



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΥ
ΚΑΘΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΤΥΠΟΥ ROUND ROBIN

Νικόλαος Σκούρας

Επιβλέπων: Ελευθέριος Στεργίου
Καθηγητής, Αναπληρωτής

Άρτα, Ιανουάριος, 2025

**LOAD BALANCING IN SOFTWARE-DEFINED
NETWORKS USING ROUND ROBIN TYPE OF
ALGORITHMS**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 28 Ιανουαρίου 2025

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Ελευθέριος Στεργίου

Καθηγητής, Αναπληρωτής

2. Μέλος επιτροπής

Χρυσόστομος Στύλιος

Καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Σπυριδούλα Μαργαρίτη

ΕΔΙΠ

© Σκούρας, Νικόλαος, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

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

Σκούρας, Νικόλαος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς την καθηγήτριά μου, κα Σπυριδούλα Μαργαρίτη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Η υπομονή, οι γνώσεις και η εμπειρία της στάθηκαν καθοριστικές όχι μόνο για την ολοκλήρωση της εργασίας μου, αλλά και για την προσωπική και επαγγελματική μου εξέλιξη. Η αφοσίωση και η στήριξή της αποτέλεσαν για εμένα πηγή έμπνευσης και δύναμης, και της οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για τη συνεχή παρουσία της σε κάθε στάδιο αυτής της πορείας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κων Στεργίου Ελευθέριο, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε. Το πάθος του για τη διδασκαλία και ο ανθρώπινος χαρακτήρας του αποτελούν πηγή έμπνευσης και οδηγό για τις νέες γενιές επιστημόνων. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική και τον ευχαριστώ ειλικρινά για την υποστήριξή του.

Παράλληλα, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με την αμέριστη υπομονή, κατανόηση και στήριξή της με βοήθησε να παραμείνω προσηλωμένος στον στόχο μου, προσφέροντάς μου τη δύναμη που χρειαζόμουν για να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις αυτής της προσπάθειας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έρευνά μας εστιάζει στην ανάλυση και αξιολόγηση αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου σε δίκτυα SDN, με ιδιαίτερη αναφορά στον Round Robin (RR) και τις παραλλαγές του. Οι στόχοι περιλαμβάνουν τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι βελτιώνουν κρίσιμες μετρικές, όπως το throughput και ο χρόνος απόκρισης, καθώς και την ανάλυση των διαφοροποιήσεών τους ως προς τις απαιτήσεις και την αποδοτικότητα σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Εξετάζεται επίσης η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ αλγορίθμων που βασίζονται ή όχι στον RR και η κατανομή των ερευνητικών προτεραιοτήτων στον τομέα, με έμφαση στα ερευνητικά κενά.

Η μεθοδολογία περιλάμβανε αναζήτηση και μελέτη σχετικών εργασιών από το 2020 και μετά. Τα δεδομένα αναλύθηκαν με βάση τη χρήση μετρικών, αποκαλύπτοντας ότι οι κύριες εστιασμένες κατηγορίες είναι η Απόδοση Δικτύου (45%) και ο Χρόνος Απόκρισης (20%), ενώ η Εξισορρόπηση Φορτίου (3.75%) και τα Στατιστικά Επικοινωνίας (5%) είναι υποεκπροσωπούμενες. Αυτό αναδεικνύει ερευνητικά κενά, όπως η έλλειψη εστίασης στη δικαιοσύνη της κατανομής πόρων και τη σταθερότητα σε συνθήκες πίεσης.

Συμπερασματικά, οι αλγόριθμοι που βασίζονται στον RR επιδεικνύουν σημαντικές βελτιώσεις στις κρίσιμες μετρικές, καθιστώντας τους κατάλληλους για δυναμικά περιβάλλοντα, όπως το cloud computing και τα δίκτυα 5G. Παράλληλα, οι σπάνια μελετημένες κατηγορίες υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, ιδίως στην κατεύθυνση ανάπτυξης βελτιωμένων εκδόσεων του RR που να ενσωματώνουν χαρακτηριστικά όπως η δικαιοσύνη και η ανθεκτικότητα.

Λέξεις-κλειδιά: SDN, Εξισορρόπηση Φορτίου, Round Robin Αλγόριθμοι, Μετρικές Απόδοσης Δικτύου, Cloud Computing και 5G

ABSTRACT

Our research focuses on the analysis and evaluation of load balancing algorithms in SDN networks, with particular emphasis on the Round Robin (RR) algorithm and its variations. The objectives include investigating how the proposed algorithms improve critical metrics, such as throughput and response time, as well as analyzing their differences in terms of requirements and efficiency in various environments. The study also examines the performance comparison between algorithms based on RR and those that are not, along with the distribution of research priorities in the field, highlighting existing research gaps.

The methodology involved searching and studying relevant works published since 2020. Data analysis revealed that the primary focus areas are Network Performance (45%) and Response Time (20%), whereas Load Balancing (3.75%) and Communication Statistics (5%) are underrepresented. This highlights research gaps, such as the lack of emphasis on resource allocation fairness and stability under stress conditions.

In conclusion, RR-based algorithms demonstrate significant improvements in critical metrics, making them suitable for dynamic environments such as cloud computing and 5G networks. At the same time, the underexplored categories indicate the need for further research, particularly toward developing enhanced RR versions that incorporate characteristics such as fairness and resilience.

Keywords: SDN, Load Balancing, Round Robin Algorithms, Network Performance Metrics, Cloud Computing and 5G

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xii
1 Θεωρητικό υπόβαθρο	1
1.1 Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα.....	1
1.2 Αρχιτεκτονική δικτύων SDN.....	1
1.2.1 Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική SDN: Ορισμός - Βασικές αρχές και ιστορική εξέλιξη	2
1.2.2 Επίπεδα αρχιτεκτονικής SDN	3
1.2.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας.....	20
1.2.4 OpenFlow.....	21
1.2.5 P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors)	22
1.3 Εξισορρόπηση φορτίου	23
1.3.1 Εισαγωγή στην ισορροπία φορτίου σε δίκτυα SDN	25
1.3.2 Τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στα SDN δίκτυα	27
1.3.3 Βασικές μετρικές που χρησιμοποιούμε για να αξιολογήσουμε ένα δίκτυο	36
1.4 Η τεχνική LB Round Robin (RR) και αλγόριθμοι με τους οποίους συνδυάζεται.....	41
1.4.1 Round Robin (Κυκλική Ανάθεση).....	41
1.4.2 Least ResponseTime (Ελάχιστος Χρόνος Απόκρισης).....	44
1.4.3 Adaptive Load Balancing (Προσαρμοστική Ισορροπία Φορτίου)	45
1.4.4 Least Loaded (Ελάχιστα Φορτωμένος ή Ελάχιστες Συνδέσεις).....	46
1.4.5 Hashing (Κατακερματισμός).....	48
1. 5 Σχετικές εργασίες	49
2. Μεθοδολογία έρευνας	51

2.1 Διατύπωση ερευνητικών ερωτημάτων	51
2.2 Διαδικασία και τρόπος εργασίας.....	53
2.3 Η ταυτότητα της έρευνας.....	56
2.3.1 Εργαλεία προσομοίωσης.....	56
2.3.2 Ταξινόμηση με βάση τους εκδότες	58
2.3.3 Ταξινόμηση με βάση το έτος έκδοσης.....	60
3. Εισαγωγή στο ρόλο του RR στην εξισορρόπηση φορτίου	63
3.1 Αλγόριθμοι που βασίζονται στον RR.....	63
3.1.1 Weighted Round Robin (WRR)	63
3.1.2 TA-ASLB (Traffic – Aware Adaptive Server Load Balancing.....	67
3.1.3 Priority Weighted Round-Robin (PWRR)	70
3.1.4 Improved Weighted Round Robin (IWRR)	72
3.1.5 W-RRLC και Hybrid Least Weight	75
3.1.6 Least Delay Dynamic Weighted Round Robin (LDDWRR)	78
3.1.7 Συμπεράσματα.....	79
3.2 Νέοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τον RR ως μέτρο σύγκρισης	85
3.2.1 MRBS (Multiple Regression-Based Searching).....	85
3.2.2 LBSMT (Load Balancing Switch Migration Technique)	86
3.2.3 Priority D-BMAP (Discrete-Batch Markovian Arrival Process).....	86
3.2.4 Traffic pattern-based load-balancing algorithm	86
3.2.5 Novel Load Balancing Algorithm	87
3.2.6 GLBA (Genetic Load Balancing Algorithm).....	88
3.2.7 Συμπεράσματα.....	88
3.3 Ανάλυση επικέντρωσης ερευνών -Ομαδοποίηση μετρικών	90
3.3.1 Συμπεράσματα επικέντρωσης ερευνών	93
3.3.2 Συνολικά Συμπεράσματα	95
3.4 Επίλογος	95
3.4.1 Σύνοψη και συμπεράσματα.....	96

3.4.2 Όρια και Περιορισμοί της Έρευνας	96
3.4.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Παραδοσιακά vs SDN δίκτυα.....	6
Πίνακας 1.2 Λογισμικό ελέγχου δικτύου vs ελεγκτή SDN.....	14
Πίνακας 2. 1 Ερευνητικά ερωτήματα και κίνητρα έρευνας	52
Πίνακας 2. 2 Οι εκδότες και οι διευθύνσεις τους	53
Πίνακας 3. 1 Σύγκριση του κάθε αλγορίθμου με βάση επιλεγμένα χαρακτηριστικά	83
Πίνακας 3. 2 Πίνακας συχνοτήτων εμφάνισης της κάθε ομάδας μετρικών	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 0.1 Σχηματική απεικόνιση του Load Balancing.....	xiii
Εικόνα 1.1 Η αρχιτεκτονική δικτύου SDN	4
Εικόνα 1.2 Κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική	12
Εικόνα 1.3 Κατανεμημένη αρχιτεκτονική.....	13
Εικόνα 1.5 Κατηγοριοποίηση τεχνικών LB στο SDN	28
Εικόνα 1.6 Κατανεμημένη και κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική	29
Εικόνα 2. 1 Διάγραμμα ροής του τρόπου επιλογής των εργασιών	56
Εικόνα 2. 2 Λογισμικά προσομοίωσης που αξιοποιήθηκαν.....	58
Εικόνα 2. 3 Πλήθος εργασιών ανά αποθετήριο	60
Εικόνα 2. 4 Χρονολογική κατανομή των μελετημένων εργασιών	61
Εικόνα 3. 1 % Μεταβολή των παραπάνω μετρικών σε περιβάλλον με και χωρίς LB	67
Εικόνα 3. 2 Ο ψευδοκώδικας του TA-ASLB	68
Εικόνα 3. 3 % Μεταβολή του Latency και του Throughput μεταξύ των τριών αλγορίθμων για διαφορετικά parallel requests πακέτων TCP των 1024 bytes.....	69
Εικόνα 3. 4 Ο ψευδοκώδικας του PRR.....	71
Εικόνα 3. 5 % Μεταβολή του Execution cost για διάφορα πλήθη cloudlets.....	72
Εικόνα 3. 6 % Βελτίωση του execution time ανάλογα με το πλήθος των VMs	74
Εικόνα 3. 7 % μεταβολή της επίδοσης του LDDWRR ανά συγκρινόμενη παράμετρο	79
Εικόνα 3. 8 Επιδόσεις κάθε αλγορίθμου ανά χαρακτηριστικό	84
Εικόνα 3. 9 Ποσοστά βελτίωσης της κάθε μετρικής για κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με τον RR.....	90
Εικόνα 3. 10 Οι 6 κατηγορίες και τα ποσοστά τους	95

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα, η εξισορρόπηση φορτίου είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητάς τους. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι η ανομοιόμορφη κατανομή της κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση συγκεκριμένων διακομιστών ή συνδέσεων, προκαλώντας καθυστερήσεις, υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) και αρνητική εμπειρία χρήστη. Η εξισορρόπηση φορτίου (Load Balancing - LB) προσφέρει μια λύση, εξασφαλίζοντας την ομαλή κατανομή της κίνησης σε λειτουργικούς και προσβάσιμους διακομιστές, μειώνοντας τους χρόνους απόκρισης και βελτιώνοντας την ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη (Quality of Experience - QoE).

