυστέρηση που προκαλείται από την αποστολή εντολών από τον ελεγκτή προς τα optical στοιχεία μπορεί να είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου, ειδικά σε περιπτώσεις αποτυχίας ή αλλαγής τοπολογίας [29].

4. Ασφάλεια και Εμπιστευτικότητα

Η κεντρική διαχείριση καθιστά τα SDON πιο ευάλωτα σε επιθέσεις όπως controller hijacking, malicious applications ή spoofed signaling. Απαιτούνται εξελιγμένοι μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης και ασφάλειας δεδομένων [30].

5. Ακριβής Μοντελοποίηση Οπτικών Καναλιών

Η απόδοση των optical links εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες (απώλειες, παραμορφώσεις, cross-talk), που δεν είναι πάντα εύκολο να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν δυναμικά μέσω λογισμικού.

2.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) στα Οπτικά Δίκτυα

Η Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) αποτελεί μία από τις βασικότερες τεχνολογίες των σύγχρονων οπτικών δικτύων, επιτρέποντας την παράλληλη μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε διαφορετικά μήκη κύματος μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας. Η αυξημένη ανάγκη για μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έχει καταστήσει το WDM αναγκαίο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της χωρητικότητας των τηλεπικοινωνιακών υποδομών [2]

2.2.1 Βασικές Αρχές και Λειτουργία του WDM

Η τεχνολογία WDM βασίζεται στην ταυτόχρονη μετάδοση πολλών ροών δεδομένων, καθεμία με μοναδικό μήκος κύματος, πάνω στην ίδια οπτική ίνα. Αυτή η τεχνική απαιτεί δύο βασικά υποσυστήματα: έναν πολυπλέκτη (multiplexer) στην πηγή και έναν αποπολυπλέκτη (demultiplexer) στον παραλήπτη. Ο πολυπλέκτης συνδυάζει τα οπτικά σήματα και τα εκπέμπει μέσω της ίνας, ενώ ο αποπολυπλέκτης τα διαχωρίζει και τα κατευθύνει στους κατάλληλους δέκτες [31].

Η αρχή αυτή επιτρέπει την παράλληλη μεταφορά ανεξάρτητων υπηρεσιών, τη βελτίωση της αποδοτικότητας του φυσικού μέσου, και τη μείωση της ανάγκης για πολλαπλές ίνες, μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.

2.2.2 Τύποι WDM και Εφαρμογές

Ανάλογα με την πυκνότητα των μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες WDM:

1. Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)

- a. Χρησιμοποιεί **8 έως 18 μήκη κύματος** σε αποστάσεις **20 nm** στο φάσμα των **1270 nm έως 1610 nm**.
- b. Προσφέρει χαμηλότερο κόστος υλοποίησης και χρησιμοποιείται κυρίως σε **μετροπολιτικά και τοπικά δίκτυα (Metro & Access Networks)** [32].

2. Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

- a. Υποστηρίζει **έως και 80 ή περισσότερα μήκη κύματος** με μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους (0.8 nm ή 0.4 nm).
- b. Προτιμάται σε **δίκτυα κορμού (Backbone Networks)** και **διασύνδεση κέντρων δεδομένων**, όπου απαιτείται μέγιστη χωρητικότητα και αξιοπιστία.

Οι εφαρμογές του WDM περιλαμβάνουν:

- **Διασύνδεση Κέντρων Δεδομένων (Data Center Interconnection - DCI)**
- **Υπερατλαντικά και Διαηπειρωτικά Οπτικά Δίκτυα**
- **Δίκτυα 5G και μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα**
- **Δίκτυα Cloud Computing και IoT** [33]

Η ικανότητα να προσφέρουν υψηλή ταχύτητα, αξιοπιστία και επεκτασιμότητα καθιστά τα WDM δίκτυα θεμέλιο της ψηφιακής εποχής.

2.2.3 Δυναμική Διαχείριση του Οπτικού Φάσματος και SDN

Η δυναμική διαχείριση του οπτικού φάσματος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την αποδοτικότητα των WDM δικτύων. Τα **παραδοσιακά WDM δίκτυα** βασίζονται σε στατική εκχώρηση μήκους κύματος, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε **αναποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης**.

Η **ενσωμάτωση του SDN (Software-Defined Networking) στα WDM δίκτυα**, γνωστή ως **Software-Defined Optical Networks (SDON)**, επιτρέπει τη **δυναμική εκχώρηση και επαναδιάθεση των μηκών κύματος** ανάλογα με τη ζήτηση. Ο **SDN Controller** μπορεί να ανιχνεύει την κίνηση του δικτύου και να προσαρμόζει σε πραγματικό χρόνο την κατανομή των οπτικών πόρων, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας την πιθανότητα συμφόρησης.

Τεχνικές διαχείρισης του φάσματος στο SDON περιλαμβάνουν:

- **Flex-Grid WDM (Εύκαμπτα Δίκτυα Πλέγματος):** Αντί για σταθερές ζώνες μήκους κύματος (π.χ., 50 GHz στο DWDM), το **Flex-Grid** επιτρέπει την προσαρμογή των καναλιών στις πραγματικές ανάγκες των εφαρμογών, εξοικονομώντας φασματικούς πόρους [28] [29].
- **Routing and Spectrum Assignment (RSA):** Αλγόριθμοι που καθορίζουν τη **βέλτιστη δρομολόγηση και εκχώρηση μήκους κύματος** για κάθε ροή δεδομένων.
- **Machine Learning για Πρόβλεψη Κυκλοφορίας:** Χρήση AI/ML αλγορίθμων για πρόβλεψη της κίνησης και βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων.

2.2.4 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις

Παρά τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας WDM, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για τη βέλτιστη χρήση της:

- **Διαχείριση Μηκών Κύματος:** Σε μεγάλης κλίμακας WDM δίκτυα, η κατανομή του οπτικού φάσματος πρέπει να γίνεται με βέλτιστο τρόπο ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα συμφόρησης ή σπατάλης πόρων.
- **Συντονισμός με SDN:** Παρόλο που η δυναμική διαχείριση φάσματος μέσω SDN είναι υποσχόμενη, η πλήρης υλοποίησή της απαιτεί συμβατότητα μεταξύ **διαφορετικών προμηθευτών εξοπλισμού και πρωτοκόλλων**.
- **Ανθεκτικότητα και Αποκατάσταση Βλαβών:** Τα δίκτυα WDM πρέπει να διαθέτουν μηχανισμούς **αυτόματης αποκατάστασης (self-healing networks)**, ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία τους σε περιπτώσεις αστοχίας συνδέσμων.
- **Ενεργειακή Απόδοση:** Η κατανάλωση ενέργειας των WDM δικτύων είναι υψηλή, κυρίως λόγω των **ενισχυτών οπτικών σημάτων (Erbium-Doped Fiber Amplifiers - EDFAs)**. Η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη **"Green Optical Networks"** που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας.

2.3 Αρχιτεκτονικές Δικτύων Edge

Η έννοια του Edge Networking αναφέρεται στη μεταφορά υπολογιστικής ισχύος και αποθήκευσης δεδομένων από τα κεντρικά σημεία του δικτύου (data centers) πλησιέστερα στις συσκευές ή στους τελικούς χρήστες. Με την εκρηκτική αύξηση των εφαρμογών που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, όπως η αυτόνομη οδήγηση, το IoT, η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα, τα παραδοσιακά μοντέλα cloud δεν επαρκούν. Το Edge Networking προσφέρει αποκεντρωμένη υπολογιστική δυνατότητα με μικρή καθυστέρηση, υψηλή διαθεσιμότητα και αυξημένη αξιοπιστία.

2.3.1 Τι είναι το Edge Networking;

Τα παραδοσιακά κεντροποιημένα δίκτυα βασίζονται σε μεγάλα Data Centers (Κέντρα Δεδομένων) και Cloud υπηρεσίες για την αποθήκευση και επεξεργασία πληροφοριών. Ωστόσο, η αύξηση των αισθητήρων IoT, των αυτόνομων οχημάτων, των έξυπνων πόλεων και των εφαρμογών χαμηλής καθυστέρησης, έχει καταστήσει αυτή την προσέγγιση μη αποδοτική.

Το Edge Networking εισάγει την επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων πιο κοντά στον χρήστη (στην άκρη του δικτύου), μειώνοντας έτσι την ανάγκη μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καθυστέρησης (latency), τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους μεταφοράς δεδομένων.

2.3.2 Βασικές Αρχιτεκτονικές του Edge Networking

Οι αρχιτεκτονικές δικτύων Edge βασίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες υποδομών:

1. Edge Devices (Συσκευές Άκρης):

- a. Αισθητήρες IoT, έξυπνες κάμερες, wearables, smartphones.
- b. Πραγματοποιούν μικρή υπολογιστική επεξεργασία και επικοινωνούν με Edge Nodes.

2. Edge Nodes (Κόμβοι Άκρης):

- a. Μικρο-κέντρα δεδομένων, routers, base stations.
- b. Διεκπεραιώνουν επεξεργασία δεδομένων, caching και ανάλυση δεδομένων πριν αυτά σταλούν στο κεντρικό δίκτυο.

3. Edge Data Centers (Κέντρα Δεδομένων Edge):

- a. Ανάγκη για λιγότερη χρήση σε Edge Architectures, καθώς μεγάλο μέρος των δεδομένων υποβάλλεται σε προ-επεξεργασία στους Edge Nodes.

Η τοπολογία ενός Edge δικτύου μπορεί να διαφέρει, ανάλογα με την εφαρμογή και την κίνηση δεδομένων. Ο **συνδυασμός Edge και SDN** επιτρέπει τη δυναμική διαχείριση των πόρων του δικτύου και την αποδοτικότερη δρομολόγηση της κίνησης.

2.3.3 Edge Networking και SDN

Η ενσωμάτωση του **Software-Defined Networking (SDN)** στο Edge Networking προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την **προσαρμογή των δικτύων σε**

πραγματικό χρόνο, την κατανομή πόρων και την αποδοτική δρομολόγηση των δεδομένων.

- **Δυναμική Διαχείριση Κυκλοφορίας:** Το SDN μπορεί να κατευθύνει την κίνηση μέσω του βέλτιστου μονοπατιού, αποφεύγοντας συμφόρηση και μειώνοντας την καθυστέρηση.
- **Κατανεμημένη Υπολογιστική Ισχύς:** Η αξιοποίηση του Edge Computing με SDN επιτρέπει στους Edge Nodes να εκτελούν επεξεργασία χωρίς να επιβαρύνουν το κεντρικό δίκτυο.
- **Ασφάλεια και Έλεγχος Πρόσβασης:** Ο SDN controller μπορεί να ελέγχει την πρόσβαση και την προστασία των δεδομένων που διακινούνται στο Edge δίκτυο.
- **Ενεργειακή Αποδοτικότητα:** Η δυναμική διαχείριση των πόρων μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, καθώς οι κόμβοι Edge ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται ανάλογα με τη ζήτηση. [34]

2.3.4 Εφαρμογές των Οπτικών Δικτύων σε Edge Architectures

Η αρχιτεκτονική Edge σε συνδυασμό με τα οπτικά δίκτυα WDM και SDON επιτρέπει αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και καλύτερη δρομολόγηση δεδομένων.

1. Δίκτυα 5G και Beyond-5G: Τα δίκτυα 5G & 6G απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή απόδοση, κάτι που καθιστά το Edge Computing αναγκαίο. Οι Edge Nodes επιτρέπουν την τοπική επεξεργασία των δεδομένων, αποφεύγοντας τη μεταφορά τους σε απομακρυσμένα data centers.
2. Αυτόνομα Οχήματα και Ευφυείς Μεταφορές: Τα αυτόνομα οχήματα βασίζονται σε real-time επεξεργασία δεδομένων από αισθητήρες και κάμερες. Τα Edge Networks εξασφαλίζουν ταχύτατη ανταπόκριση σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως η αποφυγή συγκρούσεων.
3. Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT): Τα εργοστάσια του μέλλοντος θα απαιτούν Edge υποδομές για την προληπτική συντήρηση μηχανών, την αυτοματοποίηση και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής.
4. Smart Cities και IoT Εφαρμογές: Οι έξυπνες πόλεις απαιτούν γρήγορη ανάλυση δεδομένων από κάμερες, αισθητήρες κίνησης και περιβαλλοντικές μετρήσεις. Το Edge Networking προσφέρει ταχύτερη λήψη αποφάσεων και αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος.

2.3.5 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις στα Edge Networks

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των Edge Networks, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν:

1. **Ασφάλεια και Προστασία Δεδομένων:** Η αποκεντρωμένη φύση του Edge δημιουργεί νέες απαιτήσεις για **ασφαλή διαχείριση δεδομένων** και **προστασία από κυβερνοεπιθέσεις**.
2. **Διαχείριση Πόρων και Υποδομής:** Η ετερογένεια των Edge Nodes απαιτεί **ευφυείς αλγορίθμους κατανομής φορτίου** και **συντονισμό μεταξύ Cloud, Edge και SDN**.
3. **Ενεργειακή Αποδοτικότητα:** Η συνεχής λειτουργία μεγάλου αριθμού Edge κόμβων απαιτεί **νέες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας**.
4. **Συμβατότητα μεταξύ Διαφορετικών Δικτυακών Υποδομών:** Η διασύνδεση **Edge, SDN, 5G, WDM και Cloud δικτύων** είναι μια τεχνική πρόκληση που απαιτεί **εναρμονισμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας**.
5. Υβριδικά μοντέλα Cloud-Edge-Fog για πιο ολιστική προσέγγιση.
6. Χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) και machine learning για πρόβλεψη φορτίου και δυναμική κατανομή πόρων.

Το Edge Networking θα συνεχίσει να παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην υποστήριξη έξυπνων υπηρεσιών, ειδικά καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για real-time επικοινωνία και υπολογιστική ευφυΐα στην περιφέρεια του δικτύου.

Κεφάλαιο 3 Τεχνολογία WDMA

3.1 Γενικά & η ιστορία του WDMA

Τα οπτικά δίκτυα εξακολουθούν έως και σήμερα να αποτελούν την κορυφαία λύση απέναντι στην αυξανόμενη ανάγκη για ευρυζωνικότητα. Οι οπτικές ίνες, λόγω του τεράστιου εύρους συχνοτήτων που διαθέτουν, επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφορίας με εξαιρετικά χαμηλές απώλειες. Το οπτικό σήμα, λειτουργώντας σε συχνότητες τάξεως THz, προσδίδει στη μονή οπτική ίνα δυνατότητες χωρητικότητας που φτάνουν τα Tb/s [35]. Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, αναπτύχθηκαν τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, όπως η multiple access by wavelength division (WDMA). Σε αντίθεση με την κλασική πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (WDM), η WDMA αφορά την κατανομή συγκεκριμένων μηκών κύματος σε διαφορετικούς χρήστες ή κόμβους μέσα στο δίκτυο, επιτρέποντάς τους να έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στην ίδια φυσική υποδομή οπτικών ινών [2] [36].

Το μεγάλο πλεονέκτημα της WDMA είναι ότι επιτρέπει την υλοποίηση ταυτόχρονης επικοινωνίας από πολλαπλούς τερματικούς σταθμούς με υψηλή αποδοτικότητα και χωρίς την ανάγκη για συχνές μεταγωγές ή πολυπλέκτες στο ηλεκτρικό επίπεδο. Το οπτικό σήμα παραμένει στο φάσμα του φωτός καθ' όλη τη διάρκεια της μετάδοσης, μειώνοντας την πολυπλοκότητα και τον απαιτούμενο εξοπλισμό μετατροπής [35] [37]. Η εξέλιξη των οπτικών φίλτρων, των λέιζερ ακριβείας και των τεχνικών καναλιών στενής ζώνης συνέβαλαν ουσιαστικά στη λειτουργικότητα της WDMA, παρέχοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να διαμοιράζονται αποδοτικά το φάσμα της οπτικής ίνας με ελάχιστη παρεμβολή. Επιπλέον, με τις λειτουργίες δυναμικής απόδοσης μήκους κύματος, εισαγωγής/εξαγωγής καναλιών (add/drop), και τη χρήση οπτικών δρομολογητών, καθίσταται εφικτή η ευέλικτη διαχείριση των συνδέσεων και της κυκλοφορίας στο δίκτυο [38].

Η εμφάνιση και η εδραίωση της τεχνολογίας WDMA συνέπεσε με την αυξημένη ανάγκη για παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης (PONs), ειδικά στις αρχές του 21ου αιώνα, όπου απαιτούνταν λύσεις υψηλής ταυτόχρονης εξυπηρέτησης σε αστικές και προαστιακές περιοχές. Στα πρώτα συστήματα WDMA χρησιμοποιούνταν λίγα μήκη κύματος (π.χ. 2–8),

ενώ στη συνέχεια ο αριθμός καναλιών αυξήθηκε, φτάνοντας και ξεπερνώντας τα 40 σε μοντέρνα συστήματα, υποστηρίζοντας gigabit ή και terabit ρυθμούς μετάδοσης [39].

Η τάση για εξυπνότερα, πιο διαφανή και πρωτοκολλικά-ανεξάρτητα δίκτυα ενισχύει περαιτέρω την ανάγκη για WDMA, ειδικά σε περιβάλλοντα που απαιτούν ευελιξία πρόσβασης, χαμηλό κόστος ανά χρήστη και απλή διαχείριση πόρων. Τα οπτικά στοιχεία που συνθέτουν μια αρχιτεκτονική WDMA περιλαμβάνουν λέιζερ με καθορισμένο μήκος κύματος, πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες, κυψελοειδείς ή αστρικούς παθητικούς συνδέσμους, και συσκευές διαχείρισης πρόσβασης.

Έτσι, η WDMA εξελίσσεται σε βασικό δομικό στοιχείο για μελλοντικά δίκτυα πρόσβασης, ιδιαίτερα για εφαρμογές όπως το FTTH (Fiber to the Home) και τα οπτικά LAN, όπου απαιτείται εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με διαφάνεια, ευελιξία και υψηλή απόδοση [39].

3.2 Βασική αρχή λειτουργίας WDMA

Η τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση μήκους κύματος (WDMA) αξιοποιεί την ευρυζωνικότητα που προσφέρει μια μονότροπη οπτική ίνα, επιτρέποντας τη διαμοίραση των μήκων κύματος ανά χρήστη ή κόμβο στο δίκτυο. Σε ένα σύστημα WDMA, κάθε χρήστης ή τερματικός σταθμός επικοινωνεί με το δίκτυο χρησιμοποιώντας ξεχωριστό μήκος κύματος, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονη πρόσβαση σε κοινή φυσική υποδομή [35] [2].

Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση πολλαπλών καναλιών σε μία οπτική ίνα, όπου κάθε κανάλι ανατίθεται σε διαφορετικό χρήστη, εφαρμογή ή κυκλοφορία. Οι εξελίξεις στους οπτικούς ενισχυτές ευρέος φάσματος και στα φίλτρα υψηλής ακρίβειας οδήγησαν στην πρακτική υλοποίηση της WDMA σε δίκτυα πρόσβασης και μητροπολιτικά δίκτυα [2] [36].