Στόχος είναι η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων μέσω της ομοιόμορφης κατανομής της κυκλοφορίας του δικτύου στους διακομιστές, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους και αλγόριθμους. Η επιλογή της σωστής μεθόδου είναι καθοριστική. Στην παρούσα εργασία, θα μελετηθεί ο αλγόριθμος **Round Robin**, επειδή είναι απλός, εύκολος στην υλοποίηση και προσφέρει μια βασική προσέγγιση για τη δίκαιη κατανομή φορτίου, καθιστώντας τον κατάλληλο για την κατανόηση των βασικών αρχών της εξισορρόπησης φορτίου.

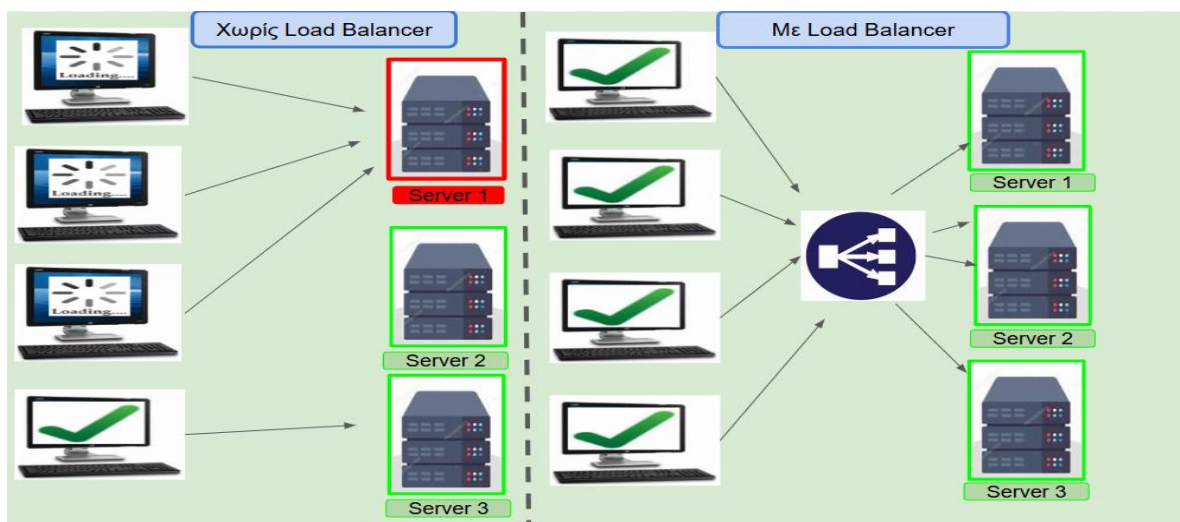
Η απόδοση αυτών των μεθόδων εξαρτάται από το περιβάλλον, καθιστώντας δύσκολη την εύρεση της ιδανικής λύσης. Στα δίκτυα SDN, οι προκλήσεις αυξάνονται λόγω της ανάγκης για κεντρική διαχείριση και δυναμική προσαρμογή των ροών δεδομένων. Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα, γνωστά και ως Software-Defined Networks (SDN), αντιπροσωπεύουν μια καινοτόμο προσέγγιση στη διαχείριση και τον έλεγχο των δικτυακών υποδομών. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, όπου ο έλεγχος και η δρομολόγηση πακέτων πραγματοποιούνται από τις ίδιες τις δικτυακές συσκευές, τα SDN επιτρέπουν τον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου (control plane) από το επίπεδο δεδομένων (data plane).

Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων να προγραμματίζουν και να διαχειρίζονται κεντρικά τις πολιτικές δικτύου μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή (controller), αυξάνοντας έτσι την ευελιξία, την αποδοτικότητα και τη δυνατότητα προσαρμογής του δικτύου. Η αυξημένη ζήτηση για δίκτυα που μπορούν να ανταποκριθούν σε δυναμικές και ποικίλες απαιτήσεις, όπως αυτές που προκύπτουν από την αυξημένη χρήση υπηρεσιών cloud, IoT και big data, έχει καταστήσει τα SDN αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης δικτυακής

τεχνολογίας. Τα SDN προσφέρουν δυνατότητες όπως η αυτόματη κατανομή πόρων, η ευκολία στη διαμόρφωση και η ταχεία ανάκαμψη από σφάλματα, καθιστώντας τα ιδανική λύση για τις ανάγκες των σύγχρονων δικτύων.

Οι διακομιστές, που φιλοξενούν, αποθηκεύουν και διαχειρίζονται δεδομένα, εφαρμογές και υπηρεσίες, αποτελούν τον πυρήνα της λειτουργίας των ψηφιακών εφαρμογών και υπηρεσιών και εξασφαλίζουν την ομαλή εκτέλεση των εργασιών και τη διαχείριση της κίνησης των δεδομένων. Ωστόσο, όταν οι διακομιστές ή οι συνδέσεις επιβαρύνονται υπερβολικά, μπορεί να οδηγήσουν σε καθυστερήσεις, υποβάθμιση της QoS και αυξημένο χρόνο απόκρισης, επηρεάζοντας αρνητικά την εμπειρία των χρηστών, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στη μελέτη του αλγορίθμου Round Robin στα δίκτυα SDN και στη διερεύνηση του ρόλου του στην εξισορρόπηση φορτίου. Παράλληλα, αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο τα SDN μπορούν να ενισχύσουν τη διαδικασία εξισορρόπησης φορτίου, προσφέροντας λύσεις που ανταποκρίνονται στις ανάγκες των σύγχρονων δικτύων. Η πρωτοτυπία της εργασίας εντοπίζεται στη συστηματική ανάλυση και σύγκριση των νέων παραλλαγών του αλγορίθμου Round Robin και στον τρόπο με τον οποίο αυτές μπορούν να προσαρμοστούν στις δυναμικές απαιτήσεις των SDN δικτύων. Επιπλέον, η εργασία καλύπτει ένα σημαντικό κενό στη βιβλιογραφία, καθώς εξετάζει εις βάθος τόσο τη λειτουργικότητα του Round Robin όσο και τη χρήση του ως μέτρο σύγκρισης σε εναλλακτικές λύσεις, προσφέροντας νέες προοπτικές και συμπεράσματα που μπορούν να ενισχύσουν την έρευνα στον τομέα της εξισορρόπησης φορτίου στα SDN.



Εικόνα 0.1 Σχηματική απεικόνιση του Load Balancing

Η εργασία είναι δομημένη ώστε να παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην εξισορρόπηση φορτίου στα δίκτυα SDN, με έμφαση στον αλγόριθμο Round Robin (RR) και στις βελτιώσεις ή εναλλακτικές προσεγγίσεις του. Στην **Εισαγωγή** παρουσιάζεται η θεματολογία της εργασίας, το πρόβλημα που πραγματεύεται, η σημασία της εξισορρόπησης φορτίου και η συμβολή της στην αποδοτικότητα και αξιοπιστία των δικτύων SDN. Περιγράφονται επίσης ο στόχος της εργασίας και η συνεισφορά της στη σχετική βιβλιογραφία.

Το **πρώτο κεφάλαιο** προσφέρει μια θεωρητική θεμελίωση για τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα (SDN) και την αρχιτεκτονική τους. Αναλύονται οι βασικές αρχές, τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας (όπως το OpenFlow και το P4), καθώς και η έννοια και οι τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στα SDN. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον αλγόριθμο Round Robin (RR) και στους αλγόριθμους με τους οποίους συνδυάζεται, όπως το Least Response Time και το Adaptive Load Balancing.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφεται η μεθοδολογία της έρευνας, συμπεριλαμβανομένης της διατύπωσης ερευνητικών ερωτημάτων, της διαδικασίας εργασίας, των εργαλείων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν και της ταξινόμησης των δεδομένων με βάση κριτήρια όπως οι εκδότες και το έτος έκδοσης.

Το **τρίτο κεφάλαιο** αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας, με ανάλυση νέων αλγορίθμων που βασίζονται στον RR, όπως ο Weighted Round Robin (WRR), ο Least Delay Dynamic Weighted Round Robin (LDDWRR) κ.α. Επιπλέον, παρουσιάζονται νέοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τον RR ως μέτρο σύγκρισης, όπως ο GLBA (Genetic Load Balancing Algorithm) και ο MRBS (Multiple Regression-Based Searching). Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με ανάλυση επικέντρωσης των ερευνών, ομαδοποίηση των μετρικών και συνολικά συμπεράσματα.

Στον **επίλογο** συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της έρευνας, περιγράφονται τα όρια και οι περιορισμοί της, ενώ προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική επέκταση της εργασίας. Η εργασία συνδυάζει θεωρητική ανάλυση και πρακτική διερεύνηση, προσφέροντας μια περιεκτική προσέγγιση για τη μελέτη της εξισορρόπησης φορτίου στα δίκτυα SDN και τον ρόλο του Round Robin στην επίτευξη αποδοτικών και αξιόπιστων δικτυακών υποδομών.

1 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα

Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα, γνωστά και ως Software-Defined Networks (SDN), αντιπροσωπεύουν μια καινοτόμο προσέγγιση στη διαχείριση και τον έλεγχο των δικτυακών υποδομών. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, όπου ο έλεγχος και η δρομολόγηση πακέτων πραγματοποιούνται από τις ίδιες τις δικτυακές συσκευές, τα SDN επιτρέπουν τον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου (controlplane) από το επίπεδο δεδομένων (dataplane). Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων να προγραμματίζουν και να διαχειρίζονται κεντρικά τις πολιτικές δικτύου μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή (controller), αυξάνοντας έτσι την ευελιξία, την αποδοτικότητα και την δυνατότητα προσαρμογής του δικτύου.

Η αυξημένη ζήτηση για δίκτυα που μπορούν να ανταποκριθούν σε δυναμικές και ποικίλες απαιτήσεις, όπως αυτές που προκύπτουν από την αυξημένη χρήση υπηρεσιών cloud, IoT και bigdata, έχει καταστήσει τα SDN αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης δικτυακής τεχνολογίας. Τα SDN προσφέρουν δυνατότητες όπως η αυτόματη κατανομή πόρων, η ευκολία στη διαμόρφωση και η ταχεία ανάκαμψη από σφάλματα, καθιστώντας τα ιδανική λύση για τις ανάγκες των σύγχρονων δικτύων.

Σε αυτή την ενότητα, θα εξετάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και την αρχιτεκτονική των ευφών προγραμματιζόμενων δικτύων, θα εισάγουμε την έννοια της ισορροπίας φορτίου (loadbalancing) σε δίκτυα SDN και θα περιγράψουμε τις διεπαφές και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται. Αυτή η ανάλυση θα προσφέρει μια σαφή κατανόηση των δυνατοτήτων και των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν τα SDN, καθώς και των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν.