Η τεχνική WDMA βελτιώνει σημαντικά την αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και της χωρητικότητας ενός συστήματος οπτικής τεχνολογίας. Η ανάθεση συγκεκριμένων μηκών κύματος ανά χρήστη αποφεύγει την ανάγκη εγκατάστασης επιπλέον καλωδίων οπτικής ίνας, ενώ παρέχει διαφάνεια πρωτοκόλλου και δυνατότητα επεκτασιμότητας. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές όπως η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDM), η WDMA

παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση, ειδικά σε περιβάλλοντα πολλαπλών χρηστών με απαιτήσεις για ταυτόχρονη μετάδοση [2] [40].

Η ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών μηκών κύματος μέσα στην ίδια ίνα καθιστά εφικτή τη μετάδοση διακριτών κυματομορφών χωρίς παρεμβολές, υπό την προϋπόθεση ότι η ισχύς παραμένει σε χαμηλά επίπεδα ώστε να αποφεύγονται τα μη γραμμικά φαινόμενα. Η τεχνική WDMA προσφέρει δυνατότητες δρομολόγησης, προσθήκης/εξαγωγής καναλιών (add/drop) και μεταγωγής, όλα μέσα στο φάσμα του φωτός χωρίς μετατροπή σε ηλεκτρικό σήμα [41].

Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της WDMA:

Ορισμένοι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και αξιοπιστία ενός συστήματος WDMA είναι οι εξής:

- Η ολική διασπορά της οπτικής ίνας,
- Η μη ομοιόμορφη απολαβή στους ενισχυτές (π.χ. EDFA) για τα επιλεγμένα μήκη κύματος,
- Τα φαινόμενα σκέδασης και αντανάκλασεις από συγκολλήσεις,
- Τα μη γραμμικά φαινόμενα, όπως η διαμόρφωση φάσης (XPM, FWM),
- Η απόσταση μεταξύ των μηκών κύματος (channel spacing), που καθορίζει και το πλήθος ταυτόχρονων χρηστών.

Οι πρώτες εφαρμογές WDMA ακολουθούσαν μοντέλα με μεγάλα διαστήματα μεταξύ καναλιών, παρόμοια με τις πρώιμες υλοποιήσεις WDM, χρησιμοποιώντας δύο κυρίως μήκη κύματος (1310 και 1550 nm). Με την ανάπτυξη οπτικών ενισχυτών (EDFA), έγινε εφικτή η πυκνότερη κατανομή των μηκών κύματος σε χρήστες, με τυπικές αποστάσεις μεταξύ καναλιών στα 1000, 400, 200, 100 και 50 GHz ή 8, 3.2, 1.6, 0.8 και 0.4 nm αντίστοιχα, γύρω από την περιοχή των 1550 nm [42].

Συστήματα με απόσταση ≤ 200 GHz χαρακτηρίζονται συχνά ως Dense WDMA, υποδηλώνοντας την εκμετάλλευση στενών φασματικών διαστημάτων για την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών ή εφαρμογών.

3.3 Οπτικά Δίκτυα δεύτερης γενιάς με Τεχνολογία WDMA

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς δεν αποτελούν απλώς μία εξέλιξη των δικτύων οπτικών ινών που βασίζονται σε ηλεκτρονικά στοιχεία μεταγωγής. Η βασική τους διαφοροποίηση εντοπίζεται στη μετάβαση κρίσιμων λειτουργιών, όπως η μεταγωγή και η δρομολόγηση, από το ηλεκτρικό στο οπτικό πεδίο, βελτιώνοντας σημαντικά την αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις [2] [9].

Η χρήση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης κατά μήκος κύματος (WDMA) επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή, όπου κάθε χρήστης αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό μήκος κύματος. Ο απώτερος στόχος των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς είναι η ελαχιστοποίηση της ανάγκης για ηλεκτρονική επεξεργασία, προσφέροντας έτσι δικτυακή ευφυΐα και μεταγωγή εξ ολοκλήρου στο οπτικό επίπεδο [1] [7].

Οι βασικότερες κατηγορίες των οπτικών δικτύων WDMA 2ης γενιάς περιλαμβάνουν:

- WDMA Σύνδεσμοι Σημείου προς Σημείο (Point-to-Point)
- Δίκτυα Εκπομπής και Επιλογής στο πλαίσιο WDMA (Broadcast & Select)
- WDMA Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (WDMA-PON)
- Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος (Wavelength Routed)
- Δίκτυα Δρομολόγησης Ζώνης Μηκών Κύματος (Waveband Routed)
- Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή αυτών.

3.3.1 WDM Δίκτυα Σημείου προς Σημείο (Point to Point Link)

Οι σύνδεσμοι σημείου προς σημείο αποτελούν τη βασική υποδομή για την εισαγωγή τεχνικών WDMA σε υπάρχοντα δίκτυα. Κάθε ζεύγος κόμβων μπορεί να επικοινωνεί ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών μηκών κύματος, τα οποία μπορούν να κατανεμηθούν είτε σε διαφορετικές υπηρεσίες είτε σε διαφορετικούς χρήστες. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει:

- Οπτικούς πομπούς και δέκτες για κάθε μήκος κύματος,
- Πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες WDM,
- Οπτικούς ενισχυτές όπου απαιτείται [2] [7] [36].

Η κατανομή μήκους κύματος ανά χρήστη επιτρέπει ανεξάρτητη και ταυτόχρονη επικοινωνία χωρίς ανάγκη πολυπλοκότητας σε επίπεδο μεταγωγής.

3.3.2 WDM Δίκτυα Εκπομπής και Επιλογής (Broadcast & Select)

Σε αυτά τα δίκτυα, η εκπομπή δεδομένων πραγματοποιείται σε όλους τους κόμβους και κάθε παραλήπτης "συντονίζεται" στο κατάλληλο μήκος κύματος. Η WDMA αρχιτεκτονική επιτρέπει την πολυεκπομπή σε πολλούς κόμβους ταυτόχρονα με χρήση κυψελοειδών συζευκτών αστέρα.

Η λειτουργία τους διακρίνεται σε:

- Μονοβηματικά δίκτυα, χωρίς ενδιάμεση μεταγωγή,
- Πολυβηματικά δίκτυα, με δυνατότητες συνδυασμένης οπτικής και ηλεκτρονικής επεξεργασίας [43] [2].

3.3.3 WDM Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος (Wavelength Routed)

Σε δίκτυα WDMA δρομολόγησης, δημιουργούνται οπτικά μονοπάτια (lightpaths), τα οποία χρησιμοποιούν μοναδικά μήκη κύματος από τον αποστολέα στον παραλήπτη.

Βασικά χαρακτηριστικά:

- Συνέχεια μήκους κύματος (χωρίς μετατροπείς),
- Επανάχρηση μήκους κύματος με χρήση μετατροπών στους κόμβους,
- Αποκλειστικότητα ανά ζεύγος διαδρομής και μήκους κύματος [2] [7] [39].

3.3.4 Δίκτυα Δρομολόγησης Ζώνης Μηκών Κύματος (Waveband Routed)

Τα δίκτυα Δρομολόγησης Ζώνης Μηκών Κύματος βρίσκονται κάπου ενδιάμεσα στις δυο προαναφερθείσες κατηγορίες δικτύων, σχετικά με τον έλεγχο των μηκών κύματος. Τα δίκτυα αυτά βασίζονται στην συγχώνευση των μηκών κύματος σε ζώνες από αυτά και η προϋπόθεση από τους κόμβους είναι ο απλός έλεγχος ζωνών με περισσότερα από ένα μήκη κύματος, και όχι ο ξεχωριστός έλεγχος για κάθε μήκος κύματος. Οποιοδήποτε στοιχείο μεταγωγής λειτουργεί σε μια ζώνη μηκών κύματος και άρα το πλήθος των μεταγωγικών στοιχείων ανά κόμβο δρομολόγησης οφείλει να είναι ίσο με το πλήθος των ζωνών.

3.3.5 WDM Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks)

Τα παθητικά WDMA-PONs είναι αρχιτεκτονικές πρόσβασης όπου κάθε χρήστης (ONU) εξυπηρετείται από μοναδικό μήκος κύματος.

Ο κεντρικός κόμβος (OLT) είναι η πηγή downstream κυκλοφορίας και οι απομακρυσμένοι κόμβοι (remote nodes - RNs) διανέμουν τα σήματα στους τελικούς

χρήστες. Το δίκτυο από OLT έως RN ονομάζεται δίκτυο τροφοδοσίας, ενώ από RN έως ONU δίκτυο διανομής.

Αυτού του είδους η αρχιτεκτονική χαρακτηρίζεται από:

- Απλή παθητική διανομή,
- Ελαχιστοποίηση ενεργού εξοπλισμού στο πεδίο,
- Ευκολία κλιμάκωσης με κατανομή μήκους κύματος ανά χρήστη.

Αποτελούν βασική λύση για δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς, όπως FTTH και optical LANs.

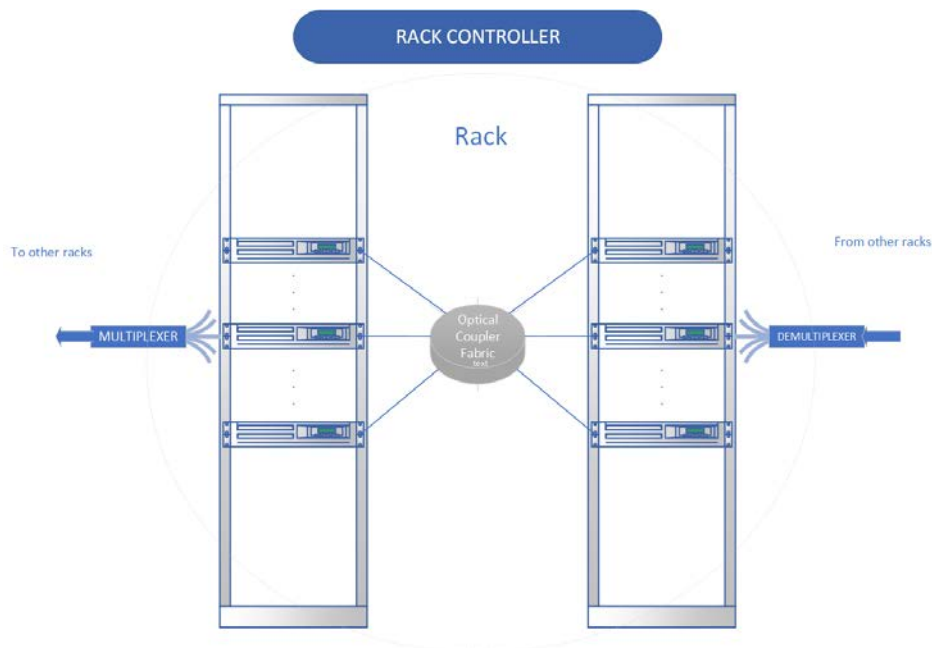
[43] [44].

Κεφάλαιο 4 Περιγραφή και προσομοίωση Δικτύου

4.1 Σκοπός και Στόχοι της Μελέτης

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εις βάθος διερεύνηση αποδοτικών αρχιτεκτονικών για οπτικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό (Software-Defined Optical Networks – SDON), με ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους σε σενάρια της περιφέρειας του δικτύου (edge networking) και στη χρήση τεχνικών πολλαπλής πρόσβαση κατά μήκος κύματος. Η ανάγκη για ευέλικτα και αποδοτικά δίκτυα αυξάνεται συνεχώς, λόγω της εμφάνισης εφαρμογών που απαιτούν υψηλό throughput, χαμηλή καθυστέρηση και δυναμική προσαρμογή στις απαιτήσεις της κυκλοφορίας [45] [46].

Η μελέτη επικεντρώνεται στον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες SDN και WDMA μπορούν να συνδυαστούν σε περιβάλλοντα edge, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση του οπτικού φάσματος, ταχεία ανταπόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες κίνησης και ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων και των απωλειών πακέτων. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά προφίλ κίνησης και πολιτικές διαχείρισης φάσματος και δρομολόγησης [47] [8].



Εικόνα 1 - Σύστημα Διασύνδεσης Διακομιστών μέσω Οπτικού Ζεύκτη σε Ενδοραχιαίο Δίκτυο

Καθώς οι edge υποδομές διαδραματίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην υποστήριξη κρίσιμων υπηρεσιών, όπως τα δίκτυα αισθητήρων IoT, τα έξυπνα δίκτυα ενέργειας, η εικονική/επαυξημένη πραγματικότητα και τα ασύρματα δίκτυα 5G/6G, η ανάγκη για αποδοτική, ευέλικτη και προγραμματιζόμενη διαχείριση της κίνησης καθίσταται επιτακτική. Οι SDON αρχιτεκτονικές αναδεικνύονται ως μια ισχυρή απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, προσφέροντας δυνατότητα δυναμικής ανακατανομής πόρων, αυτοματοποίηση του ελέγχου και συντονισμό πολλαπλών επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) [46] [48].

Η παρούσα εργασία επιδιώκει:

- **Να αναλύσει τη συμπεριφορά SDON αρχιτεκτονικών** σε περιβάλλοντα edge, εξετάζοντας διάφορα μοντέλα κίνησης: στατικά, δυναμικά, ή στοχαστικά (π.χ. Poisson-based).
- **Να συγκρίνει διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης φάσματος και δρομολόγησης** βάσει βασικών μετρικών απόδοσης: καθυστέρηση, blocking probability, αξιοποίηση καναλιών και ρυθμός απώλειας.
- **Να αξιολογήσει την αποδοτικότητα αλγορίθμων RSA (Routing and Spectrum Assignment)** σε δίκτυα WDMA, υπό τον έλεγχο SDN.
- **Να μελετήσει την ικανότητα του συστήματος να προσαρμόζεται σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου**, αξιοποιώντας δυναμικούς μηχανισμούς κατανομής πόρων.
- **Να εντοπίσει σχεδιαστικές παραμέτρους και στρατηγικές βελτιστοποίησης** για μελλοντικά δίκτυα edge-enabled SDON.

Μέσα από αυτή την προσέγγιση, η εργασία στοχεύει να συμβάλει στη συστηματική κατανόηση των τεχνικών και αρχιτεκτονικών που μπορούν να υποστηρίξουν την εξέλιξη ευέλικτων, αποδοτικών και βιώσιμων οπτικών υποδομών νέας γενιάς. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στις απαιτήσεις που προκύπτουν από την αυξανόμενη δυναμική των εφαρμογών στην περιφέρεια του δικτύου και την ανάγκη για διαλειτουργικότητα, αυτονομία και αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων.

Οι βασικοί στόχοι της μελέτης συνοψίζονται ως εξής:

- **Ανάλυση της συμπεριφοράς SDON αρχιτεκτονικών στο edge**, υπό διαφορετικά προφίλ κίνησης (στατικά, δυναμικά, στοχαστικά).
- **Σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης φάσματος και δρομολόγησης**, με βάση μετρικές όπως η αξιοποίηση πόρων, η πιθανότητα απόρριψης ζήτησης (blocking probability) και η καθυστέρηση.
- **Εκτίμηση της αποδοτικότητας αλγορίθμων RSA (Routing and Spectrum Assignment)** σε συνδυασμό με τον έλεγχο μέσω SDN.
- **Εξέταση της δυνατότητας δυναμικής προσαρμογής του δικτύου** σε μεταβαλλόμενη κίνηση, με στόχο την ενίσχυση της ευελιξίας και της ανθεκτικότητας.
- **Προτάσεις για βελτιώσεις στην απόδοση edge optical υποδομών**, βάσει των ευρημάτων από την πειραματική ή προσομοιωτική μελέτη.

Μέσα από την παραπάνω ανάλυση, η εργασία επιδιώκει να προσφέρει συμβολή στην κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη σχεδίαση αποδοτικών, ευέλικτων και βιώσιμων οπτικών δικτύων νέας γενιάς, ειδικά στις συνθήκες υψηλής δυναμικότητας και κλιμακούμενης ζήτησης που χαρακτηρίζουν την περιφέρεια του δικτύου.

4.2 Αρχιτεκτονική του Προτεινόμενου Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος SDON-WDMA σχεδιάστηκε με στόχο την προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός edge optical δικτύου υπό στοχαστικά σενάρια κίνησης και περιορισμούς σε αριθμό καναλιών, ρυθμό μετάδοσης και ουρές πακέτων. Η προσέγγιση βασίζεται στη δυναμική επιλογή παραμέτρων μετάδοσης, καθώς και στην αποφυγή συγκρούσεων παραληπτών (receiver collisions), με στόχο την αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης.

Η συνολική αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τα εξής βασικά συστατικά:

- **Σταθμοί μετάδοσης (transmitters):** Οι κόμβοι-πηγές που παράγουν πακέτα σύμφωνα με ίχνη πραγματικής κίνησης (trace-driven).

- **Ουρές FIFO:** Κάθε σταθμός διαθέτει μια ουρά σταθερού μεγέθους για αποθήκευση πακέτων.
- **WDMA Κανάλια:** Οπτικοί δίαυλοι σταθερού ρυθμού, στους οποίους γίνεται η δρομολόγηση δεδομένων.
- **Μονάδα Απόφασης Μετάδοσης (Transmission Decision Unit):** Για κάθε slot, καθορίζεται ποιοι σταθμοί έχουν πρόθεση εκπομπής και επιλέγεται στατιστικά ο αποστολέας για κάθε παραλήπτη, βάσει συγκρούσεων.
- **SDN Controller:** Ένας αφηρημένος ελεγκτής που προσομοιώνει τη λογική της δυναμικής κατανομής καναλιών και αποτροπής συγκρούσεων.

Η διαδικασία εκτελείται σε διακριτούς χρόνους (slots), και σε κάθε slot:

1. Γίνεται φόρτωση νέων πακέτων στις ουρές, με βάση τα trace αρχεία.
2. Καθορίζεται ποιοι σταθμοί επιθυμούν να εκπέμψουν.
3. Επιλέγονται οι αποστολείς για κάθε προορισμό (receiver arbitration).
4. Γίνεται μετάδοση σε διαθέσιμα κανάλια.
5. Καταγράφονται μετρικές απόδοσης (throughput, delay, drop).

4.2.1 Βασικές Δικτυακές Παράμετροι

Για την αναπαράσταση του οπτικού καναλιού καθορίστηκαν οι εξής σταθερές παραδοχές:

- **Αριθμός καναλιών:** Τέσσερις ($W = 4$) παράλληλες οπτικές ζεύξεις (κανάλια), κάθε μία με ρυθμό μετάδοσης Gbps, προσφέροντας συνολικά Gbps διαμοιραζόμενο εύρος στο σύστημα.
- **Μέγεθος πακέτου (Packet Size):** Κάθε πακέτο έχει σταθερό μήκος $L = 12.000 \text{ bits}$, τιμή που διευκολύνει τον υπολογισμό του χρόνου μετάδοσης καθώς και την παρακολούθηση του προσφερόμενου και εξυπηρετούμενου φορτίου.
- **Διάρκεια guardslot:** Για αποφυγή αλληλεπικάλυψης μεταδόσεων μεταξύ διαδοχικών πακέτων στο ίδιο κανάλι, εισάγεται guard band $T_{guard} = 0,9 \text{ ns}$.