1.2 Αρχιτεκτονική δικτύων SDN

Η αρχιτεκτονική των Ευφών Προγραμματιζόμενων Δικτύων (SDN) αποτελεί ένα από τα πλέον καινοτόμα και καθοριστικά στοιχεία στην εξέλιξη των σύγχρονων δικτύων. Η προσέγγιση του SDN βασίζεται στο διαχωρισμό *των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων*, προσφέροντας μια πιο ευέλικτη και δυναμική διαχείριση του δικτύου. Αυτή η διαχωριστική αρχή επιτρέπει την κεντρική διαχείριση των δικτυακών πόρων και την ταχεία προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του δικτύου, παρέχοντας παράλληλα

τη δυνατότητα για καινοτομία και βελτιστοποίηση των λειτουργιών. Για την καλύτερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής των δικτύων SDN, θα ξεκινήσουμε δίνοντας τις βασικές αρχές και την ιστορική τους εξέλιξη, και στη συνέχεια θα αναλύσουμε τα διάφορα επίπεδα της αρχιτεκτονικής SDN περιγράφοντας τα κύρια χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες του κάθε επιπέδου (βλ.εικ 2).

1.2.1 Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική SDN: Ορισμός - Βασικές αρχές και ιστορική εξέλιξη

Σύμφωνα με τον ορισμό του Ιδρύματος Ανοικτών Δικτύων (ONF – Open Networking Foundation): “ *Το SDN είναι ο φυσικός διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου του δικτύου από το επίπεδο προώθησης, όπου ένα επίπεδο ελέγχου διαχειρίζεται πολλές συσκευές* ” [1]. Οι βασικές αρχές του Software-Defined Networking–(SDN) αποτελούν το θεμέλιο για την αποδοτική διαχείριση και την ευελιξία των σύγχρονων δικτύων. Οι κεντρικές αρχές περιλαμβάνουν:

A. *τον διαχωρισμό ελέγχου και δεδομένων*: Η αρχιτεκτονική SDN διαχωρίζει τον ελεγκτή (controller) από τις δικτυακές συσκευές που μεταφέρουν τα δεδομένα. Αυτό επιτρέπει την κεντρική διαχείριση του δικτύου και τη δυναμική προσαρμογή των δικτυακών ροών.

B. *τον προγραμματισμό του ελεγκτή*: Ο ελεγκτής SDN μπορεί να προγραμματιστεί με λογισμικό για να εφαρμόζει πολιτικές δικτύου μέσω πρωτοκόλλων όπως το OpenFlow. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει την αυτοματοποίηση και την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών δικτύωσης.

Γ. *την εικονικοποίηση και ελαστικότητα*: Το SDN υποστηρίζει την εικονικοποίηση υπηρεσιών και πόρων, επιτρέποντας τη δημιουργία ελαστικών δικτύων που μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες ανάγκες.

Δ. *τα ανοιχτά πρότυπα*: Το SDN βασίζεται σε ανοιχτά πρότυπα και προσεγγίσεις, όπως το OpenFlow και άλλα προτεινόμενα πρωτόκολλα, που επιτρέπουν την εύκολη ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και εφαρμογών.

E. *την ενοποίηση του ελέγχου*: Στο SDN, τα συστήματα ελέγχου και διαχείρισης έχουν τη δυνατότητα να ασκούν άμεσο έλεγχο πάνω στα δικτυακά στοιχεία, με τη δυνατότητα προγραμματισμού των πινάκων προώθησης (forwarding tables) για κάθε συσκευή. Αντί να

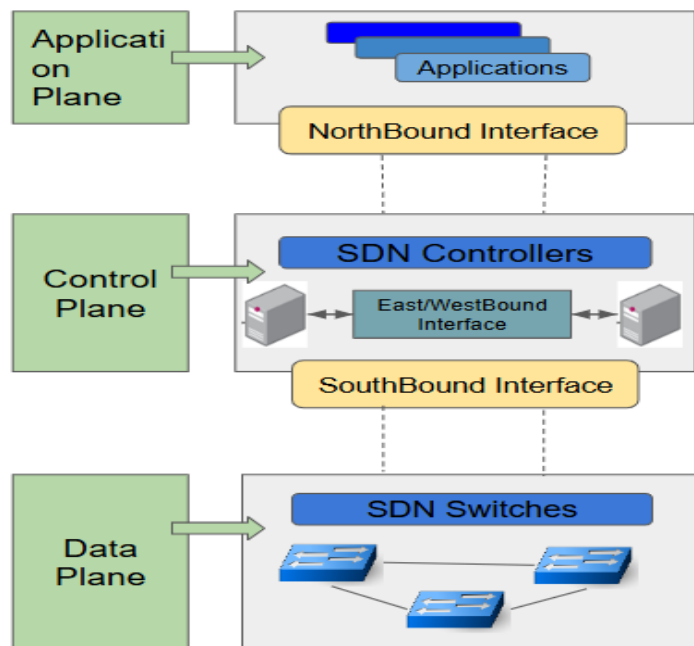
περιορίζονται σε απομακρυσμένη διαχείριση επιμέρους παραμέτρων διαμόρφωσης, όπως γίνεται σήμερα, η ενοποίηση του ελέγχου επιτρέπει την πλήρη και κεντρική διαχείριση των συσκευών, βελτιώνοντας τη συνολική λειτουργία και απόδοση. [2]

Με αυτές τις βασικές αρχές, η SDN παρέχει ένα σύγχρονο πλαίσιο για τη διαχείριση και την ανάπτυξη δικτύων, επιτρέποντας την επίτευξη υψηλής απόδοσης, αξιοπιστίας και ευελιξίας στις επιχειρηματικές και τεχνολογικές λύσεις.

Η έννοια του Software-Defined Networking - SDN έχει βιώσει μια εντυπωσιακή εξέλιξη στον τομέα των δικτύων από τις αρχές του 21ου αιώνα. Αρχικά, η έννοια αυτή προέκυψε ως απάντηση στις προκλήσεις που αντιμετώπιζαν οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων, οι οποίες βασίζονταν κυρίως σε συσκευές με στατικό προγραμματισμό και περιορισμένη ευελιξία. Από τη δεκαετία του 2000, η ανάπτυξη των εικονικών και cloud υποδομών απαιτούσε νέες προσεγγίσεις στη διαχείριση και τον έλεγχο των δικτύων, οδηγώντας στη δημιουργία του πρώτου πρωτοκόλλου OpenFlow το 2008. Από τότε, η έννοια του SDN έχει εξελιχθεί σε μια ευρύτερη φιλοσοφία διαχείρισης δικτύων, όπου η διαχωριστική γραμμή μεταξύ ελέγχου και δεδομένων επιτρέπει την ευέλικτη και δυναμική προσαρμογή των δικτυακών λειτουργιών σύμφωνα με τις ανάγκες των εφαρμογών και των υπηρεσιών. Η συνεχής ανάπτυξη και η υιοθέτηση από διάφορους τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες, οι κέντρα δεδομένων και οι επιχειρηματικές εφαρμογές, αποδεικνύει τη σημαντική εξέλιξη και το δυναμικό που έχει να προσφέρει η τεχνολογία SDN στον τομέα των δικτύων.

1.2.2 Επίπεδα αρχιτεκτονικής SDN

Η αρχιτεκτονική SDN [3] αναδεικνύει μια καινοτόμα προσέγγιση στο χώρο των δικτύων που επιτρέπει τη δυναμική και ευέλικτη διαχείριση τους, παρέχοντας έναν κεντρικό ελεγκτή που διαχειρίζεται ολόκληρη την υποδομή. Το πρωτόκολλο OpenFlow αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για την υλοποίηση αυτής της αρχιτεκτονικής. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, η SDN σε συνδυασμό με το OpenFlow παρέχει στους χειριστές δικτύου προηγμένες δυνατότητες για τη διαχείριση των ροών μέσω των ελεγκτών. Στη συμβατική δομή, έλεγχος και δεδομένα ενσωματώνονται στον εξοπλισμό, ενώ στην SDN χωρίζονται σε δύο επίπεδα, με το επίπεδο ελέγχου να αποτελεί τον "εγκέφαλο" που ελέγχει τη δομή και το επίπεδο δεδομένων να χειρίζεται τη μετάδοση δεδομένων. Η αρχιτεκτονική SDN οργανώνεται σε τρία βασικά επίπεδα σύμφωνα με το Open Networking Foundation (ONF):



Εικόνα 1.1 Η αρχιτεκτονική δικτύου SDN

1. Το Επίπεδο δεδομένων (Dataplane)

Το επίπεδο δεδομένων, γνωστό και ως "dataplane", αναφέρεται στο φυσικό εξοπλισμό του δικτύου, όπως δρομολογητές (routers)¹, μεταγωγείς (switches)² και άλλα δικτυακά στοιχεία, τα οποία χειρίζονται τη μετάδοση δεδομένων και εφαρμόζουν τις οδηγίες που λαμβάνουν από τον ελεγκτή SDN. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των C-DPI (Controller-Data Plane Interface) όπως π.χ το OpenFlow που είναι και το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του/των controller(s) και του dataplane. Η επικοινωνία αυτή διασφαλίζεται μέσω ασφαλών συνδέσεων που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο TLS (Transport Layer Security).

Στα **SDN δίκτυα** το "dataplane" αποτελεί το *φυσικό επίπεδο* του δικτύου, όπου τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται και δρομολογούνται μέσω του δικτύου. Τα πακέτα δεδομένων μεταφέρουν τις πληροφορίες και τις εντολές μεταξύ των διαφορετικών συσκευών στο δίκτυο, ενώ οι επεξεργαστές πακέτων επιτρέπουν την ανάλυση και την επεξεργασία των

¹ **Δρομολογητές (Routers):** Οι δρομολογητές είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν δεδομένα μεταξύ δικτύων. Παίζουν σημαντικό ρόλο στο Internet και στα δίκτυα WAN (Wide Area Networks), καθώς διαφορετικών επιλέγουν την καλύτερη διαδρομή για τη μεταφορά των δεδομένων από έναν υπολογιστή ή ένα δίκτυο σε ένα άλλο. Οι δρομολογητές λειτουργούν στο **επίπεδο 3 (Network Layer)** του μοντέλου OSI και χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως το IP (Internet Protocol).

² **Μεταγωγείς (Switches):** Οι μεταγωγείς είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση πολλαπλών συσκευών μέσα στο ίδιο δίκτυο, συνήθως σε ένα τοπικό δίκτυο (LAN). Διαχειρίζονται την προώθηση δεδομένων από μία θύρα σε άλλη με βάση τη διεύθυνση MAC (Media Access Control) των συσκευών. Οι μεταγωγείς λειτουργούν στο **επίπεδο 2 (Data Link Layer)** του μοντέλου OSI.

πακέτων στο επίπεδο του hardware, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου σφαλμάτων και της εφαρμογής πολιτικών ασφαλείας. Το dataplane αποτελεί το φυσικό υπόβαθρο του δικτύου και είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση και τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων. Σε συνδυασμό με το controlplane, το dataplane εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία και την αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου.