- **Διάρκεια slot:** Η διάρκεια κάθε χρονοθυρίδας (slot) υπολογίζεται ως:

$$T_{slot} = \frac{L}{R} + T_{guard} \approx 480,9 \text{ ns.}$$

Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι κάθε πακέτο ολοκληρώνει την εκπομπή του εντός ενός slot.

- **Καθυστερήση διάδοσης (Propagation Delay):** Θεωρείται σταθερή και ισούται με: $T_{prop} = 25 \text{ ns}$ ανά link, αντιστοιχώντας σε τυπικές αποστάσεις στο edge δικτύου.
- **Buffering:** FIFO ουρές μεγέθους $B = 100$ πακέτων σε κάθε σταθμό. Πακέτο που φτάνει σε πλήρη ουρά απορρίπτεται (drop-when-full).
- **Πιθανότητα εκπομπής:** $P_{tx} = 20\%, 50\%, 100\%$. Ελέγχει την πρόθεση μετάδοσης κάθε σταθμού σε κάθε slot, ώστε να ρυθμίζεται ελεγχόμενα το συνολικό προσφερόμενο φορτίο στο σύστημα.
- **Traffic Load Sources:** Η γεννήτρια πακέτων βασίζεται σε αρχεία πραγματικής κίνησης (trace-driven), εξασφαλίζοντας ρεαλιστική κατανομή αφίξεων σε χρονική κλίμακα μικροδευτερολέπτων.

4.2.2 Κριτήρια Αξιολόγησης

Σε κάθε πείραμα υπολογίζονται οι εξής βασικές μετρικές:

1. Offered Load (Gbps):

$$\frac{\sum_{all\ packets} L}{T_{sim}} = \frac{\#packets\ added \times 12000}{T_{sim}}$$

2. Throughput (Gbps):

$$Throughput = \frac{\sum_{transmitted} L}{T_{sim}}$$

3. Drop Rate (Gbps):

$$Drop\ Rate = \frac{\sum_{dropped} L}{T_{sim}}$$

4. Μέση Καθυστερήση (s):

$$\overline{T_{delay}} = \frac{1}{N_{tx}} \sum_{i=1}^{N_{tx}} (T_{reception,i} - T_{generation,i})$$

Όλα τα αποτελέσματα καταγράφονται σε αρχεία load.txt, throughput.txt, droppedrate.txt και delay.txt, τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζονται για την παραγωγή διαγραμμάτων και την εξαγωγή πορισμάτων.

4.2.3 Αποφυγή Συγκρούσεων (Collision Avoidance)

Η αποφυγή συγκρούσεων αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό σε συστήματα SDON με WDMA, όπου η σωστή και έγκαιρη μετάδοση πακέτων πρέπει να συνυπολογίζει περιορισμούς τόσο στα διαθέσιμα κανάλια όσο και στους παραλήπτες. Στο προτεινόμενο σύστημα, οι συγκρούσεις αποτρέπονται με δύο κύριες στρατηγικές: αποφυγή channel collisions και receiver collisions.

Αποφυγή Channel Collisions

Για κάθε slot:

- Αρχικοποιείται η διαθεσιμότητα των καναλιών (WDMA).
- Κάθε σταθμός που επιθυμεί να εκπέμψει (με πιθανότητα P_{tx}) επιλέγει τυχαία έναν προορισμό. Επιτρέπεται η μετάδοση μόνο εφόσον υπάρχει διαθέσιμο κανάλι, με την προϋπόθεση ότι το κανάλι δεν έχει ήδη ανατεθεί. Ο μέγιστος αριθμός ταυτόχρονων μεταδόσεων περιορίζεται από το πλήθος των διαθέσιμων WDMA καναλιών.

Αποφυγή Receiver Collisions

Πολλοί σταθμοί μπορεί να προσπαθήσουν να στείλουν πακέτα στον ίδιο παραλήπτη στο ίδιο χρονικό slot. Για κάθε προορισμό, αν υπάρχουν πολλαπλοί αποστολείς, επιλέγεται ένας αποστολέας τυχαία. Τα υπόλοιπα πακέτα διατηρούνται στις ουρές για μελλοντική μετάδοση.

Έτσι διασφαλίζεται ότι κάθε προορισμός μπορεί να λάβει το πολύ ένα πακέτο ανά slot, εξαλείφοντας τις συγκρούσεις σε επίπεδο παραλήπτη.

Επικοινωνία με τον SDN Controller (Λογική Ελέγχου)

Αν και δεν υλοποιείται φυσικά, η αρχιτεκτονική ενσωματώνει έναν αφηρημένο SDN controller, ο οποίος επιτελεί ρόλο επιλογής και ανάθεσης αποστολών, με τρόπο κεντρικά ελεγχόμενο, προσδίδοντας στον αλγόριθμο μια λογική κατανεμημένης βελτιστοποίησης.

Η συνδυαστική χρήση των παραπάνω μηχανισμών οδηγεί σε:

- ✓ Μείωση των απορρίψεων λόγω συγκρούσεων.
- ✓ Βελτίωση της καθυστέρησης, μέσω αποδοτικής κατανομής καναλιών.
- ✓ Ενίσχυση της αξιοπιστίας του συστήματος σε σενάρια υψηλού φορτίου.

4.3 Υλοποίηση της Προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρακτική υλοποίηση του προτεινόμενου SDON-WDMA συστήματος, όπως αυτή υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C. Η προσομοίωση ακολουθεί την αρχιτεκτονική που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.2 και έχει ως σκοπό την αξιολόγηση επιδόσεων του συστήματος υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

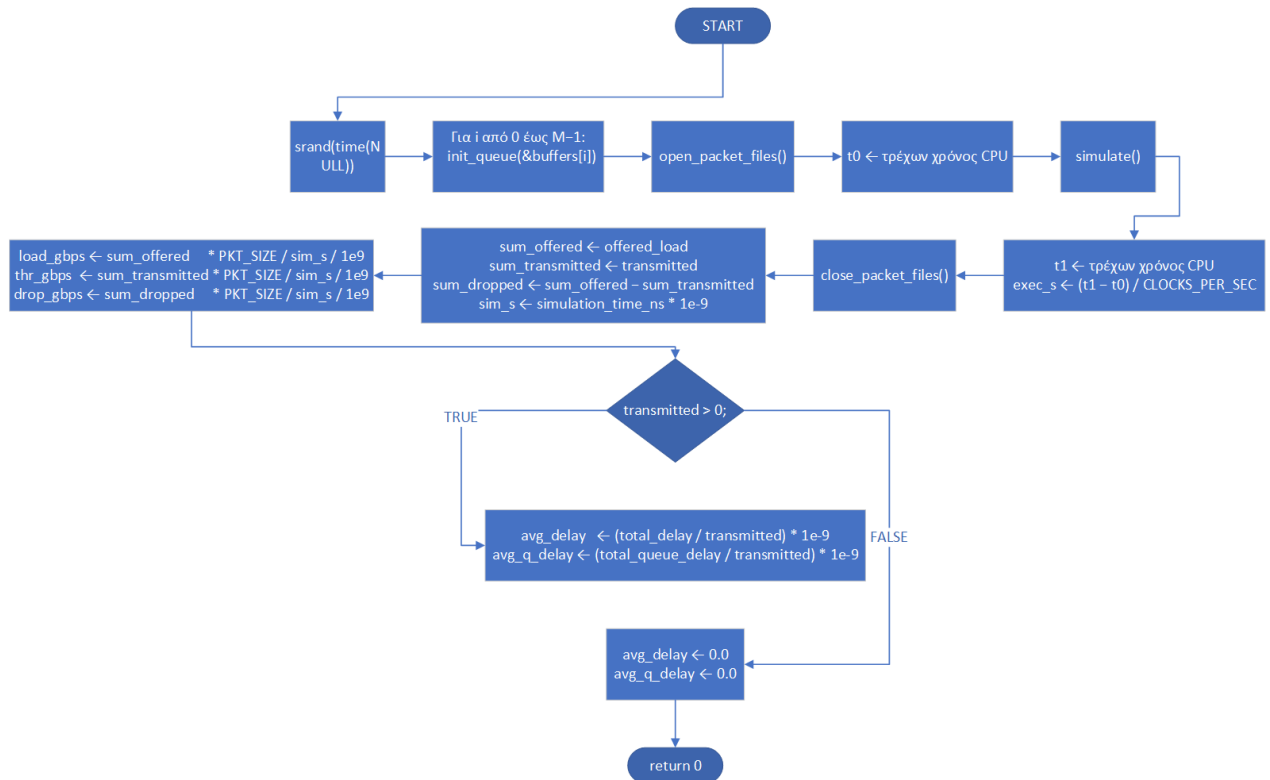
4.3.1 Δομή Προγράμματος

Το πρόγραμμα αποτελείται από τα εξής βασικά υποσυστήματα:

- Δομές δεδομένων: Ορίζονται οι Packet, Queue, για την προσωρινή αποθήκευση πακέτων και τη διαχείριση ουρών.
- Αρχεία εισόδου: N αρχεία πακέτων τύπου fptg_*.txt, τα οποία περιέχουν γραμμές της μορφής id, source, destination, gentime.
- Αρχικοποιήσεις: Καθορισμός ουρών, ανοίγματα αρχείων, μηδενισμός counters.
- Κύκλος προσομοίωσης: Υλοποιείται με τον βρόχο simulate(), ο οποίος:
 - Εκτελεί την προσθήκη πακέτων σε ουρές βάσει χρόνου
 - Ορίζει ποιοι σταθμοί θέλουν να εκπέμψουν (με πιθανότητα)
 - Επιλέγει έναν αποστολέα ανά παραλήπτη για κάθε κανάλι
 - Υπολογίζει καθυστέρηση και throughput.

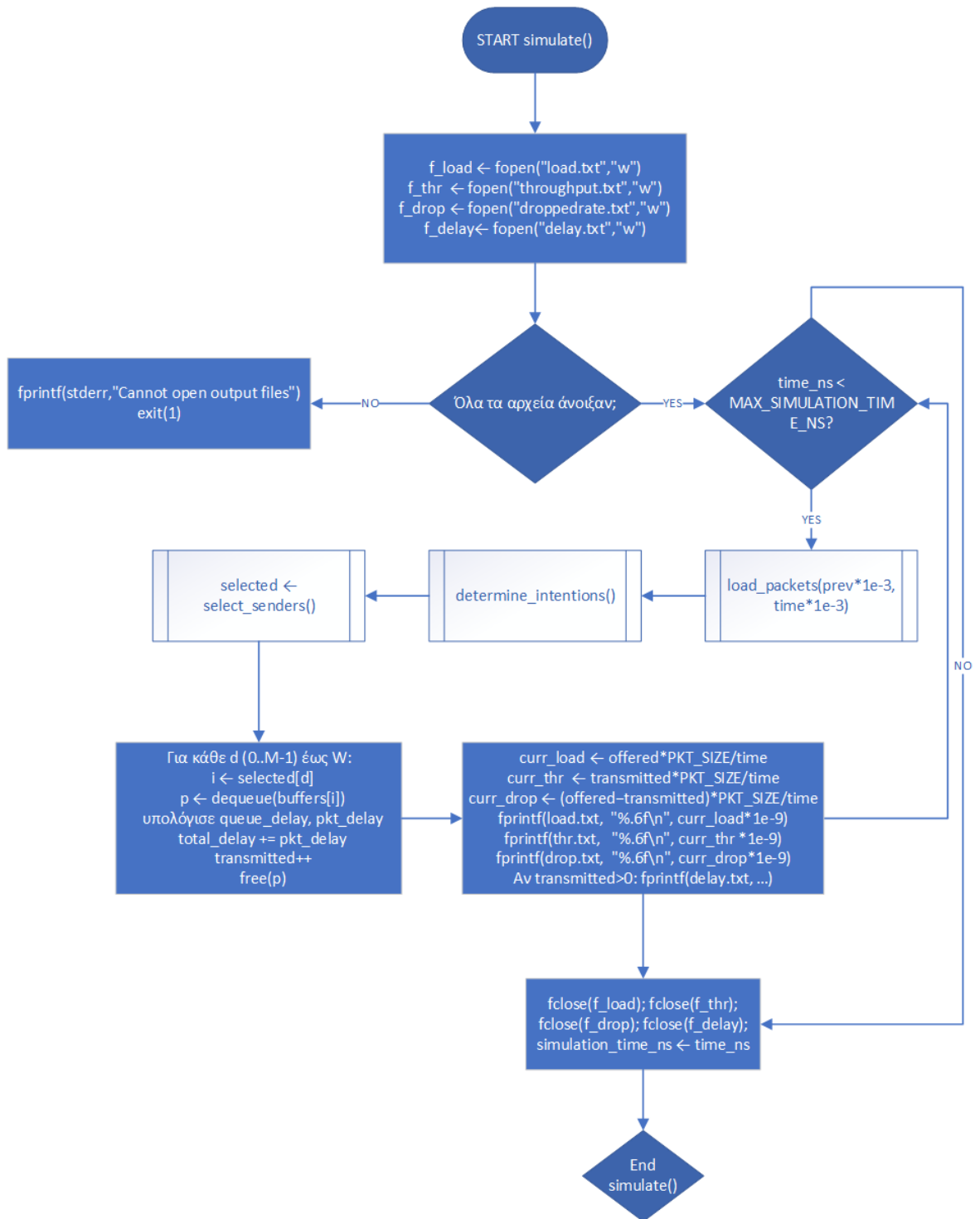
4.3.2 Μονάδες Κώδικα

1) **main():** Κεντρική συνάρτηση που καλεί όλα τα επιμέρους στάδια.



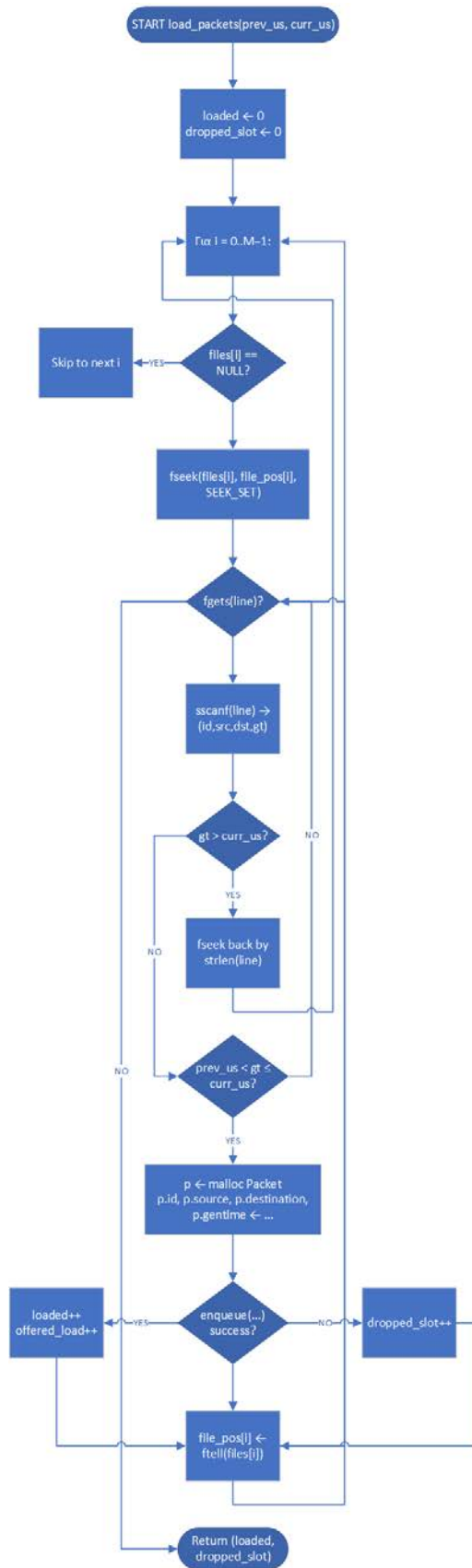
Εικόνα 2 - Συνάρτηση Main

2) **simulate()**: Εκτελεί τη χρονική προσομοίωση (slots) και υπολογίζει τις μετρικές.



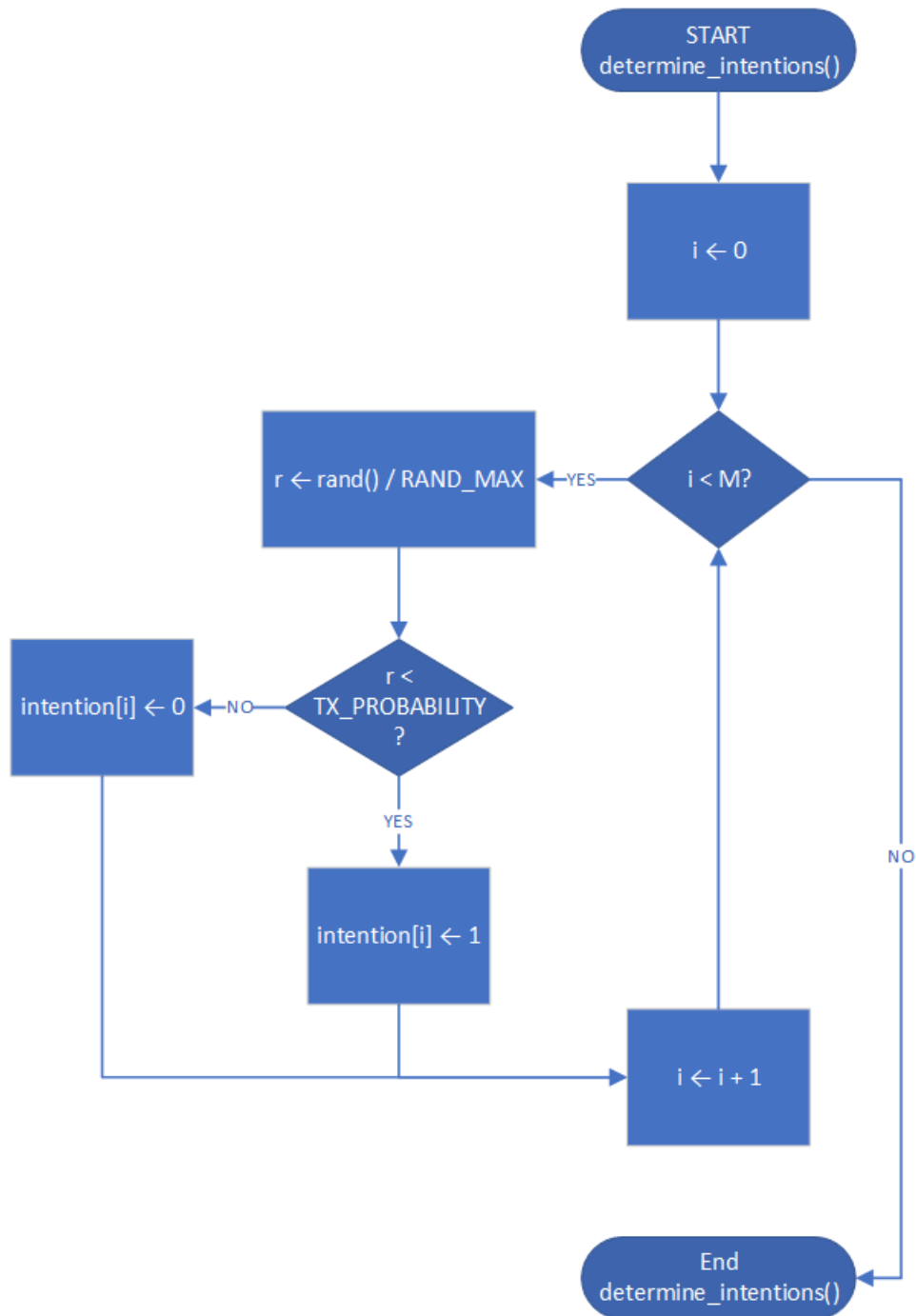
Εικόνα 3 - Συνάρτηση Simulate

3) **load_packets()**: Ανάγνωση εισερχόμενων πακέτων από τα αρχεία trace.



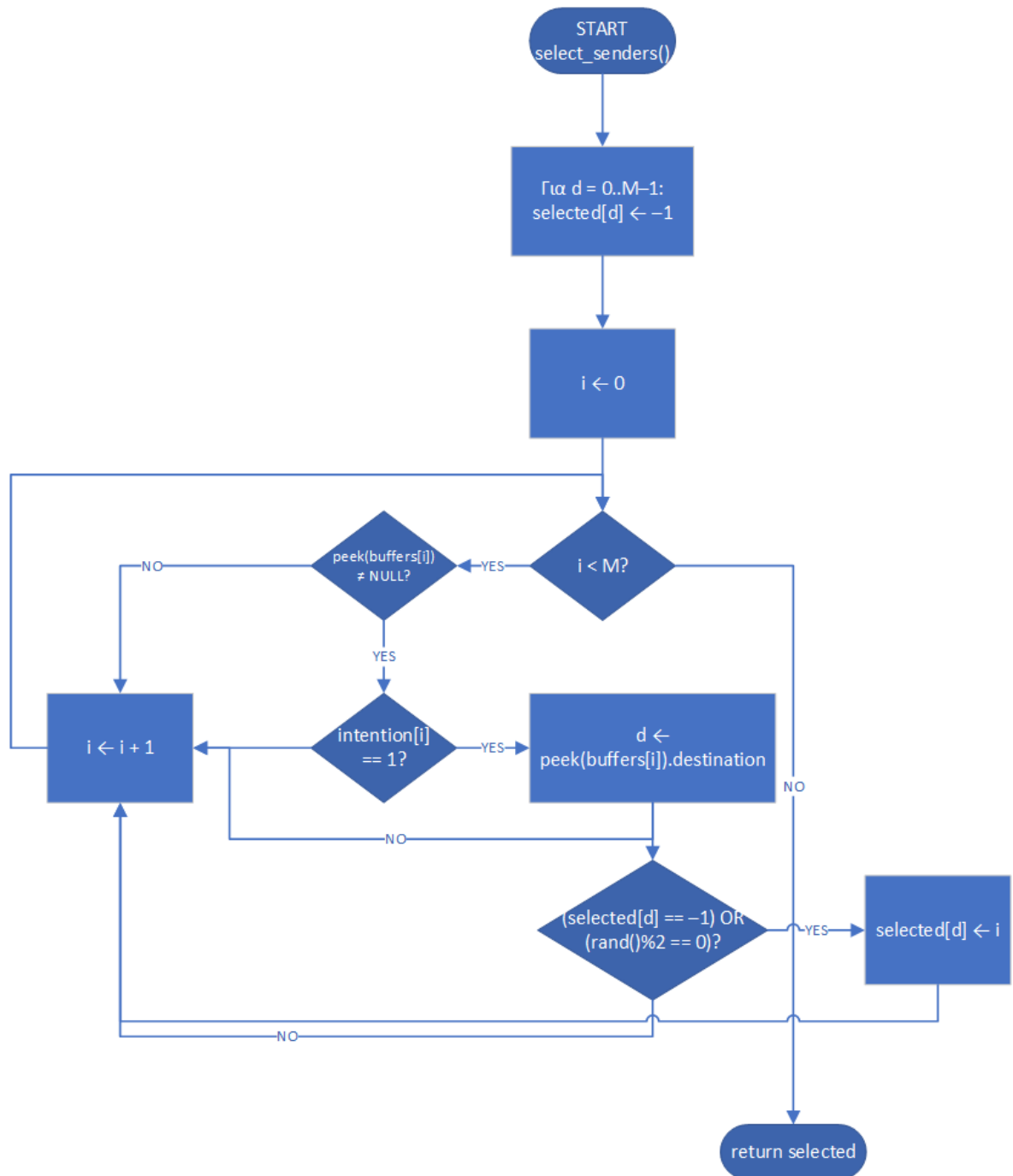
Εικόνα 4 - Συνάρτηση Load Packets

4) **determine_intentions()**: Στοχαστική απόφαση εκπομπής για κάθε σταθμό.



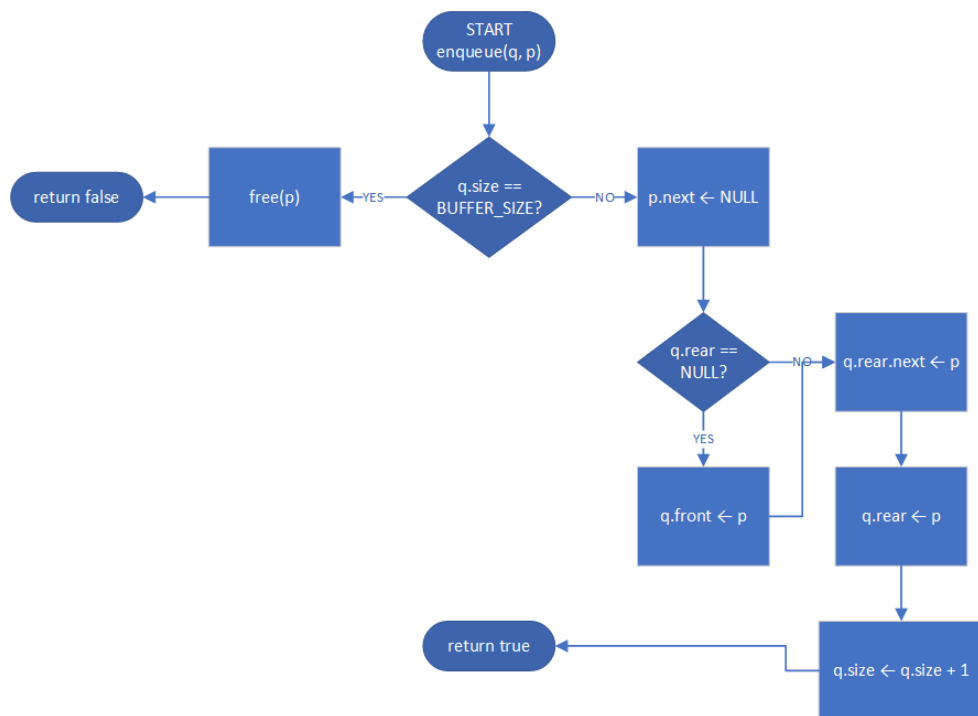
Εικόνα 5 - Συνάρτηση Determine Intentions

5) **select_senders()**: επιλογή κόμβων με πρόθεση για μετάδοση και αποστολή πακέτου.

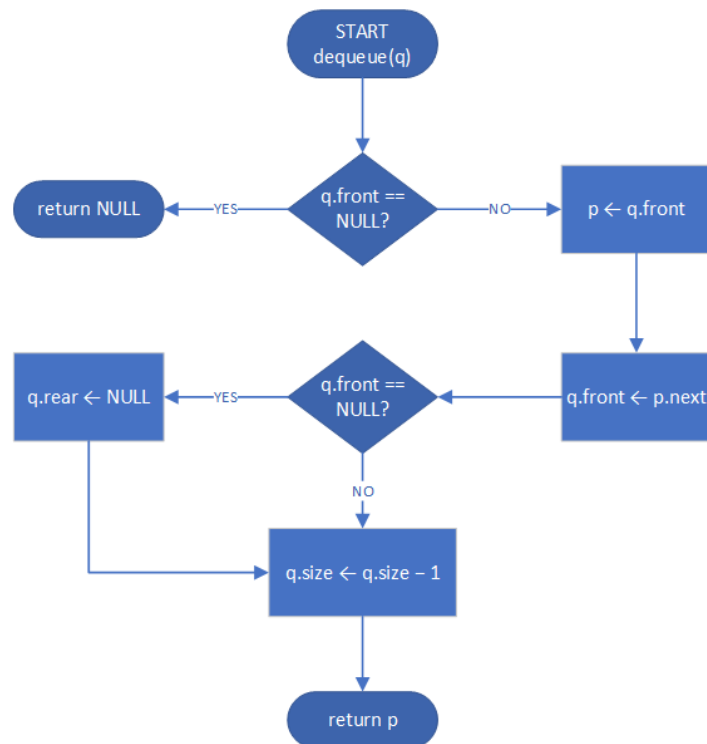


Εικόνα 6 - Συνάρτηση Select Senders

6) **enqueue()/dequeue()**: Λειτουργίες για την ουρά FIFO.

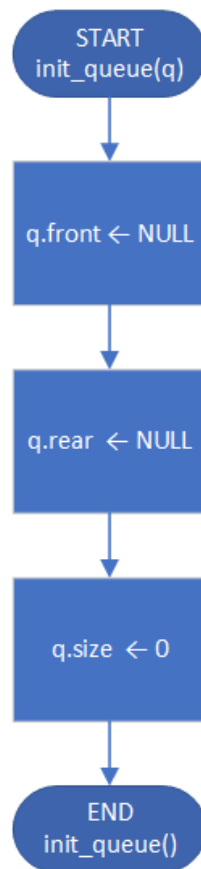


Εικόνα 7 - Συνάρτηση Enqueue



Εικόνα 8 - Συνάρτηση Dequeue

7) **init_queue(q)**: Αρχικοποίηση ουράς.



Εικόνα 9 - Συνάρτηση Init Queue

- 8) **peek(q)**: Επιστρέφει το πρώτο πακέτο στην ουρά q (δηλαδή q.front) χωρίς να το αφαιρεί από την ουρά.
- 9) **open_packet_files()**: Κάνει `fopen("fptg_i.txt", "r")` για κάθε i από 1 έως M και τερματίζει το πρόγραμμα με μήνυμα σφάλματος εάν κάποιο αρχείο δεν ανοιχθεί.
- 10) **close_packet_files()**: Κλείνει σειριακά όλα τα ανοικτά αρχεία εισόδου `files[i]` καλώντας `fclose(files[i])` για κάθε i από 0 έως M-1.

Κεφάλαιο 5 Πειράματα και Αποτελέσματα

5.1 Περιγραφή Πειραμάτων και Προσομοιώσεων

Η πειραματική αξιολόγηση του προτεινόμενου MAC-πρωτοκόλλου βασίστηκε σε εκτενή προσομοίωση διακριτού χρόνου με στόχο να αναδείξει τη συμπεριφορά του υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτου και χρονισμού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε είκοσι αρχεία «trace» πραγματικής κίνησης (fptg_1.txt έως fptg_20.txt), στα οποία οι χρόνοι γέννησης των πακέτων ακολουθούν κατανομή Poisson. Κάθε ένα από αυτά τα trace files τροφοδότησε τον προσομοιωτή μας, ώστε να αναπαραστήσει ρεαλιστικά μοτίβα κυκλοφορίας σε edge δικτυακό περιβάλλον WDMA.

Η αξιολόγηση του MAC-πρωτοκόλλου οργανώθηκε σε τέσσερις διακριτές σειρές δοκιμών, καθεμία από τις οποίες απομονώνει και μεταβάλλει μόνο μία παράμετρο λειτουργίας, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές.

Στα πειράματα που έλαβαν χώρα λήφθηκαν υπόψη οι παρακάτω μεταβλητές και παράμετροι:

Παράμετροι	Τιμές για την παράμετρο	Σταθερές παράμετροι	Runs
Buffer size	5-15-25	channels=4, servers=20, p=100%	3
Channels	4-6-8	buffer size=15, servers=20, p=100%	3
Servers	16-20-24	buffer size=15, channels=6, p=100%	3
Probability	20%-50%-100%	buffer size=15, channels=6, servers=20	3

Ρυθμίσεις Πειραματικών Παραμέτρων 5.1

Κάθε μία από αυτές τις 12 ρυθμίσεις εκτελέστηκε τρεις (3 runs) με διαφορετικό seed στον γεννήτορα τυχαίων, ώστε να διασφαλιστεί η στατιστική εγκυρότητα και η αναπαραγωγικότητα των μετρήσεων.

Για κάθε trace, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές επαναλήψεις με διαφορετικό seed στον γεννήτορα τυχαίων αριθμών, ώστε να διασφαλιστεί η στατιστική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Οι μετρήσεις αθροίστηκαν και αναλύθηκαν βάσει μέσων τιμών, ενώ

όπου κρίθηκε απαραίτητο, καταγράφηκαν και τα περιθώρια διακύμανσης (π.χ. τυπική απόκλιση).

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης για κάθε εκτέλεση ορίστηκε σε 500 ms, χρονικό εύρος που υπερκαλύπτει τη διάρκεια όλων των εισερχόμενων ροών, επιτρέποντας την καταγραφή των μετρικών σε κατάσταση ισορροπίας (steady-state). Ο ολικός αριθμός slot φτάνει περίπου τα 5 εκατομμύρια, προσφέροντας επαρκή βάση για στατιστική ανάλυση. Κατά την προσομοίωση, μετρούνται οι εξής βασικές μετρικές απόδοσης:

- **Offered Load (Gb/s):** συνολικά bits που φορτώθηκαν στα buffers ανά δευτερόλεπτο.
- **Throughput (Gb/s):** bits των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς.
- **Drop Rate (Gb/s):** bits των πακέτων που απορρίφθηκαν λόγω πληρότητας buffers ή collisions.
- **Μέση Καθυστέρηση (s):** χρόνος από τη γέννηση μέχρι την έναρξη μετάδοσης, υπολογισμένος μόνο για τα επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα.

Επιπλέον, παρακολουθήθηκαν στατιστικά που σχετίζονται με τη χρήση των καναλιών WDMA και την αποδοτικότητα των μηχανισμών αποφυγής συγκρούσεων, τόσο σε επίπεδο καναλιού όσο και σε επίπεδο αποδέκτη (receiver collisions).

Τα αποτελέσματα κάθε εκτέλεσης καταγράφηκαν σε αρχεία κειμένου (π.χ. load.txt, throughput.txt, droppedrate.txt, delay.txt) και εισήχθησαν σε κατάλληλα εργαλεία (π.χ. Python, Excel, MATLAB, Gnuplot) για την παραγωγή διαγραμμάτων και τη γραφική αποτύπωση της απόδοσης υπό τις εκάστοτε συνθήκες.

Η οργάνωση των δεδομένων και η πειραματική προσέγγιση στοχεύουν στην αντικειμενική αξιολόγηση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου και την εξαγωγή γενικεύσιμων συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά του σε περιβάλλοντα υψηλής δυναμικότητας και κυκλοφοριακής ποικιλίας, όπως αυτά που συναντώνται σε edge optical δίκτυα.

5.2 Απόδοση Συστήματος και Αποτελέσματα

Αντικείμενο μελέτης αποτέλεσαν τα αποτελέσματα για το προσφερόμενο φορτίο (offered load), τη ρυθμαπόδοση (throughput), για τον ρυθμό με τον οποίο χάνονται τα

πακέτα (dropping rate, εν συντομία: drop) και τέλος για τα αποτελέσματα για την καθυστέρηση από την στιγμή που εισέρχονται στον buffer ως την πιθανή εκπομπή τους (delay). Τα αποτελέσματα αυτά μελετήθηκαν μέσω των παρακάτω γραφικών παραστάσεων :

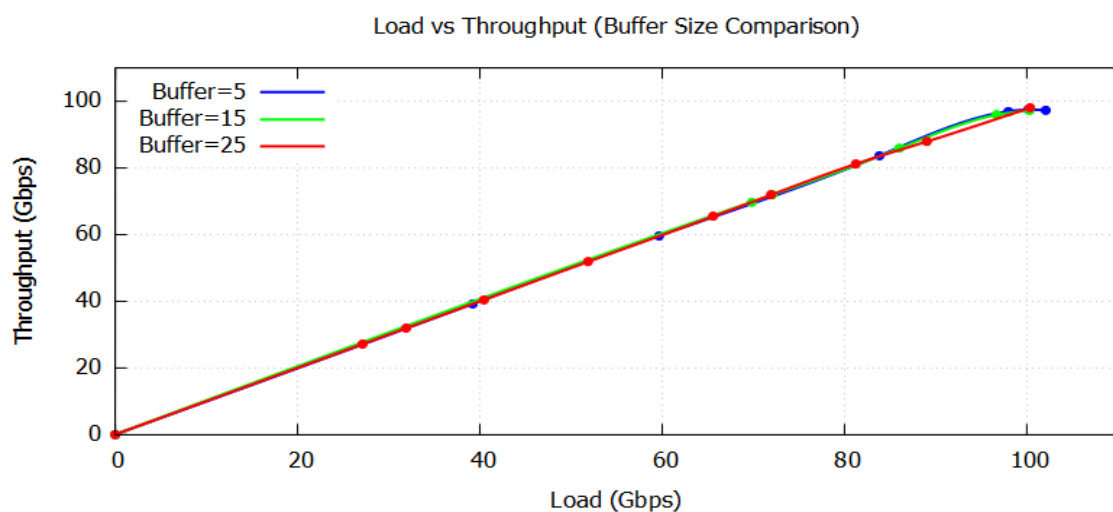
1. Offered load (Gb/s) vs. Throughput (Gb/s),
2. Offered load (Gb/s) vs. Total delay (milliseconds),
3. Offered load (Gb/s) vs. Queueing delay (milliseconds),
4. Offered load (Gb/s) vs. Dropping rate (Gb/s).