Το SDN επιτρέπει στους διαχειριστές των δικτύων να διαχειρίζονται το δίκτυο σαν ένα ομοιογενές σύνολο, αντί να διαχειρίζονται κάθε δικτυακή συσκευή ξεχωριστά. Αυτό παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητα ανταπόκρισης σε αλλαγές στις απαιτήσεις των εφαρμογών και των χρηστών, καθιστώντας το δίκτυο πιο αποτελεσματικό και διαχειρίσιμο.

Για να γίνουν πιο αντιληπτές οι αλλαγές που εισάγει αυτή η νέα φιλοσοφία λειτουργίας του SDN πάνω στο φυσικό επίπεδο μεταφοράς των δεδομένων, ας δούμε τον τρόπο λειτουργίας των routers και των switches του πριν το SDN (παραδοσιακά δίκτυα) και μετά. Έτσι λοιπόν στα **παραδοσιακά δίκτυα**, οι routers λειτουργούν με τοπικούς πίνακες δρομολόγησης (routing tables) που καθορίζουν τις διαδρομές των πακέτων προς διάφορους προορισμούς. Αυτοί οι πίνακες ενημερώνονται με τη βοήθεια πρωτοκόλλων δρομολόγησης όπως το OSPF, BGP, και RIP. Ο κάθε router λαμβάνει αυτόνομα τις αποφάσεις δρομολόγησης βασισμένος στις πληροφορίες που έχει αποθηκευμένες. Οι routers διαχειρίζονται την κυκλοφορία των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών δικτύων, καθορίζοντας τη διαδρομή κάθε πακέτου προς τον τελικό προορισμό.

Από την άλλη μεριά, οι switches στα **παραδοσιακά δίκτυα** λειτουργούν με πίνακες διευθύνσεων MAC (MAC address tables) που χαρτογραφούν τις θύρες του switch με τις MAC διευθύνσεις των συνδεδεμένων συσκευών. Οι switches λαμβάνουν αυτόνομα τις αποφάσεις για την προώθηση των πακέτων δεδομένων βασισμένοι στις εγγραφές αυτών των πινάκων. Η κύρια λειτουργία τους είναι η διαχείριση της κυκλοφορίας δεδομένων εντός του ίδιου τοπικού δικτύου (LAN), προωθώντας τα πακέτα στις σωστές θύρες ώστε να φτάσουν στον προορισμό τους.

Στα **SDN** δίκτυα, η λειτουργία των routers και των switches, όπως έχει ήδη αναφερθεί, διαχωρίζεται σε δύο επίπεδα: το επίπεδο ελέγχου (controlplane) και το επίπεδο δεδομένων (dataplane). Η διαχείριση του δικτύου γίνεται κεντρικά μέσω ενός SDN controller, ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο των ροών δεδομένων στο δίκτυο. Ο controller

διαχειρίζεται τους πίνακες δρομολόγησης και τις πολιτικές του δικτύου κεντρικά, επικοινωνώντας με τους routers και switches μέσω πρωτοκόλλων όπως το OpenFlow.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει στους διαχειριστές να αντιμετωπίζουν το δίκτυο ως ένα ολοκληρωμένο σύνολο, ενώ η διαχείριση της κυκλοφορίας δεδομένων γίνεται αποτελεσματικότερη και πιο ευέλικτη. Οι αποφάσεις για τη δρομολόγηση και την προώθηση των πακέτων είναι συγκεντρωμένες στον SDN controller, επιτρέποντας γρήγορη προσαρμογή σε αλλαγές στις απαιτήσεις των δικτύων και των εφαρμογών.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μετάβαση από τα παραδοσιακά δίκτυα στα SDN δίκτυα φέρνει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των routers και switches και οι οποίες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα [4] [5] [6] [7].

Χαρακτηριστικό	Παραδοσιακά Δίκτυα	SDN Δίκτυα
Έλεγχος Δικτύου	Αυτόνομος, διανεμημένος	Κεντρικός μέσω SDN controller
Δρομολόγηση	Τοπικά πρωτόκολλα δρομολόγησης	Κεντρικός έλεγχος δρομολόγησης από τον SDN controller
Πίνακας Δρομολόγησης/Διευθύνσεων	Τοπικοί πίνακες δρομολόγησης/διευθύνσεων MAC	Κεντρικά διαχειριζόμενοι πίνακες ροής (flowtables) από τον SDN controller
Απόφαση Δρομολόγησης	Αυτόνομη απόφαση από κάθε router/switch	Απόφαση λαμβάνεται από τον SDN controller και εκτελείται από τις συσκευές
Προσαρμογή και Βελτιστοποίηση	Περιορισμένη, βασίζεται σε στατικά πρωτόκολλα	Δυναμική, βασίζεται σε πραγματικό χρόνο δεδομένα και ανατροφοδότηση
Αυτοματοποίηση Πολιτικών	Περιορισμένη	Υψηλή, κεντρικά διαχειριζόμενη από τον SDN controller
Κυκλοφορία Δεδομένων	Διαχείριση εντός και μεταξύ δικτύων από τις συσκευές	Κεντρικά διαχειριζόμενη κυκλοφορία δεδομένων από τον SDN controller

Πίνακας 1.1 Παραδοσιακά vs SDN δίκτυα

Επίσης, παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα κατασκευής των συσκευών αυτών καθώς και η τιμή τους, δεν έχουν μείνει ανεπηρέαστοι από τη νέα αυτή φιλοσοφία. Έτσι ενώ στα παραδοσιακά δίκτυα, οι routers και οι switches λειτουργούν αυτόνομα με δικούς τους επεξεργαστές και μνήμες λόγω του ότι ο χειρισμός της δρομολόγησης και η μεταγωγή των πακέτων πρέπει να γίνουν βασισμένοι σε τοπικούς πίνακες δρομολόγησης και

διευθύνσεων MAC αντίστοιχα, αυτό καθιστά τις συσκευές αυτές σχετικά ακριβές και πιο πολύπλοκες στην κατασκευή τους.

Αντίθετα, στα SDN δίκτυα, ο ρόλος των routers και switches στο επίπεδο των δεδομένων είναι απλοποιημένος και σχεδιασμένος για τη γρήγορη και αποδοτική προώθηση των πακέτων. Ο έλεγχος των ροών δεδομένων γίνεται κεντρικά από έναν SDN controller, με τους switches και routers να λαμβάνουν οδηγίες και πολιτικές από αυτόν. Αυτή η αρχιτεκτονική κάνει τις συσκευές στο επίπεδο των δεδομένων πιο οικονομικές και ευέλικτες στη χρήση, με χαμηλότερο κόστος και απλούστερη κατασκευή.

- **Συσκευές δικτύου στο Dataplane**

Οι συσκευές δικτύου με υποστήριξη SDN περιλαμβάνουν τόσο hardware όσο και software στοιχεία, προσφέροντας ευελιξία και δυνατότητες προσαρμογής στις ανάγκες του δικτύου. Αν τις διαχωρίσουμε και τις αναλύσουμε ως προς φυσική τους ή όχι υπόσταση και τη λειτουργία τους θα έχουμε:

Hardware Συσκευές:

1. OpenFlow-enabled switches: Αυτά είναι φυσικά switches που υποστηρίζουν το πρωτόκολλο OpenFlow. Επιτρέπουν τον έλεγχο της ροής των πακέτων δεδομένων μέσω οδηγιών που λαμβάνουν από έναν SDN controller, προσφέροντας δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας στο δίκτυο.
2. OpenFlow-enabled switches Αν και το OVS είναι λογισμικό, συνήθως τρέχει πάνω σε φυσικό υλικό όπως servers ή switches. Προσφέρει δυνατότητες προγραμματισμού και διαχείρισης δικτύου μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow και άλλων SDN πρωτοκόλλων.
3. SDN Routers: Αυτοί είναι φυσικοί δρομολογητές που υποστηρίζουν την αρχιτεκτονική SDN. Διαθέτουν δυνατότητες προγραμματισμού και διαχείρισης μέσω SDN controllers, επιτρέποντας την ευέλικτη δρομολόγηση της κυκλοφορίας δεδομένων.
4. Programmable Network Interface Cards (NICs): Αυτές είναι φυσικές κάρτες δικτύου με δυνατότητες προγραμματισμού, επιτρέποντας την προσαρμογή και τη διαχείριση της κυκλοφορίας δεδομένων σε επίπεδο hardware.

5. Bare-metal Switches: Αυτά είναι φυσικά switches χωρίς προεγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα, παρέχοντας ευελιξία στον χρήστη να εγκαταστήσει το δικό του προγραμματιζόμενο σύστημα δικτύου.

Software Στοιχεία:

1. OpenvSwitch (OVS): Αν και μπορεί να τρέχει σε φυσικό υλικό, το OVS είναι στην ουσία λογισμικό. Χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της κυκλοφορίας δεδομένων σε εικονικά περιβάλλοντα και υποστηρίζει διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, παρέχοντας δυνατότητες προγραμματισμού και ευέλικτης διαχείρισης.

2. Network Function Virtualization (NFV) Appliances: Αυτές είναι εικονικές συσκευές που εκτελούν δικτυακές λειτουργίες μέσω λογισμικού. Παρέχουν υπηρεσίες όπως firewalls, loadbalancers και intrusion detection systems (IDS), προσφέροντας ευελιξία και αποδοτικότητα.

3. P4-programmable Switches: Αν και τα switches που υποστηρίζουν P4 είναι φυσικά, η δυνατότητα προγραμματισμού παρέχεται μέσω λογισμικού. Επιτρέπουν την προσαρμογή της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω της γλώσσας προγραμματισμού P4, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο της δρομολόγησης και της διαχείρισης των πακέτων δεδομένων.

Σε περιβάλλον SDN, η υποδομή συνδυάζει φυσικές συσκευές με προγραμματιζόμενες δυνατότητες που υλοποιούνται μέσω λογισμικού. Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση παρέχει τη μέγιστη ευελιξία και δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες του δικτύου. Συσκευές όπως οι OpenFlow-enabled switches και οι SDN routers συνεργάζονται με τους SDN controllers για να διαχειρίζονται δυναμικά και αποτελεσματικά την κυκλοφορία του δικτύου, ενώ οι εικονικές συσκευές και τα προγραμματιζόμενα στοιχεία προσφέρουν επιπλέον δυνατότητες και ευελιξία.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι οι συσκευές του Data Plane εφαρμόζουν τις πολιτικές και τις αποφάσεις που λαμβάνονται από το Control Plane, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων και την προγραμματισμένη διαχείριση της κυκλοφορίας του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές στο Data Plane:

- Προωθούν τα πακέτα δεδομένων σύμφωνα με τις ροές και τους κανόνες που έχουν καθοριστεί από τον SDN controller.

- Διαχειρίζονται την κυκλοφορία του δικτύου με βάση τις προγραμματισμένες πολιτικές και τις δυναμικές οδηγίες που λαμβάνουν.
- Παρέχουν πληροφορίες πίσω στο Control Plane σχετικά με την κατάσταση του δικτύου και την απόδοση των συσκευών.

2. Το Επίπεδο ελέγχου (Controlplane)

Το διαχειριστικό επίπεδο, γνωστό και ως "Control plane", αποτελείται από εφαρμογές και υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση και τον έλεγχο του δικτύου. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν εφαρμογές διαχείρισης κυκλοφορίας, εφαρμογές ασφαλείας και εφαρμογές παρακολούθησης. Το "Control plane" είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στην αρχιτεκτονική του δικτύου και αφορά τον τρόπο με τον οποίο το δίκτυο λαμβάνει αποφάσεις για τη δρομολόγηση των πακέτων και τη διαχείριση των πόρων του.

Αντιπροσωπεύει το ενδιάμεσο επίπεδο σε μια αρχιτεκτονική SDN που παρέχει λειτουργικότητα ελέγχου μέσω ελεγκτών SDN που βασίζονται σε λογισμικό για τη διαχείριση της συμπεριφοράς προώθησης δικτύου. Ο ελεγκτής διαχειρίζεται τους διακόπτες δικτύου, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μετάδοση πακέτων σύμφωνα με συγκεκριμένες οδηγίες. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί το southbound-API σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο OpenFlow για να επικοινωνεί με τις συσκευές δικτύου. Ένα μέρος του ελεγκτή SDN που ονομάζεται **εξισορροπητής φορτίου**, το οποίο βρίσκεται στο λογικό κεντρικό σημείο απόφασης, χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των αλγορίθμων φόρτωσης.

Σταχυολογώντας τα πιο σημαντικά στοιχεία του Control plane μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής:

A. Ο SDN Controller: Στο πλαίσιο του SDN, ο ελεγκτής είναι ο κεντρικός συντονιστής του. Αναλαμβάνει να παίρνει αποφάσεις σχετικά με τη δρομολόγηση των πακέτων, τις πολιτικές ασφαλείας, τη διαχείριση της κυκλοφορίας και άλλες λειτουργίες δικτύου.

B. Τα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας: Οι ελεγκτές SDN επικοινωνούν με τους δικτυακούς εξοπλισμούς χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το OpenFlow. Αυτή η επικοινωνία επιτρέπει στον ελεγκτή να παρέχει οδηγίες στον εξοπλισμό για τη δρομολόγηση των πακέτων και άλλες λειτουργίες.

Γ. Η Διαχείριση Ροής (Flow Management): Ένα κρίσιμο στοιχείο του είναι η διαχείριση των ροών δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Ο ελεγκτής λαμβάνει αποφάσεις για το πώς να χειριστεί κάθε ροή δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των δρομολογήσεων, των πολιτικών ασφαλείας και των πολιτικών διαχείρισης κυκλοφορίας.

Δ. Ο Προγραμματισμός Δικτύου: Το επιτρέπει τον προγραμματισμό του δικτύου, δηλαδή την εφαρμογή πολιτικών και την αλλαγή της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω λογισμικού.

Ε. Ο Επαναπροσδιορισμός Αρχιτεκτονικής: Το SDN επιτρέπει τον επαναπροσδιορισμό της αρχιτεκτονικής του δικτύου με τον χωρισμό του σε Data plane και Control plane. Αυτό βοηθάει στην απομάκρυνση της λογικής λειτουργίας από τον φυσικό εξοπλισμό και επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα.

- **SDN Controller και Λογισμικό Ελέγχου Δικτύου (NCS)**

Ο ελεγκτής SDN αποτελεί τον πυρήνα της τεχνολογίας Λογισμικού Ορισμένου Δικτύου (SDN) και διαδραματίζει καίριο ρόλο στον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου. Αντί να λαμβάνουν αυτόνομα αποφάσεις, οι routers και switches στα SDN δίκτυα λειτουργούν ως εκτελεστές των αποφάσεων του SDN controller. Αυτό επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή των ροών δεδομένων και την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Ο SDN controller παρακολουθεί την κατάσταση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο και προσαρμόζει τις ροές δεδομένων ανάλογα με τις τρέχουσες ανάγκες, βελτιώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Παράλληλα, η κεντρική διαχείριση διευκολύνει την αυτοματοποίηση των διαδικασιών και την εφαρμογή πολιτικών ασφαλείας και ποιότητας υπηρεσιών (QoS).

Μερικές βασικές πτυχές του ρόλου των SDN ελεγκτών περιλαμβάνουν:

- **Κεντρική Διαχείριση:** Οι ελεγκτές SDN λειτουργούν ως κεντρικά σημεία ελέγχου, εκτελούμενοι συνήθως σε κεντρικό υπολογιστή ή σε σύνολο υπολογιστικών πόρων.
- **Επικοινωνία με τον Εξοπλισμό Δικτύου:** Χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως το OpenFlow για την επικοινωνία με συσκευές του δικτύου, επιτρέποντας τη διαχείριση και τη λήψη αποφάσεων για τη δρομολόγηση των πακέτων.
- **Διαχείριση Κεντρικών Πολιτικών:** Επιτρέπουν τον καθορισμό και την εφαρμογή πολιτικών δικτύου, όπως προτεραιότητες ροής, ασφάλεια και διαχείριση κυκλοφορίας.

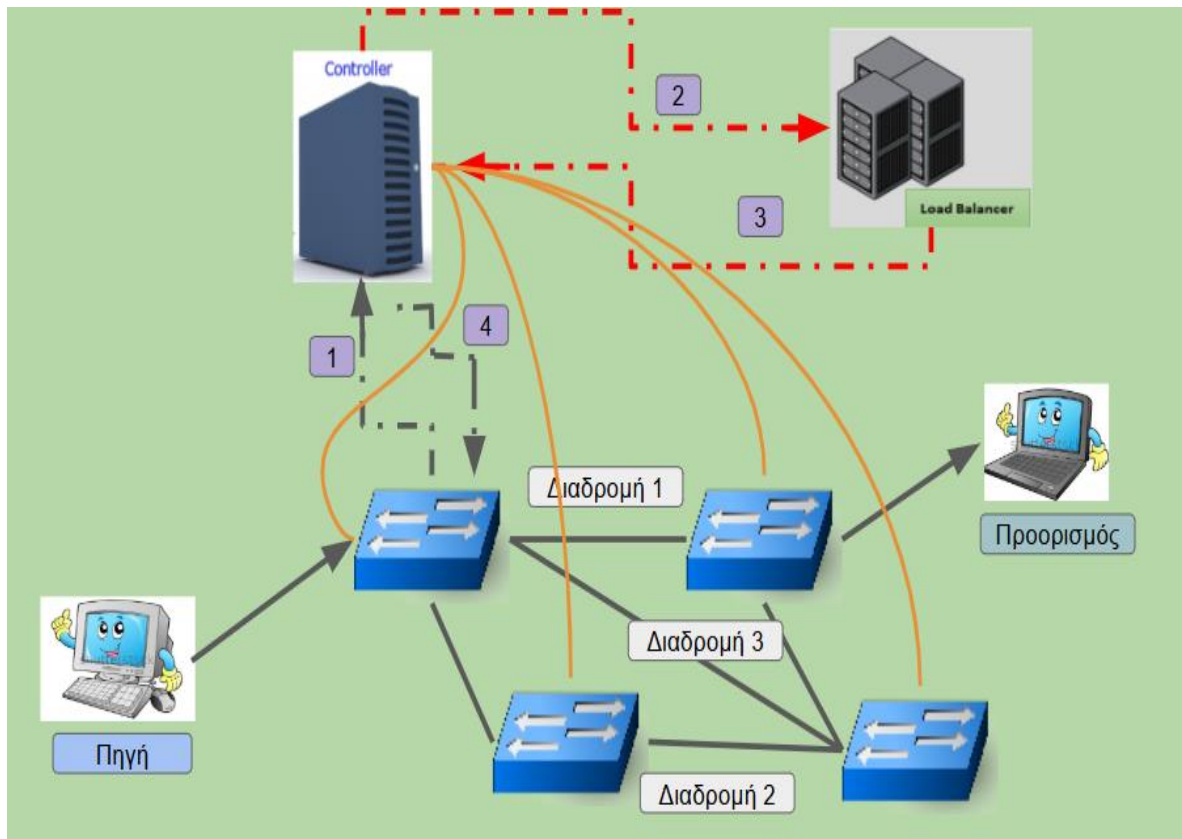
- **Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα:** Παρέχουν τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής των πολιτικών και της συμπεριφοράς του δικτύου χωρίς την ανάγκη παρέμβασης σε κάθε συσκευή ξεχωριστά.
- **Πλούσια Λειτουργικότητα:** Υποστηρίζουν την ανάπτυξη εφαρμογών δικτύου, δημιουργώντας εξειδικευμένες λύσεις για ανάγκες όπως η ασφάλεια και η διαχείριση κυκλοφορίας.

Το Λογισμικό Ελέγχου Δικτύου (Network Control Software - NCS), που λειτουργεί στο control plane των SDN, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διαχείριση και τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας δεδομένων. Το NCS περιλαμβάνει διάφορους τύπους λογισμικών, συμπεριλαμβανομένων των SDN controllers όπως το OpenDaylight, το ONOS (Open Network Operating System) και το Ryu, τα οποία παρέχουν διεπαφές και μηχανισμούς επικοινωνίας με τις συσκευές του Data Plane μέσω πρωτοκόλλων όπως το OpenFlow. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν τη δυναμική προσαρμογή των ροών δεδομένων, την κεντρικοποιημένη διαχείριση του δικτύου και την εφαρμογή κανόνων προώθησης πακέτων, απλοποιώντας τη διαχείριση του δικτύου και βελτιώνοντας την απόδοσή του.

Παρότι οι SDN controllers είναι κεντρικό στοιχείο του NCS, δεν ταυτίζονται με αυτό. Οι SDN controllers αποτελούν υποσύνολο του Λογισμικού Ελέγχου Δικτύου, καθώς το NCS περιλαμβάνει μια ευρύτερη γκάμα εργαλείων και εφαρμογών που επεκτείνεται πέρα από τους ελεγκτές SDN. Ενώ οι SDN controllers αναλαμβάνουν τη διαχείριση και τον έλεγχο της κυκλοφορίας στο δίκτυο, το NCS παρέχει την απαραίτητη υποδομή για την ομαλή λειτουργία του δικτύου, τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων και την καθορισμό των πολιτικών δρομολόγησης. Η κατανόηση αυτής της διάκρισης είναι σημαντική για την αξιολόγηση του ρόλου κάθε συστατικού στην επίτευξη των στόχων ενός SDN δικτύου.

Η αρχιτεκτονική των SDN controllers μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση, την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα ενός δικτύου. Οι **Κεντρικοποιημένοι Ελεγκτές** συγκεντρώνουν όλη τη λογική του δικτύου σε μια μοναδική, κεντρική οντότητα, προσφέροντας απλότητα διαχείρισης και ενοποιημένη ορατότητα. Ωστόσο, ενδέχεται να αποτελέσουν ένα σημείο αποτυχίας και να αντιμετωπίσουν προβλήματα κλιμάκωσης σε μεγάλα δίκτυα. Αντίθετα, οι κατανεμημένοι ελεγκτές κατανέμουν τη λογική του δικτύου σε πολλαπλούς ελεγκτές, προσφέροντας ανθεκτικότητα και μειωμένες καθυστερήσεις, αλλά απαιτούν πιο σύνθετους μηχανισμούς συντονισμού. Η ιεραρχική προσέγγιση, με πολυεπίπεδη δομή ελεγκτών, συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων αρχιτεκτονικών,

εξισορροπώντας την κεντρική λήψη αποφάσεων με την τοπική ανταπόκριση στις ανάγκες του δικτύου.