5.2.1 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Buffer Size

Στην πρώτη περίπτωση μελέτης του συστήματος ερευνήθηκε το κανάλι για τις διαφορετικές τιμές του μεγέθους του buffer. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε το κανάλι για αυξανόμενες τιμές του μεγέθους του buffer από 5 σε 15 και 25, κρατώντας σταθερές τις ακόλουθες παραμέτρους:

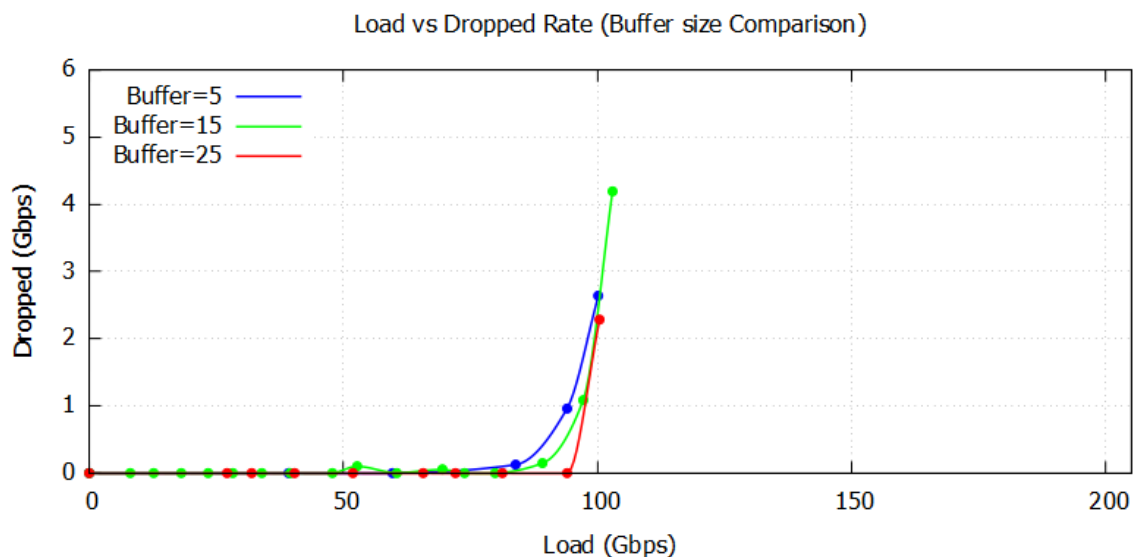
- Κανάλια: $W = 4$
- Servers: $M = 20$
- Πιθανότητα μετάδοσης: $P_{tx} = 100\%$

Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που αποτυπώνουν τη κίνηση του καναλιού συγκριτικά με τις τιμές που μας αφορούν.



Εικόνα 10 - Load vs Throughput για $S=20$, $W=4$, $B=15, 20, 25$, $P=100\%$

Παρατηρείται ότι, μέχρι το επίπεδο του κορεσμού στην τιμή των 100 Gb/s, ο ρυθμός μετάδοσης ακολουθεί με σχεδόν ιδανική γραμμικότητα το προσφερόμενο φορτίο, υποδεικνύοντας πλήρη και αποδοτική αξιοποίηση της διαθέσιμης ζεύξης. Επιπλέον, οι τρεις καμπύλες συμπίπτουν σχεδόν πλήρως, γεγονός που αποδεικνύει ότι, υπό συνθήκες διαρκούς ζήτησης μετάδοσης ($P_{tx} = 100\%$), το μέγεθος του buffer δεν επηρεάζει την επίτευξη του μέγιστου throughput, αρκεί να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να απορροφά τις στιγμιαίες αιχμές φορτίου. Μόνο στα σημεία πολύ κοντά στο όριο κορεσμού εμφανίζεται μια ανεπαίσθητη υποχώρηση της καμπύλης για $B = 5$, πιθανώς λόγω περιορισμένης ικανότητας αποθήκευσης σε ακραίες συνθήκες αιχμής. Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το σύστημα μπορεί να πετύχει σχεδόν μηδενική απώλεια μέσω προσεγγμένου σχεδιασμού buffer, χωρίς όμως ουσιαστική επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης όσο δεν ξεπερνιέται η φυσική χωρητικότητα των καναλιών.



Εικόνα 11 - Load vs Dropped Rate για $S=20$, $W=4$, $B=15, 20, 25$, $P=100\%$

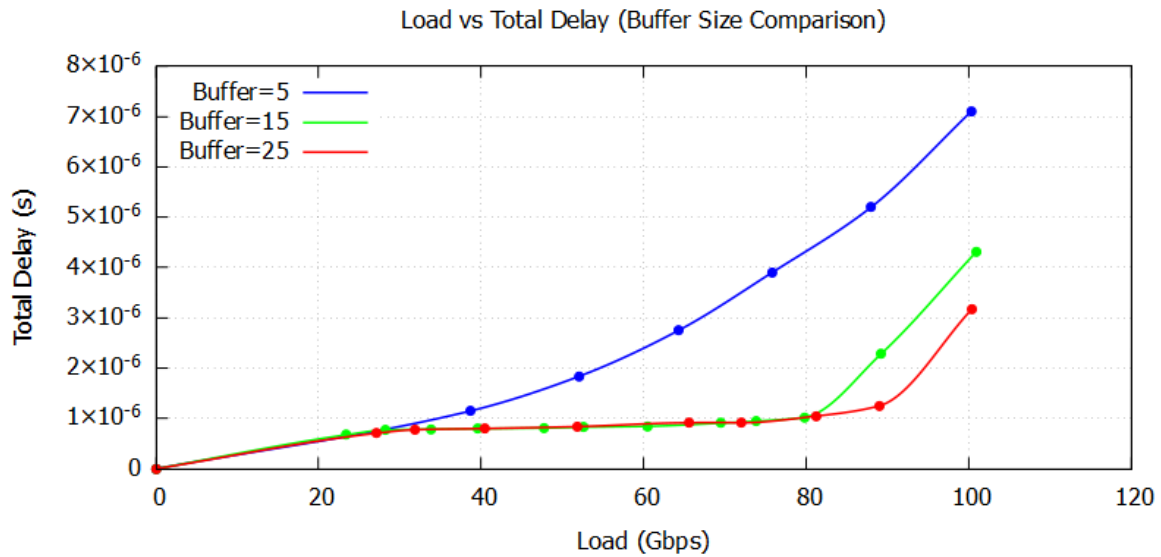
Στο διάγραμμα της σχέσης μεταξύ προσφερόμενου φορτίου (Load) και ρυθμού απωλειών (Dropped Rate) προβάλλεται η συμπεριφορά του συστήματος με τέσσερα κανάλια των 25 Gb/s, είκοσι κόμβους και $P_{tx} = 100\%$ όταν διαφέρουν τα μεγέθη των buffer στα 5, 15 και 25 πακέτα.

Παρατηρείται ότι, μέχρι περίπου τα 85 Gb/s, ο ρυθμός απωλειών παραμένει πρακτικά μηδενικός σε όλες τις τρεις παραμέτρους buffer size, καθώς οι ουρές απορροφούν ικανοποιητικά τις μεταβολές φορτίου. Ωστόσο, καθώς το προσφερόμενο φορτίο

υπερβαίνει το όριο της φυσικής χωρητικότητας (100 Gb/s), ξεκινούν εναλλακτικές συμπεριφορές:

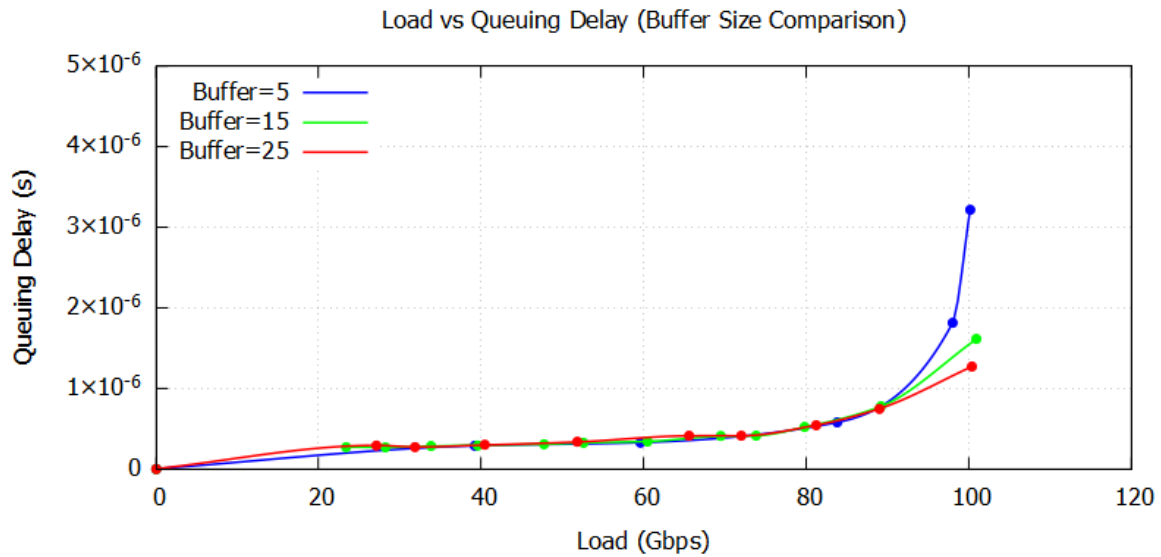
- Για **B = 5** πακέτα (μπλε καμπύλη), η απώλεια αρχίζει ήδη γύρω στα 92 Gb/s και αυξάνεται γρήγορα, φτάνοντας σχεδόν τα 2.5 Gb/s στο όριο των 100 Gb/s. Η περιορισμένη χωρητικότητα οδηγεί σε πρόωρη πλήρωση της ουράς και άρα σε overflow ακόμη και πριν τον πλήρη κορεσμό των καναλιών.
- Για **B = 15** πακέτα (πράσινη καμπύλη), το σημείο εκκίνησης των απωλειών μετατίθεται ελαφρώς δεξιότερα (περίπου 95 Gb/s), αλλά η μέγιστη τιμή drop rate φθάνει υψηλότερα (~4.2 Gb/s) σε φορτία άνω των 100 Gb/s. Η μεσαία χωρητικότητα buffer επιτρέπει μεγαλύτερη αποθήκευση μέχρι να ξεκινήσει το overflow, όμως όταν συμβεί, η ροή υπερχειλίσσης είναι εντονότερη πριν η ουρά «αδειάσει» αρκετά.
- Για **B = 25** πακέτα (κόκκινη καμπύλη), η είσοδος σε κατάσταση απωλειών μετατοπίζεται πλησιέστερα στο 100 Gb/s, και ο ρυθμός απωλειών παραμένει συγκριτικά χαμηλός (κάτω από 1 Gb/s) ακόμη και για φορτία έως 105 Gb/s. Η επαρκής χωρητικότητα buffer αποτρέπει σημαντικά το overflow, δίνοντας στο σύστημα περιθώριο να χειριστεί αιχμές άνω της nominal ζεύξης.

Προκύπτει ότι η αύξηση του buffer size μετατοπίζει το όριο εκκίνησης overflow προς υψηλότερα προσφερόμενα φορτία και μειώνει την ένταση των απωλειών, επιβεβαιώνοντας τον κρίσιμο ρόλο της επαρκούς προσωρινής αποθήκευσης κατά τις καταστάσεις αιχμής φορτίου σε WDMA edge δίκτυα.



Εικόνα 12 - Load vs Total Delay για $S=20$, $W=4$, $B=15, 20, 25$, $P=100\%$

Στο διάγραμμα της συνολικής καθυστέρησης (total delay) σε συνάρτηση με το φορτίο, οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν σε buffer sizes των 5 (μπλε), 15 (πράσινο) και 25 (κόκκινο) πακέτων, με 4 κανάλια, 20 servers και $P_{tx} = 100\%$. Ενώ σε χαμηλά φορτία (έως ~ 30 Gb/s) όλες οι καθυστερήσεις παραμένουν κάτω από το 1 μ s, από εκεί και έπειτα εμφανίζεται σταδιακή απόκλιση: η καμπύλη για buffer = 5 ξεκινά να ανεβαίνει ήδη από τα 40 Gb/s, φτάνοντας σχεδόν τα 7 μ s στο φορτίο των 100 Gb/s. Για buffer = 15, η ανύψωση αρχίζει κοντά στα 90 Gb/s και καταλήγει περίπου στα 4 μ s στο ίδιο επίπεδο φορτίου, ενώ το πιο μεγάλο buffer των 25 πακέτων καταγράφει την ελάχιστη αύξηση καθυστέρησης, με τιμές κάτω των 3 μ s μέχρι τα 100 Gb/s. Αυτό το σχήμα υποδεικνύει με σαφήνεια ότι η επαρκής χωρητικότητα της ουράς αναβάλλει την εκδήλωση σημαντικών καθυστερήσεων, επιτρέποντας στα πακέτα να παραμένουν προσωρινά αποθηκευμένα μέχρι να υπάρχει διαθέσιμο κανάλι, ενώ μικρά buffers «γεμίζουν» νωρίτερα και αναγκάζουν σε ταχύτερη απόρριψη ή καθυστέρηση, οδηγώντας σε πιο απότομη κλιμάκωση του συνολικού delay καθώς το σύστημα πλησιάζει στο φυσικό όριο μετάδοσης.



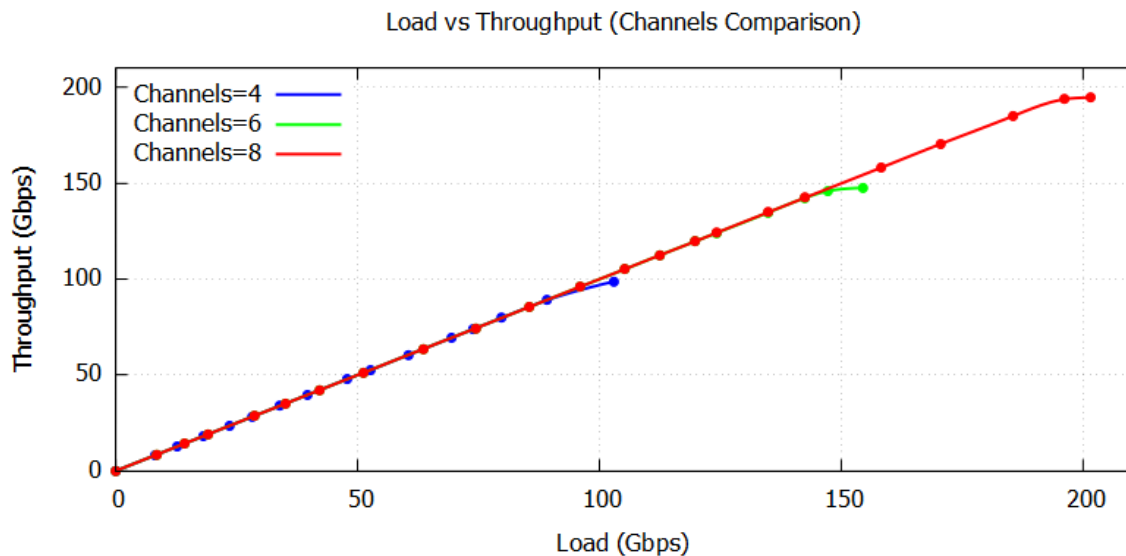
Εικόνα 13 - Load vs Queuing Delay για $S=20$, $W=4$, $B=15, 20, 25$, $P=100\%$

Στο διάγραμμα της καθυστέρησης ουράς (queuing delay) σε συνάρτηση με το προσφερόμενο φορτίο, οι τρεις καμπύλες για buffer sizes $B = 5$, $B = 15$ και $B = 25$ πακέτων (μπλε, πράσινο, κόκκινο) δείχνουν ότι έως περίπου 80 Gb/s η μέση αναμονή ενός πακέτου στην ουρά—δηλαδή ο χρόνος από τη στιγμή που φτάνει στο buffer μέχρι να ξεκινήσει η εκπομπή του—παραμένει πρακτικά μηδενική. Καθώς όμως το φορτίο προσεγγίζει τα όρια της φυσικής χωρητικότητας (100 Gb/s), η ουρική καθυστέρηση αυξάνεται απότομα: για $B = 5$ η κλίση της μπλε καμπύλης επιταχύνεται μετά τα 90 Gb/s, φτάνοντας πάνω από 3 μs στο όριο, ενώ για $B = 15$ η εκθετική άνοδος αρχίζει λίγο πιο δεξιά και κορυφώνεται γύρω στα 1.7 μs . Ο μεγαλύτερος buffer ($B = 25$) μετατοπίζει την εμφάνιση σημαντικής ουρικής αναμονής ακόμη πιο κοντά στο όριο κορεσμού, με τιμές που δεν υπερβαίνουν τα 1.2 μs .

Αυτές οι παρατηρήσεις τονίζουν ότι το queuing delay—ο χρόνος που ένα πακέτο παραμένει στον buffer πριν μεταδοθεί—εξαρτάται ευθέως από τη διαθέσιμη χωρητικότητα της ουράς: μικρές ουρές «γεμίζουν» νωρίτερα, προκαλώντας πρώιμη αλλά απότομη αύξηση της αναμονής, ενώ οι μεγαλύτερες ουρές απαλύνουν την κλιμάκωση, επιτρέποντας στο σύστημα να διαχειριστεί αιχμές φόρτου χωρίς σημαντική ουρική καθυστέρηση μέχρι την υπέρβαση της συνολικής ζεύξης.

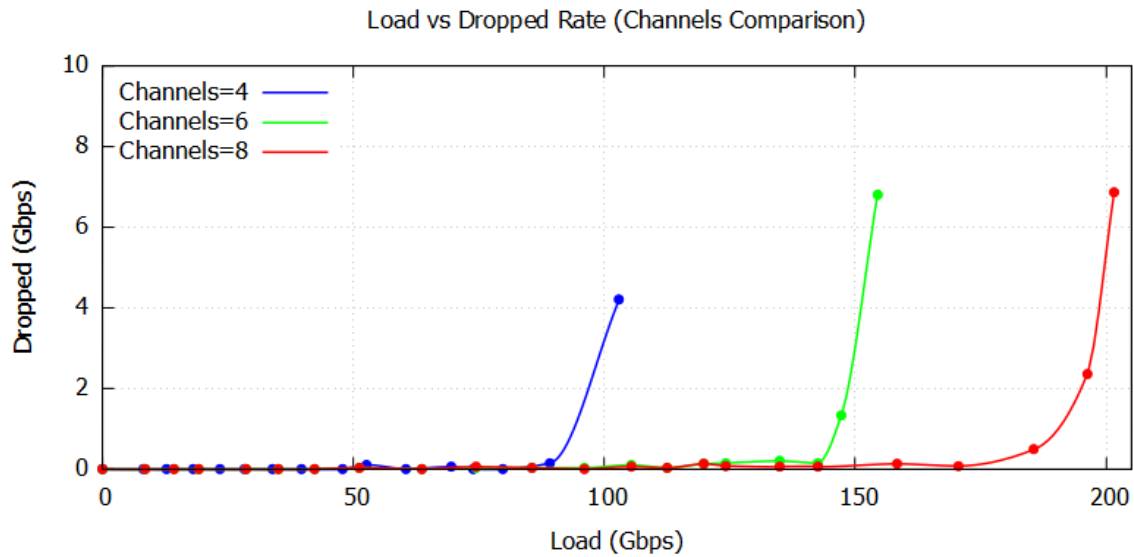
5.2.2 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Καναλιών

Στη δεύτερη πειραματική περίπτωση εξετάσαμε πώς η διεύρυνση ή συρρίκνωση του συνολικού bandwidth του WDMA συστήματος—διατηρώντας σταθερές τις τιμές $\text{buffer size} = 15$, $\text{servers} = 20$ και $P_{tx} = 100\%$ —επηρεάζει τις μετρικές απόδοσης. Για τον λόγο αυτό τρέξαμε προσομοιώσεις με $W=4, 6$ και 8 οπτικά κανάλια, καθένα των 25 Gb/s (συνολική χωρητικότητα $100, 150$ και 200 Gb/s αντίστοιχα), εκτελώντας τρεις ανεξάρτητες επαναλήψεις για κάθε ρύθμιση.