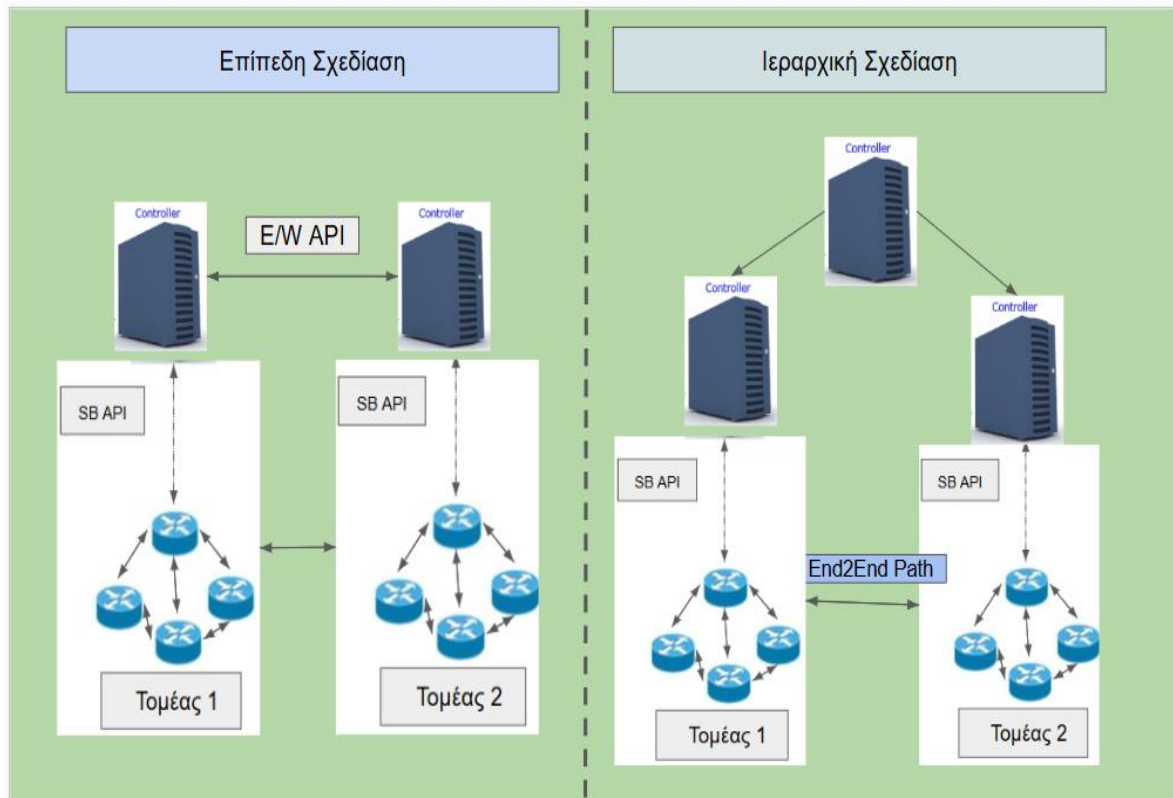


Εικόνα 1.2 Κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική

Στο παραπάνω σχήμα με διακεκομμένες γραμμές αναπαριστώνται τα σήματα διαχείρισης τα οποία ανταλλάσσει ο Controller με τον Load Balancer με σκοπό τη βέλτιστη διαχείριση των ροών δεδομένων. Οι ροές δεδομένων αντιπροσωπεύονται με τις κίτρινες καμπύλες γραμμές οι οποίες αποδίδουν τη λογική σύνδεση του Controller με τα switches. Η επικοινωνία μεταξύ controller και Load Balancer επιτυγχάνεται όταν ο πρώτος είτε ανιχνεύει ανισορροπία στο φόρτο που διακινείται μεταξύ των διαδρομών, είτε αντιλαμβάνεται τη δημιουργία σημείων συμφόρησης.

Οι **κατανεμημένοι ελεγκτές SDN** κατανέμουν τη λογική του δικτύου σε πολλαπλούς ελεγκτές, οι οποίοι συνεργάζονται για τη διαχείριση του δικτύου. Αυτή η αρχιτεκτονική προσφέρει πλεονεκτήματα όπως η αντοχή σε αποτυχίες, καθώς η απώλεια ενός ελεγκτή δεν επηρεάζει την απόδοση του δικτύου καθώς οι υπόλοιποι ελεγκτές συνεχίζουν να λειτουργούν. Η κατανομή του φορτίου διαχείρισης επιτρέπει την αποτελεσματική

διαχείριση μεγαλύτερων δικτύων, και μειώνει τις καθυστερήσεις καθώς οι ελεγκτές βρίσκονται πιο κοντά στα σημεία όπου λαμβάνονται οι αποφάσεις. Ωστόσο, οι κατακεντρωμένοι ελεγκτές έχουν επίσης προκλήσεις, όπως την ανάγκη για σύνθετους μηχανισμούς συντονισμού και επικοινωνίας μεταξύ των ελεγκτών, και τη δυσκολία στη διατήρηση της συνεπούς κατάστασης του δικτύου λόγω της κατανομής της πληροφορίας.



Εικόνα 1.3 Κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική

Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση *ιεραρχικών ελεγκτών*, όπου υπάρχει μια πολυεπίπεδη δομή ελεγκτών με διαφορετικά επίπεδα εξουσίας και ευθυνών. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των κεντριοποιημένων και κατακεντρωμένων ελεγκτών. Μπορεί να κλιμακώσει αποτελεσματικά τη διαχείριση μεγάλων δικτύων, και συνδυάζει την κεντρική λήψη αποφάσεων με την τοπική ανταπόκριση. Οι ελεγκτές στα ανώτερα επίπεδα της ιεραρχίας λαμβάνουν στρατηγικές αποφάσεις, ενώ οι ελεγκτές στα κατώτερα επίπεδα διαχειρίζονται την τοπική κυκλοφορία και τις άμεσες ανάγκες του δικτύου.

. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι διαφορές αυτών των δυο συστατικών του [8].

Χαρακτηριστικό	Λογισμικό Ελέγχου Δικτύου	Ελεγκτές SDN
Ορισμός	Γενικός όρος για όλα τα λογισμικά ελέγχου και διαχείρισης δικτύων	Ειδικός τύπος λογισμικού ελέγχου δικτύου που διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων
Παρακολούθηση δικτύου	Εργαλεία για παρακολούθηση της κυκλοφορίας και απόδοσης δικτύου	
Διαχείριση διαμορφώσεων	Εφαρμογές για διαχείριση ρυθμίσεων δικτυακών συσκευών	
Ανάλυση δικτύου	Λογισμικά για ανάλυση δεδομένων και ροών δικτύου	
Κεντρική διαχείριση δικτύου		Κεντρική διαχείριση δικτυακών πόρων
Εφαρμογή Πολιτικών		Καθορισμός και εφαρμογή πολιτικών δρομολόγησης και διαχείρισης δικτύου
Επικοινωνία με το Data Plane		Χρήση πρωτοκόλλων όπως το OpenFlow για επικοινωνία με συσκευές του Data Plane

Πίνακας 1.2 Λογισμικό ελέγχου δικτύου vs ελεγκτή SDN

3.Το επίπεδο εφαρμογής (Application Plane)

Το Στρώμα Εφαρμογών (Application Plane) στα Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό (SDN) είναι ένα κρίσιμο επίπεδο που παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης και εκτέλεσης εφαρμογών δικτύου που εκμεταλλεύονται την ευελιξία και την προγραμματιστικότητα της αρχιτεκτονικής SDN. Οι εφαρμογές αυτές επιτρέπουν την προσαρμογή και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων, προωθώντας την αυτοματοποίηση, την αποδοτικότητα και την ασφάλεια. Κάποιες από τις εφαρμογές αυτές στοχεύουν [9]:

1. Στη διαχείριση δικτύου μέσω της εποπτείας, του ελέγχου και της ρύθμισης των δικτυακών υποδομών. Παρέχουν εργαλεία για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας και της απόδοσης του δικτύου, τη διαχείριση διαμορφώσεων και την ανάλυση δικτύου. Αυτές οι εφαρμογές συμβάλλουν στην αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και στην αποφυγή συμφόρησης.

2. Στην εξισορρόπηση φορτίου (Load Balancing) όπου γίνεται η κατανομή της κίνησης του δικτύου μεταξύ πολλαπλών διακομιστών ή πόρων για να εξασφαλίσουν ομοιομορφία κατανομής και αποφυγή υπερφόρτωσης. Εδώ χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι όπως RoundRobin, Weighted Round Robin και Least Loaded (που θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα) για να κατανέμουν τα αιτήματα, βελτιώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου.

3. Στην παροχή ασφάλειας μέσω της εφαρμογής των κατάλληλων πολιτικών την ανίχνευση και την πρόληψη απειλών, καθώς και την ανάλυση της συμπεριφοράς του δικτύου για την αναγνώριση κακόβουλων δραστηριοτήτων. Η προσαρμοστική φύση των SDN επιτρέπει την άμεση ανταπόκριση σε απειλές και την αναβάθμιση των πολιτικών ασφαλείας.

Σαν παραδείγματα χρήσης των προαναφερθέντων εφαρμογών μπορούμε να αναφέρουμε ότι μέσω αυτών οι διαχειριστές του δικτύου μπορούν να προβούν σε:

A. *Μηχανική κίνησης δικτύου* (Traffic Engineering), όπου επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της διαχείρισης της κυκλοφορίας δικτύου, επιλέγοντας δυναμικά τις καλύτερες διαδρομές για την κίνηση δεδομένων. Εδώ χρησιμοποιούνται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να προσαρμόζουν τις διαδρομές και να αποφεύγουν συμφόρηση, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση και την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS).

B. *Βελτίωση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών* (Quality of Service -QoS), μέσω της διασφάλισης ότι οι κρίσιμες εφαρμογές λαμβάνουν το απαραίτητο εύρος ζώνης και υψηλή προτεραιότητα στο δίκτυο. Έτσι για παράδειγμα εξασφαλίζεται ότι εφαρμογές όπως VoIP και streaming βίντεο λειτουργούν χωρίς διακοπές και καθυστερήσεις.

Γ. *Οπτικοποίηση λειτουργίας δικτύου* (Network Function Virtualization -NFV) μέσω της εκμετάλλευσης της αρχιτεκτονικής SDN για την υλοποίηση εικονικών δικτυακών λειτουργιών όπως firewalls, routers, και load balancers. Αυτές οι εφαρμογές επιτρέπουν την ευέλικτη και αποδοτική χρήση των πόρων, μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την ευελιξία.

Δ. *Παροχή ασφάλειας* (Security Applications) όπως η ανίχνευση εισβολών (IDS), η πρόληψη εισβολών (IPS), και η ανάλυση της ροής δεδομένων για την ανίχνευση και αντιμετώπιση απειλών σε πραγματικό χρόνο. Εδώ χρησιμοποιούν πολιτικές ασφαλείας και

τεχνολογίες όπως DPI (Deep Packet Inspection) για να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν κακόβουλες δραστηριότητες.

- ***Northbound and Southbound Interfaces***

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο controller επικοινωνεί με τα επίπεδα και τις συσκευές του δικτύου μέσω διαφόρων διεπαφών. Μία από αυτές τις διεπαφές είναι η ***Northbound διεπαφή (Northbound Interface - NBI)***. Αυτή είναι μια διεπαφή που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του SDN controller και των εφαρμογών δικτύου που εκτελούνται στο ανώτερο επίπεδο. Αυτές οι εφαρμογές μπορεί να περιλαμβάνουν όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω καθώς και άλλες λειτουργίες που απαιτούν τη λήψη αποφάσεων και την εφαρμογή πολιτικών [10].

Ο σκοπός της NBI είναι να παρέχει μια αφηρημένη προβολή του δικτύου προς τις εφαρμογές, επιτρέποντάς τους να λαμβάνουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου και να στέλνουν εντολές προς τον controller. Η χρήση της NBI επιτρέπει στους προγραμματιστές να δημιουργούν και να αναπτύσσουν εφαρμογές χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζουν τις λεπτομέρειες του υποκείμενου δικτυακού εξοπλισμού.

Κάποια ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων διεπαφών που παρέχουν ισχυρές και ευέλικτες δυνατότητες διαχείρισης δικτύου διευκολύνοντας την ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών είναι [11]:

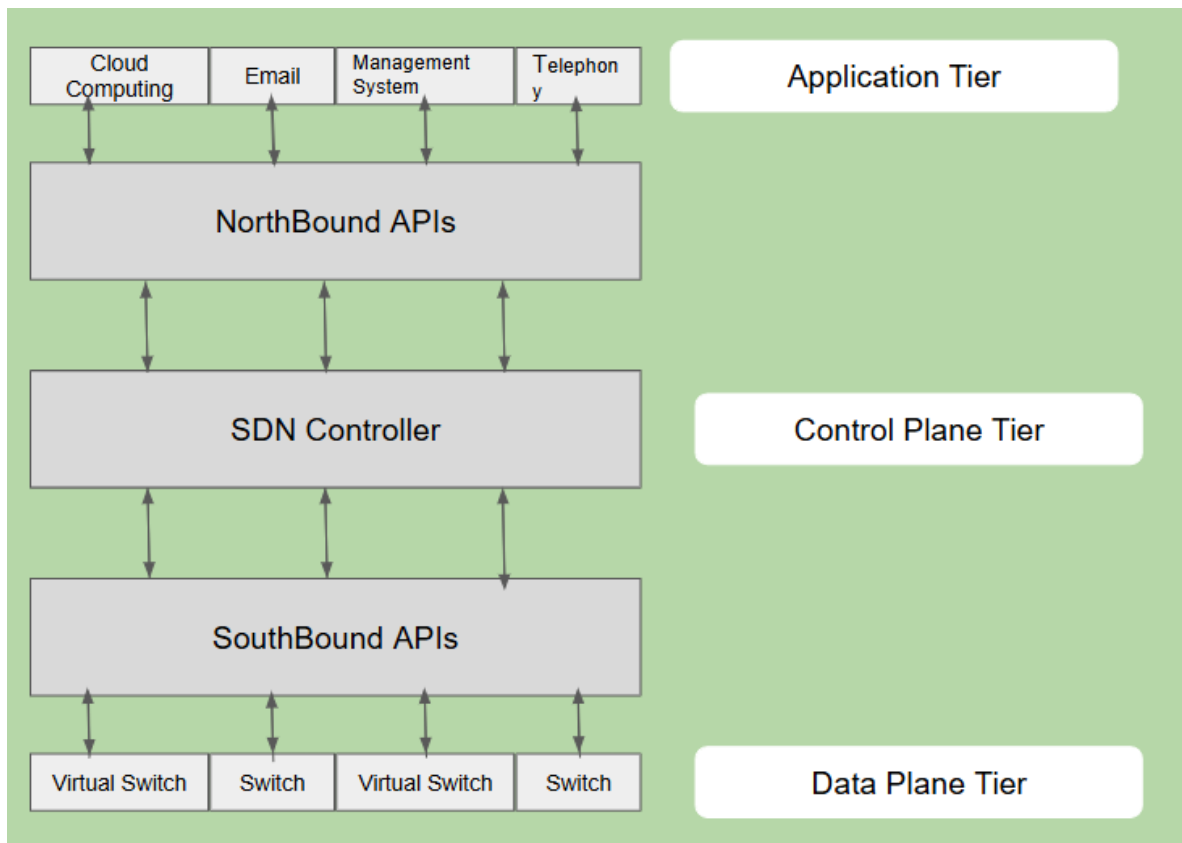
- **REST API:** Πολλοί SDN controllers παρέχουν RESTful APIs ως NBI, επιτρέποντας στις εφαρμογές να κάνουν αιτήματα HTTP για να επικοινωνούν με τον controller. Το REST API παρέχει μια απλή και ευέλικτη μέθοδο αλληλεπίδρασης με τον controller.
- **gRPC:** Το gRPC είναι ένα μοντέρνο framework απομακρυσμένης διαδικασίας (Remote Procedure Call) που χρησιμοποιείται ως NBI σε ορισμένους SDN controllers. Προσφέρει υψηλές επιδόσεις και υποστηρίζει ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
- **NETCONF:** Το NETCONF είναι ένα πρωτόκολλο διαμόρφωσης και διαχείρισης δικτυακών συσκευών. Χρησιμοποιείται επίσης ως NBI σε μερικούς controllers για τη διαχείριση των ρυθμίσεων δικτύου.

Τα Northbound APIs σε SDN περιβάλλον είναι συνήθως RESTful APIs που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή SDN και των υπηρεσιών και

εφαρμογών που λειτουργούν πάνω από το δίκτυο. Αυτά τα APIs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διευκολύνουν την αποτελεσματική ενορχήστρωση και αυτοματισμό του δικτύου έτσι ώστε αυτό να συμμορφωθεί με τις ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών μέσω της δικτυακής προγραμματισιμότητας SDN. Τα APIs προς τα βόρεια αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ των εφαρμογών και του ελεγκτή SDN. Οι εφαρμογές μπορούν να περιγράψουν στο δίκτυο τι χρειάζονται (δεδομένα, αποθήκευση, εύρος ζώνης κ.λπ.) και το δίκτυο μπορεί να παρέχει αυτούς τους πόρους ή να επικοινωνεί τις διαθέσιμες δυνατότητές του. Αυτά τα APIs υποστηρίζουν μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Αυτός είναι πιθανώς και ο λόγος για τον οποίο τα προγραμματιστικά Northbound APIs στο SDN είναι ένα από τα πιο προσαρμόσιμα στοιχεία. Παραδείγματα των τύπων δικτυακών εφαρμογών που μπορούν να βελτιστοποιηθούν μέσω της Northbound διεπαφής περιλαμβάνουν εξισορροπητές φορτίου (load balancers), firewalls ή άλλες υπηρεσίες ασφάλειας που ορίζονται από λογισμικό.

Στη δικτύωση ορισμένη από λογισμικό **Southbound διεπαφή (Southbound Interface - SBI)** είναι είτε το OpenFlow είτε άλλο πρωτόκολλο ερμηνείας. Η βασική της λειτουργία είναι να επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ του ελεγκτή και των οντοτήτων του δικτύου (που περιλαμβάνουν τόσο εικονικές όσο και φυσικές συσκευές). Έτσι, το δρομολογητής έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει την τοπολογία του δικτύου, να καθορίσει τις ροές του δικτύου και να εκτελέσει αιτήσεις που του μεταδίδονται από διεπαφές προς τα βόρεια.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι μια διεπαφή Northbound παρέχει μια αφαίρεση που επιτρέπει στις εφαρμογές δικτύου να αξιοποιούν όλες τις δυνατότητες του SDN. Με άλλα λόγια, η Northbound διεπαφή επιτρέπει την επικοινωνία ενός εξοπλισμού δικτύου με ανώτερου επιπέδου οντότητες, ενώ η Southbound διεπαφή διευκολύνει την επικοινωνία με χαμηλότερου επιπέδου οντότητες. Οπτικά, η ροή Southbound αντιπροσωπεύει την κατάβαση και απεικονίζεται στα αρχιτεκτονικά διαγράμματα στο κάτω μέρος της σχετικής οντότητας, ενώ η ροή Northbound αντιπροσωπεύει την άνοδο και εμφανίζεται στο πάνω μέρος. Αν και αυτοί οι όροι μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορα συστήματα υπολογιστών ή δίκτυα, έχουν γίνει ιδιαίτερα συνυφασμένοι με τα APIs στο πλαίσιο του SDN.



Εικόνα 1.4 Βόρεια και νότια διεπαφή

Eastbound and Westbound Interfaces

Το East/West Bound Interface (E/WBI) στις SDN αρχιτεκτονικές αναφέρεται στη διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών SDN domains ή μεταξύ SDN και παραδοσιακών δικτύων. Τα East/WestBound Interface (E/WBI) στις SDN (Software Defined Networking) αρχιτεκτονικές αναφέρεται στη διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών SDN domains ή μεταξύ SDN και παραδοσιακών δικτύων. **Τα Eastbound APIs αφορούν την επικοινωνία μεταξύ SDN domains, ενώ τα Westbound APIs αναφέρονται στην αλληλεπίδραση SDN και παραδοσιακών δικτύων [12].** Στην περίπτωση της επικοινωνίας μεταξύ SDN domains (Eastbound), η κεντρική διαχείριση ενός SDN δικτύου επιτρέπει την απλή προγραμματιστικότητα και διαχείριση, αλλά εισάγει προκλήσεις όπως η επεκτασιμότητα και η διαθεσιμότητα, λόγω της κεντροποίησης του ελέγχου. Η λύση συχνά περιλαμβάνει τη διανομή των SDN controllers, είτε μέσω μιας πλήρως κατανεμημένης αρχιτεκτονικής είτε μέσω μιας ιεραρχικής. Η πλήρως κατανεμημένη αρχιτεκτονική διασφαλίζει ότι οι controllers μοιράζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, αν και αυτό μπορεί να επιβαρύνει την απόδοση του δικτύου. Στην ιεραρχική αρχιτεκτονική, ένας κεντρικός controller

διαχειρίζεται υπο-controllers, μειώνοντας το φορτίο της δικτύωσης αλλά εισάγοντας τον κίνδυνο μεμονωμένης αποτυχίας.

Από την άλλη, τα **WestboundAPIs** επιτρέπουν τη συμβατότητα μεταξύ SDN και παραδοσιακών δικτύων, επιτρέποντας τη χρήση πρωτοκόλλων όπως το **BGP** (*Border Gateway Protocol* - είναι ένα από τα βασικότερα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο Διαδίκτυο για την δρομολόγηση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών αυτόνομων συστημάτων) για την ανταλλαγή πληροφοριών προσβασιμότητας και πολιτικών δρομολόγησης. Αυτό είναι σημαντικό κατά τη μετάβαση από παραδοσιακά δίκτυα σε SDN, καθώς οι παλιές υποδομές πρέπει να συνεργάζονται με τις νέες τεχνολογίες [13].

1.2.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Με την ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, σύντομα κατέστη προφανές ότι η αλληλεπίδραση και επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων αυτών αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Η ανάγκη για διαλειτουργικότητα και τυποποίηση των δικτύων έγινε επιτακτική, καθώς η πληθώρα διαφορετικών τεχνολογιών και πρωτοκόλλων καθιστούσε την επικοινωνία δύσκολη, αυξάνοντας παράλληλα το κόστος και την πολυπλοκότητα της διαχείρισης των υποδομών.

Το SDN –όπως αναφέρθηκε προηγουμένως– αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση δικτύων, που διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου (controlplane) από το επίπεδο δεδομένων (dataplane), επιτρέποντας την κεντρική διαχείριση και τη δυναμική προσαρμογή των δικτυακών πόρων. Ένας από τους βασικούς παράγοντες επιτυχίας του SDN είναι η δυνατότητα των συστημάτων να επικοινωνούν μέσω τυποποιημένων πρωτοκόλλων, επιτρέποντας την ευελιξία και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συσκευών και τεχνολογιών.