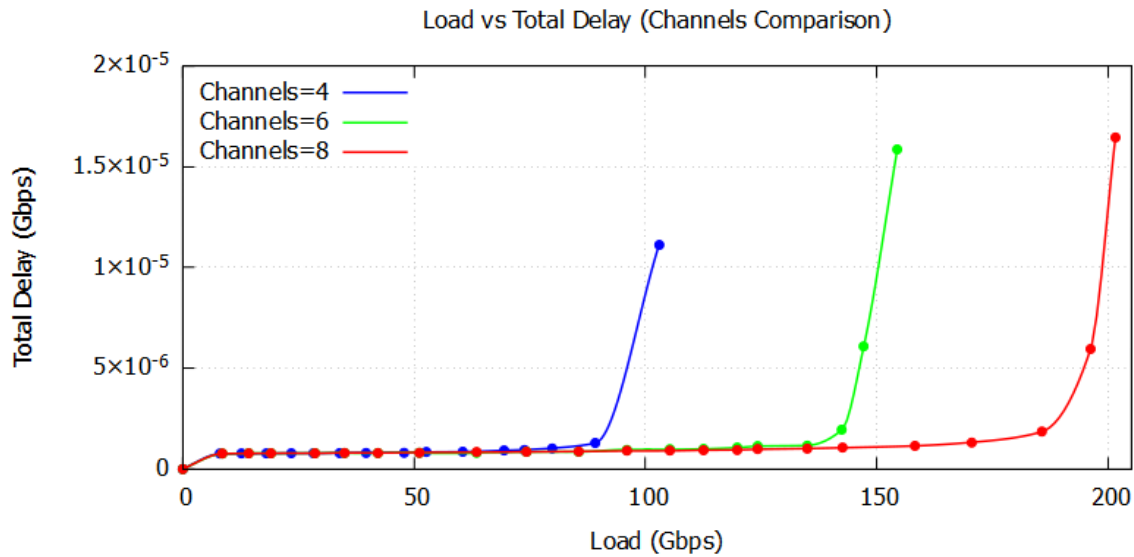
Εικόνα 14 - Load vs Throughput για $S=20$, $W=4, 6, 8$, $B=15$, $P=100\%$

Αρχικά, στο διάγραμμα Load vs Throughput διακρίνεται ξεκάθαρα ότι ο ρυθμός επιτυχούς μετάδοσης κλιμακώνεται σχεδόν γραμμικά με το offered load μέχρι το όριο της φυσικής χωρητικότητας. Όταν $W=4$, ο κορεσμός επιτυγχάνεται περίπου στα 100 Gb/s , ενώ με $W=6$ η γραμμή του throughput «ανεβαίνει» έως τα 150 Gb/s , και με $W=8$ έως τα 200 Gb/s , επιβεβαιώνοντας ότι η προσθήκη καναλιών μετατοπίζει ανάλογα το σημείο plateau χωρίς να δημιουργεί αξιοσημείωτες απώλειες γραμμικότητας ή σημαντικό jitter στα error bars.



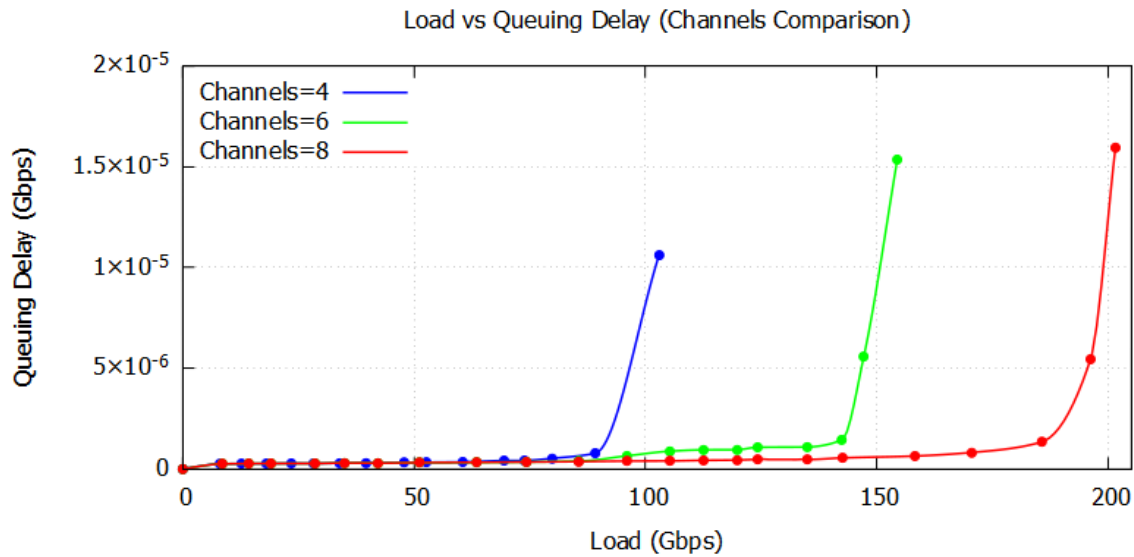
Εικόνα 15 - Load vs Dropped Rate για $S=20$, $W=4, 6, 8$, $B=15$, $P=100\%$

Στο διάγραμμα “Load vs Dropped Rate (Channels Comparison)” φαίνεται με σαφήνεια πώς η αύξηση του αριθμού των καναλιών μεταθέτει το όριο εκκίνησης των απωλειών και επηρεάζει το μέγιστο throughput overflow. Συγκεκριμένα, όταν διαθέτουμε τέσσερα κανάλια (μπλε καμπύλη), οι πρώτες απώλειες εμφανίζονται περίπου στα 100 Gb/s, φτάνοντας στη συνέχεια τα ~4.2 Gb/s. Με την προσθήκη δύο επιπλέον καναλιών (σύνολο έξι, πράσινη καμπύλη), το σύστημα απορροφά προσφερόμενο φορτίο έως τα ~150 Gb/s πριν αρχίσουν οι απορρίψεις, και η μέγιστη απώλεια ανέρχεται σε ~7 Gb/s. Τέλος, με οκτώ κανάλια (κόκκινη καμπύλη), οι απώλειες παραμένουν αμελητέες ως τα ~200 Gb/s, ενώ η κορυφαία τιμή drop rate ξεπερνά τα 6 Gb/s μόνο αφού ξεπεραστεί το όριο κορεσμού. Αυτή η μετατόπιση και η αύξηση της «οροφής» των απωλειών επιβεβαιώνει ότι η συνολική χωρητικότητα των καναλιών καθορίζει τόσο το χρονικό σημείο εμφάνισης overflow όσο και την ένταση των απωλειών όταν το προσφερόμενο φορτίο υπερβεί την παραπάνω χωρητικότητα.



Εικόνα 16 - Load vs Total Delay για $S=20$, $W=4, 6, 8$, $B=15$, $P=100\%$

Στο διάγραμμα «Load vs Total Delay (Channels Comparison)» παρατηρούμε την επίδραση του αριθμού των καναλιών (4, 6, 8) στη συνολική καθυστέρηση ενός πακέτου από τη γέννησή του ως την ολοκλήρωση της μετάδοσής του. Όταν διαθέτουμε τέσσερα κανάλια (μπλε), η καθυστέρηση παραμένει ελάχιστη έως τα ~80 Gb/s, αλλά ξεκινά να αυξάνεται ραγδαία πλησιάζοντας τα 100 Gb/s και φθάνει πάνω από 1.1×10^{-5} s (11 μ s) στο όριο κορεσμού. Με έξι κανάλια (πράσινο), η εκθετική άνοδος της συνολικής καθυστέρησης μετατίθεται προς τα ~140 Gb/s και κορυφώνεται σε περίπου 1.6×10^{-5} s, ενώ με οκτώ κανάλια (κόκκινο) η significant αύξηση παραμένει υπό τα 2×10^{-5} s ακόμα και σε φορτία πάνω από 200 Gb/s. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει ότι η διεύρυνση του διαθέσιμου bandwidth μεταθέτει τα σημεία «καμψής» της καθυστέρησης σε υψηλότερα επίπεδα φορτίου και περιορίζει το μέγιστο delay, επιτρέποντας στα πακέτα να ολοκληρώσουν τη μετάδοση με μικρότερη αναμονή για διαθέσιμο κανάλι. Με άλλα λόγια, περισσότερα κανάλια μειώνουν την παραμονή σε ουρές και την όποια επιπλέον εγγενή καθυστέρηση, διατηρώντας την απόδοση του MAC-πρωτοκόλλου σταθερή ακόμη και υπό αυξημένη πίεση φόρτου.

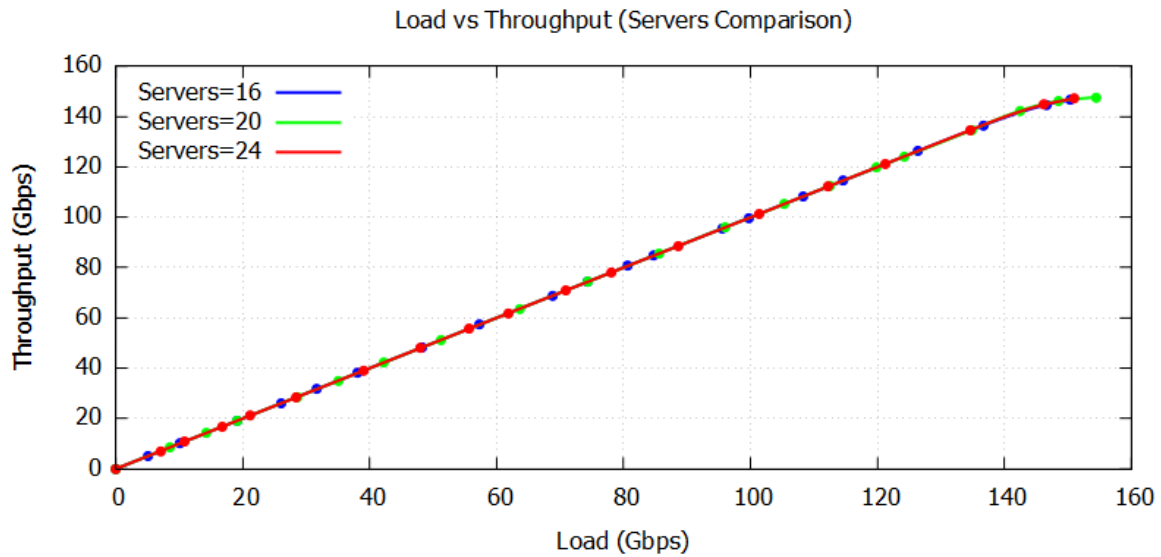


Εικόνα 17 - Load vs Queuing Delay για $S=20$, $W=4, 6, 8$, $B=15$, $P=100\%$

Παρατηρείται ότι σε χαμηλά και μεσαία φορτία (έως ~ 80 Gb/s για 4 κανάλια, ~ 120 Gb/s για 6 κανάλια και ~ 180 Gb/s για 8 κανάλια) η καθυστέρηση ουράς διατηρείται υπο-μικροδευτερόλεπτη, υποδηλώνοντας ότι οι διαθεσιμότητες καναλιών επαρκούν για την άμεση εξυπηρέτηση των πακέτων χωρίς σημαντική αναμονή. Με την υπέρβαση αυτού του σημείου κορεσμού, ωστόσο, η μπλε καμπύλη (4 κανάλια) επιταχύνει κατακόρυφα μετά τα 90 Gb/s, ξεπερνώντας τα 1×10^{-5} s (10 μ s) στο όριο των 100 Gb/s. Η πράσινη καμπύλη (6 κανάλια) μετατοπίζει αυτή την επιτάχυνση προς τα ~ 150 Gb/s, με μέγιστο queuing delay περίπου 1.5×10^{-5} s. Τελικά, η κόκκινη καμπύλη (8 κανάλια) κινείται ουσιαστικά σε επίπεδα κάτω του 5×10^{-6} s μέχρι τα 180–200 Gb/s και ανεβαίνει οριακά πάνω από 1.6×10^{-5} s μόνο στην υπέρβαση του nominal bandwidth. Αυτό δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των καναλιών επιτρέπει στο σύστημα να αναβάλλει δραστικά το σημείο εκδήλωσης σημαντικής ουρικής καθυστέρησης και να διατηρεί εξαιρετικά χαμηλά latencies ακόμα υπό αυξημένο φορτίο, καθιστώντας τα WDMA κανάλια ζωτικό παράγοντα για την επίτευξη τόσο υψηλού throughput όσο και ελεγχόμενης αναμονής πακέτων.

5.2.3 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Servers

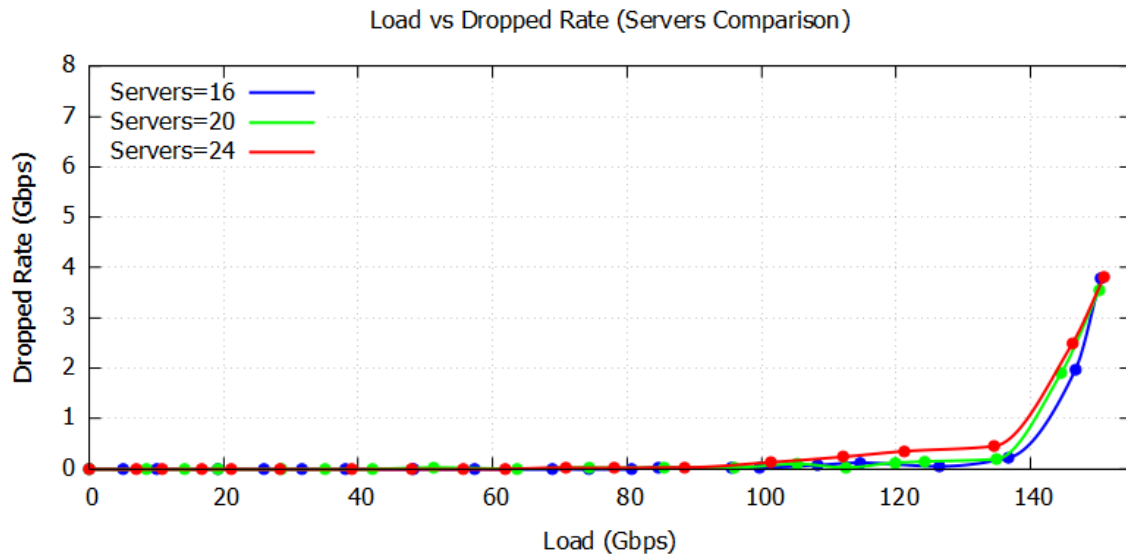
Στη μεταβολή του αριθμού των servers ($M = 16, 20, 24$), διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους buffer size = 15, κανάλια = 6 (συνολική χωρητικότητα = 6×25 Gb/s = 150 Gb/s) και $P_{tx} = 100\%$, αποκαλύπτεται η επίδραση της κλιμάκωσης των πηγών κυκλοφορίας στην απόδοση του πρωτοκόλλου.



Εικόνα 18 - Load vs Throughput για S=16, 20, 24, W=6, B=15, P=100%

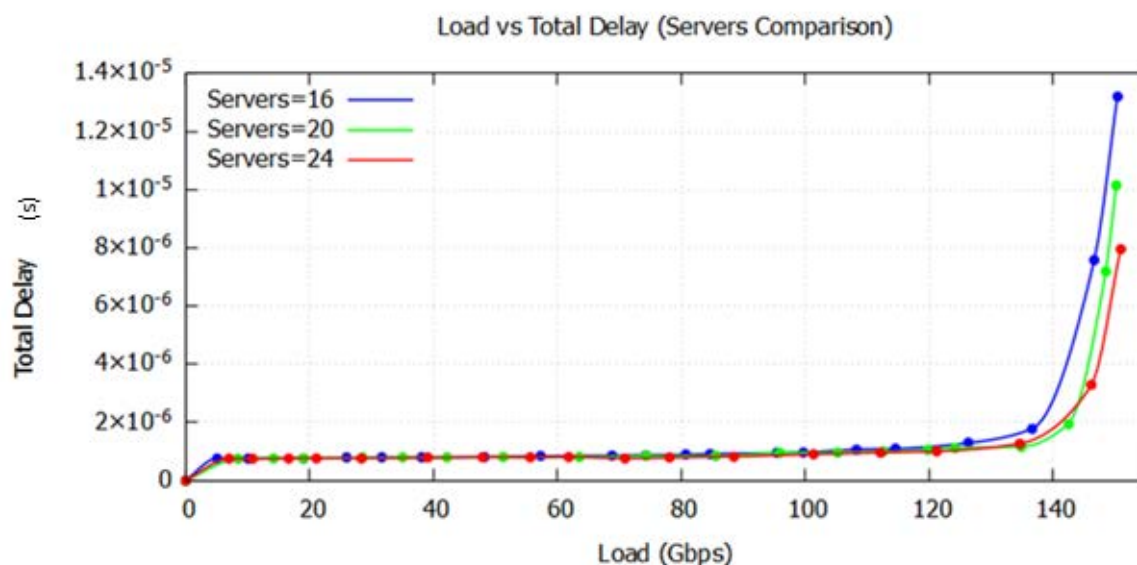
Στο διάγραμμα “Load vs Throughput (Servers Comparison)” φαίνεται καθαρά ότι ανεξάρτητα από τον αριθμό των κόμβων (16, 20 ή 24 servers, με 6 κανάλια συνολικής χωρητικότητας 150 Gbps και $P_{tx} = 100\%$), ο ρυθμός επιτυχούς μετάδοσης αυξάνεται γραμμικά με το προσφερόμενο φορτίο μέχρι το σημείο κορεσμού στα 150 Gbps. Οι τρεις καμπύλες (μπλε για 16, πράσινη για 20, κόκκινη για 24 servers) συμπίπτουν σχεδόν πλήρως, δείχνοντας ότι το throughput περιορίζεται αποκλειστικά από τη διαθέσιμη χωρητικότητα των καναλιών και όχι από τον αριθμό των πηγών. Η γραμμικότητα όμως διατηρείται αψεγάδιαστα μέχρι το όριο των 150 Gbps, όπου όλες οι καμπύλες επιπεδώνουν. Το αποτέλεσμα υπογραμμίζει ότι, σε αυτό το σενάριο, η αύξηση των servers δεν επηρεάζει το μέγιστο throughput, το οποίο καθορίζεται από τη συνολική ζεύξη των WDM καναλιών. Αυτό συμβαίνει διότι στο κώδικα δεν μειώνεται το per server load όταν αυξάνονται οι servers - αντίθετα αυξάνεται το συνολικό offered load επειδή πολλαπλασιάζω τον ίδιο ρυθμό επι περισσότερα αρχεία.

Στον κώδικα γέννησης πακέτων σε κάθε αρχείο γράφονται πακέτα με ίδια κατανομή, οπότε σε κάθε κόμβο (server) ο ρυθμός παραμένει σταθερός, ανεξαρτήτως του πόσοι κόμβοι συνολικά είναι.



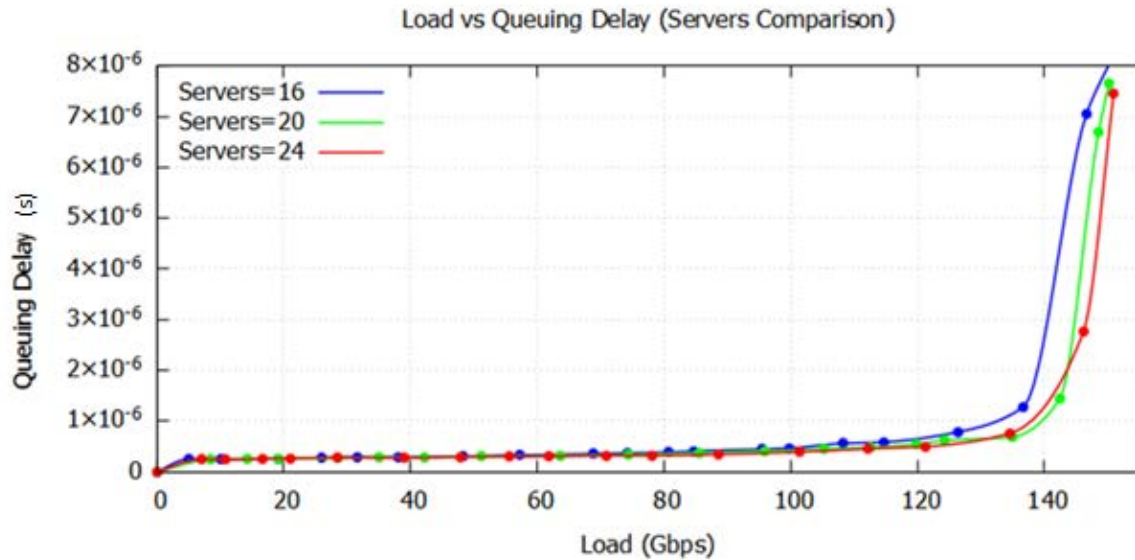
Εικόνα 19 - Load vs Dropped Rate για S=16, 20, 24, W=6, B=15, P=100%

Στο διάγραμμα «Load vs Dropped Rate (Servers Comparison)» φαίνεται ότι, όσο το προσφερόμενο φορτίο πλησιάζει τα 150 Gb/s της συνολικής χωρητικότητας των έξι καναλιών (6×25 Gb/s), ο ρυθμός απωλειών παραμένει σχεδόν μηδενικός για όλα τα σενάρια (16, 20 ή 24 servers), αλλά μόλις ξεπεράσει αυτό το όριο αρχίζει απότομη εκθετική αύξηση. Η εμφάνιση του overflow σε περίπου 140–150 Gb/s οφείλεται στο ότι ο ρυθμός αφίξεων—όπου κάθε server παράγει Poisson ροή με $P_{tx} = 100\%$ —υπερβαίνει τη μέγιστη υπηρεσιακή ικανότητα του WDM link. Όταν αυξάνουμε τους servers από 16 σε 20 και 24, αυξάνεται αναλογικά και το συνολικό offered load, με συνέπεια η ουρά των 15 θέσεων να πληρώνει νωρίτερα: για 24 servers η πρώτη απόρριψη παρατηρείται ήδη κοντά στα 138 Gb/s, ενώ για 16 servers μόνον στα 142 Gb/s. Επιπλέον, η ένταση των απωλειών είναι υψηλότερη σε σενάρια με περισσότερους servers, καθώς η διαφορά μεταξύ arrival rate και service rate, όταν το σύστημα υπερφορτώνεται, αποδίδει μεγαλύτερη απόλυτη ροή πακέτων που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή drop rate για 24 servers αγγίζει τα 4 Gb/s, ενώ για 16 servers μένει κοντά στα 3.5 Gb/s. Αυτή η συμπεριφορά επιβεβαιώνει ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πηγών κυκλοφορίας, η πρόωρη πλήρωση του buffer και το ταχύτερο overflow οδηγούν σε υψηλότερους ρυθμούς απωλειών πριν από τον πλήρη κορεσμό των καναλιών.



Εικόνα 20 - Load vs Total Delay για S=16, 20, 24, W=6, B=15, P=100%

Η συνολική καθυστέρηση ενός πακέτου (queuing + transmission + propagation) παραμένει πρακτικά μηδενική για όλα τα σενάρια ($M = 16, 20, 24$ servers) μέχρι περίπου τα 130–140 Gb/s. Καθώς όμως το συνολικό offered load προσεγγίζει την υπηρεσιακή ικανότητα των καναλιών, οι μπλε (16 servers), πράσινη (20 servers) και κόκκινη (24 servers) καμπύλες αρχίζουν να αποκλίνουν και να αυξάνονται εκθετικά. Συγκεκριμένα, για 16 servers η καμπή εκτυλίσσεται γύρω στα 140 Gb/s με μέγιστο delay $\sim 1.3 \times 10^{-5}$ s, για 20 servers η ανύψωση ξεκινά οριακά αργότερα αλλά φτάνει σε λίγα microseconds χαμηλότερα ($\sim 1.0 \times 10^{-5}$ s), ενώ με 24 servers το turnover γίνεται ελαφρώς νωρίτερα (~ 135 Gb/s) και κορυφώνεται περίπου στο 8×10^{-6} s. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση του πλήθους των servers αυξάνει το συνολικό offered load, φέρνοντας την ουρά πιο γρήγορα σε συνθήκη υπερφόρτωσης· εντός αυτού του οριακού διαστήματος, τα πακέτα παραμένουν περισσότερη ώρα στους buffers πριν εξυπηρετηθούν, αυξάνοντας αναλόγως το συνολικό delay.

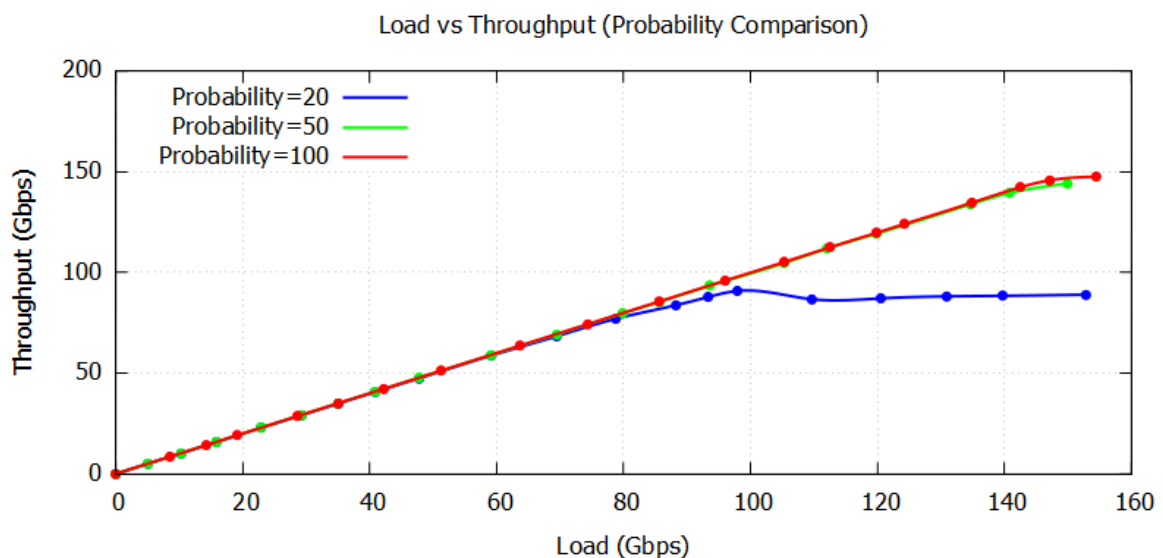


Εικόνα 21 - Load vs Queuing Delay για $S=16, 20, 24$, $W=6$, $B=15$, $P=100\%$

Από το παραπάνω και τελευταίο διάγραμμα για τη προκειμένη περίπτωση που μελετάται, αναδεικνύεται ο καθοριστικός ρόλος του πλήθους των κόμβων στη συσσώρευση ουρικής καθυστέρησης καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, με σταθερά $\text{buffer size} = 15$, $\text{κανάλια} = 6$ (150 Gb/s) και $P_{tx} = 100\%$. Παρατηρούμε ότι για φορτία έως περίπου 130 Gb/s η μέση αναμονή ενός πακέτου στην ουρά παραμένει αμελητέα (κάτω από $1 \mu\text{s}$) σε όλες τις τρεις περιπτώσεις ($M=16, 20, 24$). Ωστόσο, καθώς το offered load προσεγγίζει το όριο κορεσμού της ζεύξης, οι καμπύλες αποκλίνουν: με 16 servers (μπλε) η ουρική καθυστέρηση αρχίζει να αυξάνεται απότομα γύρω στα 135 Gb/s και κορυφώνεται στα $8 \times 10^{-6} \text{ s}$ · με 20 servers (πράσινο) η εκθετική κλιμάκωση εκδηλώνεται λίγο νωρίτερα (περίπου 132 Gb/s) και κορυφώνεται στα $7 \times 10^{-6} \text{ s}$ · ενώ με 24 servers (κόκκινο) η αύξηση ξεκινά ακόμη πιο πρόωρα ($\approx 130 \text{ Gb/s}$), αλλά η μέγιστη αναμονή παραμένει χαμηλότερη, κοντά στα $6 \times 10^{-6} \text{ s}$. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο ότι, με περισσότερες πηγές κυκλοφορίας, το σύνολο των αφίξεων ξεπερνά νωρίτερα την υπηρεσιακή ικανότητα των καναλιών, προκαλώντας ταχύτερη συσσώρευση στην ουρά· ωστόσο, η μεγαλύτερη κίνηση διατηρεί σταθερή τη γεωμετρία του buffer, περιορίζοντας έτσι την έκταση της μέγιστης ουρικής καθυστέρησης σε ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα. Με άλλα λόγια, η αύξηση του πλήθους servers μεταθέτει πρόωρα το «κατώφλι» εκδήλωσης σημαντικών ουρικών καθυστερήσεων, αλλά δεν οδηγεί σε μεγαλύτερα peak delays, καθώς η overflow συμπεριφορά του buffer παραμένει παρόμοια.

5.2.4 Μελέτη Κλιμάκωσης Αριθμού Πιθανότητας Εκπομπής

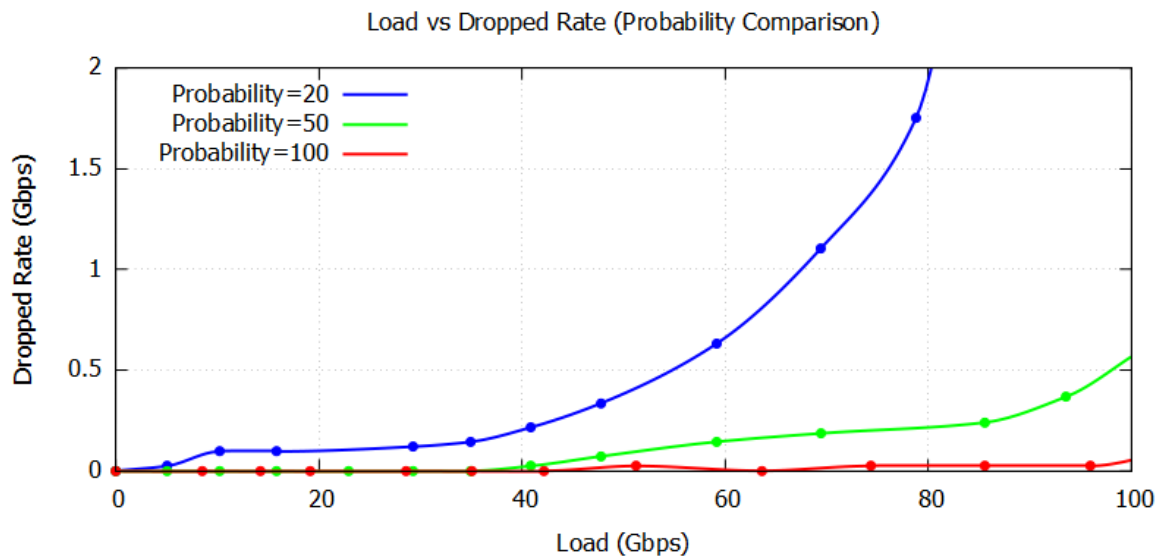
Στην τέταρτη πειραματική περίπτωση εστιάζεται η ανάλυση στην επίδραση της πιθανότητας μετάδοσης P_{tx} στην απόδοση του πρωτοκόλλου. Διατηρούνται αμετάβλητα το μέγεθος του buffer (15 πακέτα), ο αριθμός των καναλιών (6 οπτικά κανάλια, συνολικής χωρητικότητας 150 Gb/s) και ο αριθμός των servers (20 κόμβοι), ενώ μελετώνται οι τιμές $P_{tx} = 20\%$, $P_{tx} = 50\%$ και $P_{tx} = 100\%$. Κάθε μία από τις τρεις ρυθμίσεις εκτελέστηκε τρεις με διαφορετικό seed, ώστε να εξαχθούν στατιστικά έγκυρα συμπεράσματα για τις τυπικές αποκλίσεις των μετρικών. Η ενότητα αυτή θα αναλύσει τα αντίστοιχα διαγράμματα Load vs Throughput, Load vs Dropped Rate, Load vs Total Delay και Load vs Queuing Delay για την περίπτωση αυτή, ώστε να αποτυπωθεί με ακρίβεια ο τρόπος με τον οποίο η τιμή του P_{tx} ρυθμίζει την «επιθετικότητα» της μετάδοσης και επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τα κρίσιμα μεγέθη απόδοσης.



Εικόνα 22 - Load vs Throughput για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50% , 100%

Στο διάγραμμα “Load vs Throughput (Probability Comparison)” απεικονίζεται με σαφήνεια πώς η πιθανότητα μετάδοσης P_{tx} ελέγχει την εκμετάλλευση της συνολικής χωρητικότητας των καναλιών ($6 \times 25 \text{ Gb/s} = 150 \text{ Gb/s}$). Όταν $P_{tx} = 100\%$ (κόκκινη καμπύλη), ο όγκος της μετάδοσης ακολουθεί γραμμικά το προσφερόμενο φορτίο έως τα 150 Gb/s, όπου και επιτυγχάνεται πλήρης κορεσμός. Στην περίπτωση $P_{tx} = 50\%$ (πράσινη καμπύλη) η γραμμικότητα διατηρείται έως περίπου 140 Gb/s, ακολουθώντας με μικρή

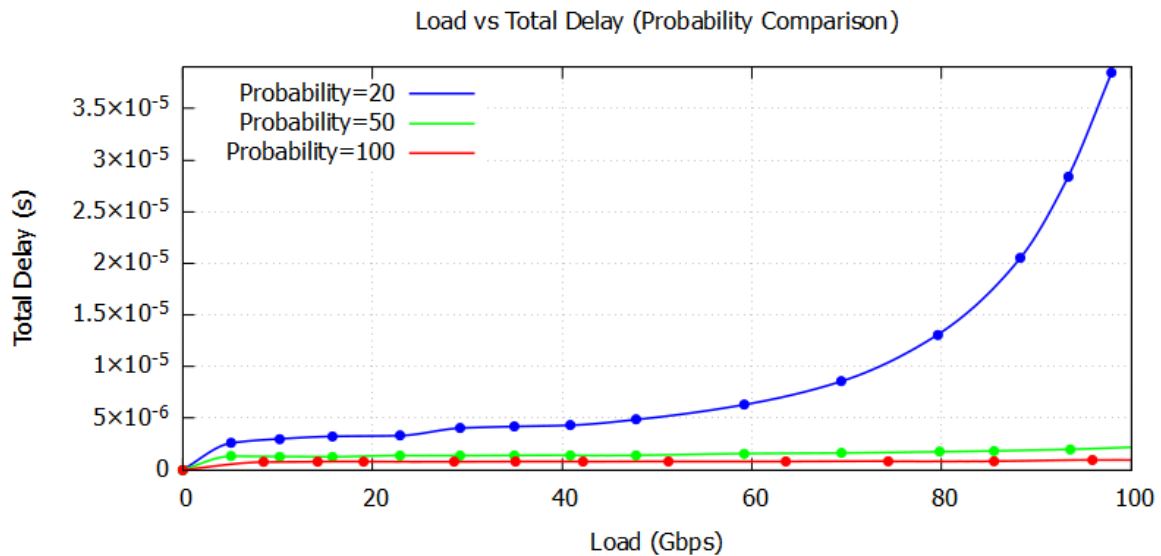
υστέρηση την κόκκινη, καθώς μόνο το ήμισυ των κόμβων επιχειρεί να εκπέμψει ανά slot. Αντίθετα, για $P_{tx} = 20\%$ (μπλε καμπύλη) η καμπύλη ξεφεύγει από το ιδεατό ευθύγραμμο μοτίβο στα ~90 Gb/s και πλέον επιτεδώνει κοντά στα 88 Gb/s, δηλώνοντας ότι η χαμηλή επιθετικότητα των κόμβων δεν επαρκεί για να γεμίσει τα κανάλια—ούτε καν έως το επίπεδο κορεσμού—με αποτέλεσμα η μέγιστη επιτυχημένη μετάδοση να περιορίζεται πολύ χαμηλότερα από το 150 Gb/s. Αυτή η συμπεριφορά καταδεικνύει ότι η παράμετρος P_{tx} δρα ως έλεγχος της “προσφοράς” πακέτων: ελαττωμένη πιθανότητα μετάδοσης οδηγεί σε underutilization του bandwidth, ενώ στο $P_{tx} = 100\%$ επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ροή έως τον φυσικό περιορισμό των καναλιών.



Εικόνα 23 - Load vs Dropped Rate για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50% , 100%

Με $P_{tx} = 20\%$ η υπηρεσιακή ικανότητα (service rate) του συστήματος είναι περιορισμένη – μόνο το 20 % των servers μπορεί να αδειάζει το buffer σε κάθε timeslot – ενώ το offered load προσαυξάνεται με βάση το external trace pattern. Έτσι γεννιέται ανεξέλεγκτη συσσώρευση πακέτων στον buffer (offered > service), που οδηγεί σε πρόωρο overflow και υψηλούς ρυθμούς απωλειών. Αντίθετα, αυξάνοντας το P_{tx} , ανεβαίνει ο ρυθμός εκκένωσης του buffer, με αποτέλεσμα το overflow να καθυστερεί και οι απώλειες να ελαχιστοποιούνται έως το σημείο κορεσμού των καναλιών. Αυτή η συμπεριφορά υπογραμμίζει τον κρίσιμο ρόλο του P_{tx} ως ρυθμιστικού παράγοντα της ισορροπίας μεταξύ offered load και service rate: πολύ μικρό P_{tx} δημιουργεί bottleneck στην εκκένωση της

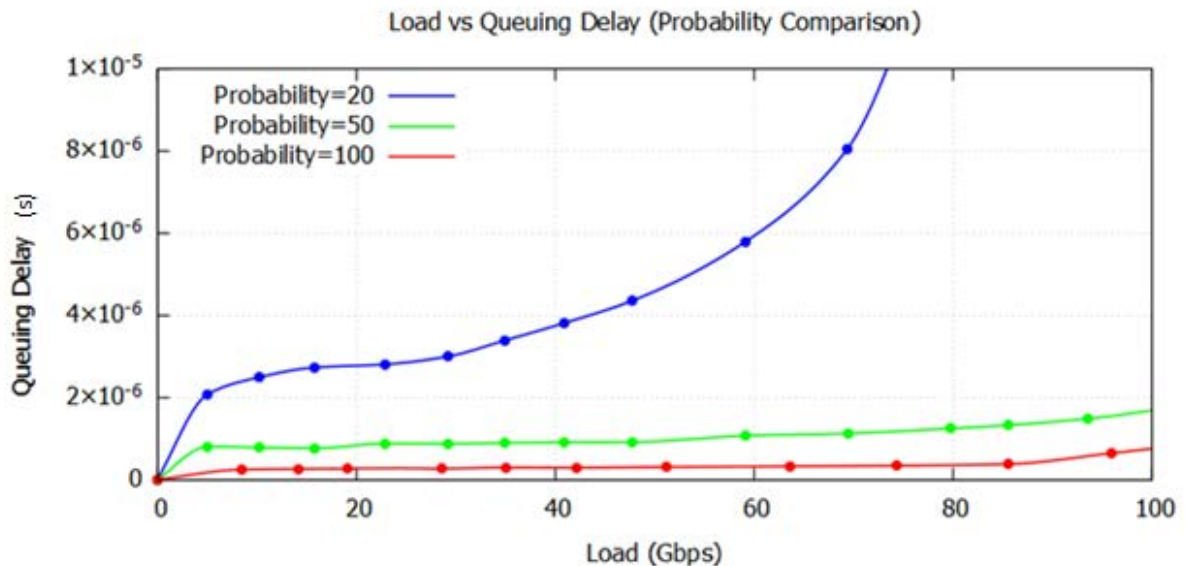
ουράς και τελικά αυξημένο drop rate, ενώ P_{tx} κοντά στο 100 % επιτρέπει πλήρη αξιοποίηση του bandwidth χωρίς overflow.



Εικόνα 24 - Load vs Total Delay για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50% , 100%

Στο διάγραμμα «Load vs Total Delay (Probability Comparison)» καταγράφεται η επίδραση της πιθανότητας μετάδοσης P_{tx} στον συνολικό χρόνο καθυστέρησης ενός πακέτου, δηλαδή από τη στιγμή που «γεννιέται» μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοσή του. Για $P_{tx} = 20\%$ (μπλε καμπύλη), όπου μόνο το ένα πέμπτο των servers προσπαθεί να μεταδώσει σε κάθε timeslot, παρατηρείται έντονη συσσώρευση ουρικής και μετάδοσης καθυστέρησης ήδη από χαμηλά φορτία (~40 Gb/s). Καθώς το offered load αυξάνεται, η ουρά δεν εκκενώνεται ικανοποιητικά και η μέση καθυστέρηση κλιμακώνεται εκθετικά, φτάνοντας πάνω από 3.5×10^{-5} s για φορτία κοντά στα 100 Gb/s. Με $P_{tx} = 50\%$ (πράσινη γραμμή) η ροή εκκαθάρισης του buffer είναι διπλάσια, γεγονός που μεταθέτει σημαντικά προς τα δεξιά το σημείο εκθετικής αύξησης της συνολικής καθυστέρησης—η άνοδος δεν γίνεται αισθητή πριν τα 70–80 Gb/s και κορυφώνεται σε επίπεδα κάτω των 6×10^{-6} s. Τέλος, για $P_{tx} = 100\%$ (κόκκινο), όπου όλοι οι servers επιχειρούν μετάδοση σε κάθε slot, η συνολική καθυστέρηση παραμένει σε υπο-μικροδευτερόλεπτα σχεδόν σε όλο το φάσμα φορτίου, αυξανόμενη οριακά μόνο όταν αυτό πλησιάζει τα 100 Gb/s, και περιορίζεται σε τιμές κάτω των 2×10^{-6} s. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η πιθανότητα μετάδοσης δρα ως ρυθμιστικός παράγοντας του service rate. Όταν P_{tx} είναι μικρό, η

εκκένωση της ουράς γίνεται σπάνια, οι πακέτες «στεγνώνουν» στο buffer και το συνολικό delay αυξάνει δραματικά. Αντίθετα, για υψηλή πιθανότητα μετάδοσης, ο ρυθμός εκκαθάρισης καλύπτει επαρκώς το offered load, αποφεύγοντας τη συσσώρευση ουρικής καθυστέρησης και διατηρώντας το συνολικό delay σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα 25 - Load vs Queuing Delay για $S=10$, $W=6$, $B=15$, $P=20\%$, 50% , 100%

Στο διάγραμμα «Load vs Queuing Delay (Probability Comparison)» απεικονίζεται ο μέσος χρόνος αναμονής ενός πακέτου στην ουρά (queuing delay) για τις τρεις τιμές της πιθανότητας μετάδοσης P_{tx} (20 %, 50 %, 100 %), με buffer = 15, 6 κανάλια και 20 servers. Για $P_{tx} = 20\%$ (μπλε καμπύλη), ο ρυθμός εκκαθάρισης της ουράς είναι σχετικά χαμηλός, με αποτέλεσμα η μέση ουρική καθυστέρηση να ανεβαίνει γρήγορα ήδη από φορτία της τάξης των 20–30 Gb/s. Καθώς το προσφερόμενο φορτίο φτάνει τα 100 Gb/s, η ουρική αναμονή αυξάνεται εκθετικά, ξεπερνώντας τα 10 μ s, διότι η ουρά δεν προλαβαίνει να αδειάσει αρκετά μεταξύ των slots. Στην περίπτωση $P_{tx} = 50\%$ (πράσινο), η γραμμική αύξηση της καθυστέρησης ξεκινά πιο αργά—περίπου στα 40 Gb/s—και κορυφώνεται γύρω στα 2 μ s στο όριο των 100 Gb/s. Αυτό σημαίνει ότι η διπλάσια πιθανότητα μετάδοσης επιτρέπει στην ουρά να διαχειριστεί καλύτερα τις αιχμές φορτίου, περιορίζοντας την αναμονή ανά packet. Όταν $P_{tx} = 100\%$ (κόκκινο), η εκκαθάριση είναι συνεχής, με αποτέλεσμα το queuing delay να παραμένει ελάχιστο ($< 1 \mu$ s) σχεδόν σε

ολόκληρο το φάσμα φορτίου και να επιταχύνεται οριακά μόνο κοντά στα 100 Gb/s. Συμπερασματικά, όσο υψηλότερη είναι η πιθανότητα μετάδοσης, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η εκκαθάριση του buffer, με συνέπεια την κατακόρυφη μείωση της ουρικής καθυστέρησης και την αναβολή της εκθετικής αύξησής της σε υψηλότερα επίπεδα προσφερόμενου φορτίου.

5.3 Πορίσματα

Από την εξέταση των γραφικών παραστάσεων Load vs Throughput, Load vs Dropped Rate, Load vs Total Delay και Load vs Queuing Delay για τις τέσσερις πειραματικές περιπτώσεις, αναδεικνύονται τα εξής βασικά συμπεράσματα σχετικά με το ιδανικό σενάριο λειτουργίας του εξεταζόμενου WDM Broadcast & Select edge δικτύου:

Καταρχάς, η συνολική χωρητικότητα των οπτικών καναλιών ($W \times 25$ Gb/s) εμφανίζεται ως το οριακό σημείο κορεσμού, πέρα από το οποίο το throughput επίπεδωνει και οι απώλειες εκτοξεύονται. Συνεπώς, ο βέλτιστος σχεδιασμός απαιτεί επαρκή αριθμό καναλιών ώστε το όριο αυτό να βρίσκεται αρκετά υψηλά σε σχέση με το αναμενόμενο offered load. Στο υπό μελέτη σύστημα, έξι κανάλια (150 Gb/s) προσφέρουν ικανοποιητικό περιθώριο σε περιβάλλον με 20–24 servers, ενώ η προσθήκη οκτώ καναλιών μετατοπίζει περαιτέρω το όριο χωρίς ουσιώδη αύξηση πολυπλοκότητας.

Η ρύθμιση του buffer size συνεπάγεται αναπόφευκτο trade-off: μικρά buffers (π.χ. 5 πακέτα) οδηγούν σε πρόωπη εμφάνιση overflow, υψηλό drop rate και απότομη αύξηση καθυστερήσεων, ενώ μεγάλα buffers (π.χ. 25 πακέτα) καθυστερούν σημαντικά τα overflow events και διατηρούν χαμηλά τις απώλειες σε υψηλά offered loads, αλλά με κόστος αυξημένου queuing delay. Μια ενδιάμεση τιμή (περίπου 15 πακέτα) προσφέρει ισορροπία, περιορίζοντας τις απώλειες κάτω από 1 Gb/s έως το όριο κορεσμού και κρατώντας τη μέση καθυστέρηση σε μερικά μικροδευτερόλεπτα.

Ο αριθμός των servers καθορίζει το επίπεδο offered load: σε όλα τα πειράματα, ο ρυθμός επιτυχούς μετάδοσης ήταν ανεξάρτητος από τον αριθμό των πηγών μέχρι τον κορεσμό, αλλά υψηλότερο πλήθος servers επέσπευδε ελαφρώς το overflow και αύξανε το peak drop rate, χωρίς όμως να αυξάνει υπέρμετρα τις καθυστερήσεις. Γι' αυτό,

οπωσδήποτε συνιστάται ο σχεδιασμός με servers αρκετούς ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις εφαρμογής, αλλά όχι υπερβολικά πολλούς ώστε να προκαλούνται πρόωρα bottlenecks στον buffer.

Τέλος, η πιθανότητα μετάδοσης P_{tx} ελέγχει την ισορροπία ανάμεσα σε offered load και service rate. Χαμηλές τιμές (20%) οδηγούν σε under-utilization των καναλιών και ταυτόχρονα σε ανεξέλεγκτη συσσώρευση στον buffer, με πρόωρο overflow και υψηλές καθυστερήσεις. Υψίστη τιμή (100%) εξασφαλίζει πλήρη αξιοποίηση της χωρητικότητας, ελάχιστες απώλειες και υπο-μικροδευτερόλεπτα delays έως τον κορεσμό. Ενδιάμεσες τιμές (50%) επιτυγχάνουν καλό compromise, μειώνοντας τα delays και το drop rate σε μεσαία φορτία, χωρίς όμως να επεκτείνουν το όριο του throughput.

Συμπερασματικά, το ιδανικό σενάριο λειτουργίας για το εξεταζόμενο WDM edge δίκτυο προκύπτει σε συνδυασμό:

- Buffer size περίπου 15 πακέτα, ώστε να αποφεύγεται το overflow χωρίς σημαντικό queuing delay,
- Αριθμός καναλιών τουλάχιστον 6 (προτιμότερο 8 εφόσον το κόστος το επιτρέπει) για μετατόπιση του ορίου κορεσμού σε υψηλότερα offered loads,
- Servers κατά βέλτιστο τρόπο (π.χ. 20 κόμβοι) ώστε το offered load να αντιστοιχεί στη συνολική ζεύξη χωρίς υπερβολικές απώλειες,
- Πιθανότητα μετάδοσης $P_{tx} = 100\%$ για πλήρη εκμετάλλευση της υπηρεσιακής ικανότητας, ή $P_{tx} = 50\%$ όταν επιδιώκεται μείωση των ουρικών καθυστερήσεων σε μεσαία φορτία.

Με αυτές τις ρυθμίσεις, το σύστημα πετυχαίνει μέγιστο throughput, οριακές απώλειες και ελάχιστες καθυστερήσεις, πλησιάζοντας –στο μέτρο των φυσικών ορίων– σε ιδανική λειτουργία.

Βιβλιογραφία

- [1] B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*, Springer, 2006.
- [2] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 3rd ed., Morgan Kaufmann, 2010.
- [3] A. Farrel, *GMPLS: Architecture and Applications*, Morgan Kaufmann, 2005.
- [4] P. Goransson, C. Black, and T. Culver, *Software Defined Networks: A Comprehensive Approach*, 2016: Morgan Kaufmann.
- [5] N. McKeown et al., *OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks*, vol. 38, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, p. 69–74.
- [6] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks, vol. 29, *J. Lightwave Technol.*, 2011, pp. 1354-1366.
- [7] I. Kaminow, T. Li, and A. Willner, *Optical Fiber Telecommunications V B*, Academic Press, 2008.
- [8] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial, vol. 17, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, pp. 1776-1800.
- [9] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2021.
- [10] A. Dixit, B. Raghavan, Security analysis of optical transmission, vol. 19, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, pp. 1147-1170.
- [11] D. Kreutz et al., Software-defined networking: A comprehensive survey, vol. 103, *Proc. IEEE*, 2015, pp. 14-76.
- [12] H. Kim and N. Feamster, Improving network management with software defined networking, vol. 51, *IEEE Communications Magazine*, 2013, pp. 114-119.
- [13] A. Lara, A. Kolasani, and B. Ramamurthy, Network innovation using OpenFlow: A survey, vol. 16, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, pp. 493-512.

- [14] R. Nejabati, M. Channegowda, S. Peng, and D. Simeonidou, Programmable optical networks, vol. 4, IET Networks, 2015.
- [15] ONF, OpenFlow-Optical Extensions, [Online]. Available: <https://opennetworking.org>.
- [16] M. Jinno et al., Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies, vol. 47, IEEE Communications Magazine, 2009.
- [17] A. Patel, K. Sivalingam, Routing and spectrum assignment in flexgrid optical networks: Models and algorithms, vol. 13, Optical Switching and Networking, 2014.
- [18] A. Aguado et al., Dynamic virtual network reconfiguration over SDN orchestrated multi-technology optical transport domains, vol. 34, J. Lightwave Technol., 2016.
- [19] A. Rahman, X. Cao, and M. Tornatore, Network slicing in 5G transport networks: A SDON perspective, vol. 37, Optical Switching and Networking, 2020.
- [20] R. Nejabati et al., Software defined optical networks (SDONs): A new paradigm for flexible network infrastructure, vol. 51, IEEE Communications Magazine, 2013.
- [21] M. Jinno et al., Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies, IEEE Communications Magazine, 2009.
- [22] S. Zhang, K. Meng, and B. Mukherjee, Energy-efficient optical networks: A review, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016.
- [23] A. Manzalini et al., Software-defined networks for future networks and services: main technical challenges and business implications, IEEE Communications Magazine, 2013.
- [24] C. Li et al., OpenFlow-based control and management for optical networks, IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 5, no. 10, pp. A274–A282, 2013.
- [25] D. King and A. Farrel, A PCE-based architecture for application-based network operations, IETF RFC 7491, 2015.
- [26] R. Mijumbi, J. Serrat, J.-L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. BoutabaS. Salsano et al., Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016.

- [27] D. Bohnert, Optical networking standards and SDN, in Proc. OFC, 2016.
- [28] M. Channegowda et al., Experimental demonstration of an OpenFlow-based software-defined optical network, OFC/NFOEC, 2013.
- [29] J. Perelló et al., Flexi-grid optical networks: challenges and opportunities, IEEE Commun. Mag., 2014.
- [30] M. Sezer et al., Are we ready for SDN security?, IEEE Commun. Mag., 2013.
- [31] C. DeCusatis (ed.), Optical Fiber Telecommunications Volume VIA, Academic Press, 2013.
- [32] ITU-T G.694.2, Spectral grids for CWDM systems, 2012.
- [33] S. Talebi et al., Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey,, Optical Switching and Networking, vol. 13, pp. 34–48, 2014.
- [34] Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D. , On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Architecture & Orchestration, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(3), 1657–1681, 2017.
- [35] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, Wiley, 2010.
- [36] H. Zhang, Y. Zhang, Next-Generation Optical Access Networks, Springer, 2012.
- [37] Huda Saleh Abbas and Mark A. Gregory, The next generation of passive optical networks, J. Netw. Comput. Appl. 67, C, May 2016.
- [38] Lin, Hui-Tang & Lai, Chia-Lin & Chang, Wang-Rong & Hong, Sheng-Jhe, Design and Analysis of a WDM EPON for Supporting Private Networking and Differentiated Services, Journal of Optical Communications and Networking, 2010.
- [39] Lee, Chang-Hee, Lee, Sang-Mook, Choi, Ki-Man, Moon, Jung-Hyung, Mun, Sil-Gu, Chang-Hee Lee, Sang-Mook Lee, Ki-Man Chang-Hee Lee, Sang-Mook Lee, Ki-Man Choi, Jung-Hyung Moon, Sil-Gu Mun, Kun-Youl Park, Jin-Serk Baik, Ju-Hee Park, Min-Hwan Kim, Hoon-Keun Lee, WDM-PON: a next-generation access network, Asia-Pacific Optical Communications, 2006.
- [40] Choudhary, Manish, Kumar, Bipin, Analysis of Next Generation PON Architecture for Optical Broadband Access Networks, 2006.

- [41] M. Maier, M. Reisslein, A. Wolisz, A hybrid MAC protocol for a metro WDM network using multiple free spectral ranges of an arrayed-waveguide grating, *Computer Networks*, 2002.
- [42] Y. Luo, N. Ansari, Bandwidth allocation for multiservice access on EPONs, *IEEE Communications Magazine*, 2005.
- [43] Papadimitriou, G., I., Tsimoulas, P. A., Obaidat, M. S., & Pomportsis, A. S., *Multiwavelength Optical LANs (1st ed.)*. Wiley., 2007, December 10.
- [44] Α.Σ. Πομπόρτσας, Εισαγωγή στις Σύγχρονες Τεχνολογίες Επικοινωνιών, ΤΖΙΟΛΑ, 2009.
- [45] Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S., *Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey*., *Proceedings of the IEEE*, 2015.
- [46] Jain, R., & Paul, S., Network virtualization and software defined networking for cloud computing: A survey., *IEEE Communications Magazine*, 2013.
- [47] Zhang, J., et al., *Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks: A Survey*. Optical Switching and Networking, 2014.
- [48] Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D., *On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Architecture & Orchestration*., *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017.