Τα κύρια πρωτόκολλα SDN περιλαμβάνουν τα εξής: [14] [15] [16]:

1. **OpenFlow**: Είναι το πιο γνωστό και διαδεδομένο πρωτόκολλο SDN, το οποίο επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή (controller) και των switch στο επίπεδο δεδομένων. Μέσω του OpenFlow, ο ελεγκτής μπορεί να καθορίσει τη δρομολόγηση των πακέτων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας δυναμικές αλλαγές στους κανόνες δρομολόγησης και την πολιτική του δικτύου. Εντάσσεται κυρίως στο επίπεδο 2 και 3 του μοντέλου OSI (σύνδεση δεδομένων και δικτύου).
2. **NETCONF**: Αυτό το πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο χρησιμοποιεί XML για την κωδικοποίηση δεδομένων, επιτρέπει την απομακρυσμένη διαμόρφωση, παρακολούθηση και διαχείριση δικτυακών συσκευών. Χρησιμοποιείται κυρίως στο επίπεδο εφαρμογής (επίπεδο 7 του OSI) και παρέχει έναν τυποποιημένο τρόπο για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συστημάτων μέσω ασφαλών καναλιών.
3. **RESTCONF**: Πρόκειται για μια ελαφριά υλοποίηση του NETCONF, που βασίζεται στο REST API και χρησιμοποιεί JSON για την κωδικοποίηση δεδομένων. Παρέχει έναν απλούστερο τρόπο διαχείρισης και ελέγχου δικτυακών συσκευών, επιτρέποντας την επικοινωνία μέσω HTTP. Ανήκει επίσης στο επίπεδο εφαρμογής του OSI, καθιστώντας το πιο εύχρηστο για εφαρμογές cloud και διαδικτυακές πλατφόρμες.

4. **OVSDB (OpenvSwitch Database Management Protocol):** Το OVSDB είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των OpenvSwitch συσκευών, επιτρέποντας την αποθήκευση και διαχείριση ρυθμίσεων των εικονικών switch μέσω μιας βάσης δεδομένων.

Τα παραπάνω πρωτόκολλα καλύπτουν διαφορετικές πτυχές της λειτουργίας και της διαχείρισης του δικτύου, προσφέροντας δυνατότητες για κεντρικό έλεγχο, διαμόρφωση, παρακολούθηση και ασφαλή διαχείριση των πόρων. Αν και κάθε πρωτόκολλο έχει εξειδικευμένες λειτουργίες, η συνεργασία τους εξασφαλίζει την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία των SDN υποδομών. Αυτά τα πρωτόκολλα μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικά επίπεδα του μοντέλου OSI, ανάλογα με τις λειτουργίες τους, ενισχύοντας την ευελιξία και την επεκτασιμότητα των δικτύων.

1.2.4 OpenFlow

Από τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα της προηγούμενης παραγράφου αξίζει ιδιαίτερα να σταθούμε στο OpenFlow [17]. Αυτό αναπτύχθηκε ως ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας στο πλαίσιο της τεχνολογίας SDN, το οποίο αναδιαμορφώνει τον τρόπο λειτουργίας των δικτύων. Αναλαμβάνει τον έλεγχο του δικτύου από ένα κεντρικό σημείο, γνωστό ως ελεγκτής (controller), αντί για την παραδοσιακή διάθεση του ελέγχου στις διακριτές δικτυακές συσκευές. Με τη χρήση του, ο ελεγκτής μπορεί να διαχειρίζεται την κίνηση δεδομένων και να εφαρμόζει πολιτικές δικτύου μέσω προγραμματιζόμενων ροών δεδομένων στις δικτυακές συσκευές. Αυτό επιτρέπει την ευελιξία, τη δυναμική προσαρμογή και την εξυπηρέτηση πολύπλοκων απαιτήσεων δικτύου. Το πρωτόκολλο αυτό έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των κέντρων δεδομένων, των επικοινωνιών στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της επιχειρησιακής δικτύωσης. Επίσης διευκολύνει την ανάπτυξη και τη δοκιμή νέων δικτυακών εφαρμογών και υπηρεσιών, επιτρέποντας την εκτέλεσή τους σε περιβάλλοντα που περιλαμβάνουν εικονικές και φυσικές υποδομές.

Κύριος σκοπός του είναι να καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο ελεγκτής μπορεί να διαχειριστεί και να ελέγξει τις δικτυακές συσκευές, επιτρέποντας την δυναμική διαμόρφωση των ροών δεδομένων και την εφαρμογή πολιτικών δικτύου μέσω ενός κεντρικού σημείου ελέγχου. Ουσιαστικά, διευκολύνει τη διαχείριση και τον έλεγχο του δικτύου, καθιστώντας το πιο ευέλικτο και εύκολο στην προσαρμογή σε νέες απαιτήσεις και σενάρια λειτουργίας.

Υπάρχουν τρεις τρόποι επικοινωνίας στο πρωτόκολλο OpenFlow και είναι οι εξής [18]:

1. Controller-to-Switch Communication (Επικοινωνία Ελεγκτή προς Διακόπτη):

Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας είναι ασύμμετρος και επιτρέπει στον ελεγκτή να στέλνει εντολές στους διακόπτες για τη διαμόρφωση τους και τη διαχείριση των ροών δεδομένων.

2. Asynchronous Communication (Ασύμμετρη Επικοινωνία): Αυτή η επικοινωνία ξεκινά από τον διακόπτη και αποστέλλει μηνύματα προς τον ελεγκτή, όπως μηνύματα πακέτων, μηνύματα κατάστασης θύρας και μηνύματα αφαίρεσης ροής.

3. Symmetric Communication (Συμμετρική Επικοινωνία): Σε αυτήν την περίπτωση, δεν υπάρχει περιορισμός σχετικά με το ποιος προκαλεί την ανταλλαγή μηνυμάτων. Παραδείγματα ανταλλαγής μηνυμάτων είναι τα hello και echo, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση προβλημάτων στη σύνδεση διακόπτη-ελεγκτή.

1.2.5 P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors)

Η P4 είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου που σχεδιάστηκε για τον προγραμματισμό των δικτυακών συσκευών, όπως switches και routers. Επιτρέπει την ακριβή καθοδήγηση για τον τρόπο επεξεργασίας των πακέτων σε κάθε στάδιο της διαδρομής τους μέσω του δικτύου. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα, η P4 προσφέρει μεγάλη ευελιξία και δυνατότητα προσαρμογής, επιτρέποντας στους διαχειριστές δικτύων να καθορίζουν τις λειτουργίες των δικτυακών συσκευών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έχει σχεδιαστεί με σκοπό να είναι ανεξάρτητη από τα πρωτόκολλα και τις συσκευές. Αυτό σημαίνει ότι οι οδηγίες που γράφονται σε P4 μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε υποστηριζόμενη πλατφόρμα, καθιστώντας την ιδανικό εργαλείο για την ανάπτυξη και την εφαρμογή προσαρμοσμένων πρωτοκόλλων και λειτουργιών δικτύου. Οι κύριες αρχές της P4 περιλαμβάνουν την ανεξαρτησία από πρωτόκολλα, τα προγραμματιζόμενα στάδια επεξεργασίας και την ευελιξία και επεκτασιμότητα. Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν τα διάφορα στάδια επεξεργασίας των πακέτων, από την ανάλυση κεφαλίδων (header parsing) μέχρι την εφαρμογή κανόνων προώθησης.

Η συγκεκριμένη γλώσσα παρέχει μια σειρά από δυνατότητες που την καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμη για τον προγραμματισμό και την προσαρμογή των δικτύων. Αυτές περιλαμβάνουν τον ορισμό κεφαλίδων, τη δημιουργία πινάκων αναζήτησης που καθορίζουν τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν βάσει των περιεχομένων των κεφαλίδων

των πακέτων, και την καθοδήγηση συγκεκριμένων δράσεων που θα εκτελούνται για τα πακέτα που ταιριάζουν με τις εγγραφές στους πίνακες αναζήτησης. Επιτρέπει επίσης την προσαρμοσμένη επεξεργασία των πακέτων, όπως η τροποποίηση των κεφαλίδων ή η απόρριψη πακέτων. Αν και δεν είναι άμεσα συνδεδεμένη με ένα συγκεκριμένο επίπεδο του μοντέλου OSI, μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιείται. Στο Επίπεδο 2 (Σύνδεση Δεδομένων), η P4 μπορεί να προγραμματίσει switches για την προσαρμοσμένη προώθηση πακέτων εντός τοπικών δικτύων (LANs). Στο Επίπεδο 3 (Δικτύου), η P4 μπορεί να καθορίσει τη δρομολόγηση πακέτων, επιτρέποντας την εφαρμογή σύνθετων πολιτικών δρομολόγησης και ασφάλειας. Παρόλο που η κύρια εφαρμογή της P4 είναι στα κατώτερα επίπεδα, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή της επεξεργασίας πακέτων σε επίπεδο μεταφοράς (Επίπεδο 4).

Η χρήση της P4 προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η προσαρμοστικότητα, η καινοτομία και η αποτελεσματικότητα. Οι διαχειριστές δικτύων μπορούν να προσαρμόζουν τις λειτουργίες των δικτυακών συσκευών για να ανταποκριθούν σε νέες προκλήσεις και απαιτήσεις. Επιτρέπει την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων και λειτουργιών που μπορεί να μην υποστηρίζονται από τα παραδοσιακά συστήματα, ενώ η δυνατότητα λεπτομερούς ελέγχου της επεξεργασίας πακέτων μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποιημένες και πιο αποδοτικές λειτουργίες δικτύου. Αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση των προγραμματιζόμενων και ευέλικτων δικτύων, επιτρέποντας στους διαχειριστές να έχουν μεγαλύτερο έλεγχο και να προσαρμόζουν τις λειτουργίες των δικτυακών τους συσκευών ανάλογα με τις ανάγκες τους. Με τη χρήση της, τα δίκτυα μπορούν να γίνουν πιο δυναμικά, αποδοτικά και προσαρμοστικά, ανταποκρινόμενα καλύτερα στις απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών και υπηρεσιών.

[\[19\]](#) [\[20\]](#)

1.3 Εξισορρόπηση φορτίου

Η Ισορροπία Φορτίου (Load Balancing - LB) είναι μια στρατηγική που χρησιμοποιεί πολλούς πόρους για να χειριστεί μια μόνο εργασία, προκειμένου να αποτρέψει την υπερφόρτωση του δικτύου. Συγκεκριμένα, η ισορροπία φορτίου στοχεύει στο να ελαχιστοποιήσει την ροή δεδομένων και τον χρόνο απόκρισης, βελτιώνοντας την κυκλοφορία του δικτύου. Αυτή η τεχνική διανέμει την κίνηση δικτύου σε ένα σύνολο διακομιστών για να βελτιώσει την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Χρησιμοποιεί

εργαλεία - είτε φυσικά είτε εικονικά - για να αναγνωρίσει σε πραγματικό χρόνο ποιος διακομιστής, από ένα σύνολο διακομιστών, μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα σε ένα συγκεκριμένο αίτημα πελάτη, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι η έντονη κίνηση δεν τον επιβαρύνει υπερβολικά, ανακατευθύνοντας το φορτίο σε έναν άλλον διακομιστή.

Στα συμβατικά δίκτυα, οι στρατηγικές ισορροπίας φορτίου είναι γνωστές για την ανακρίβειά τους. Ωστόσο, στα δίκτυα SDN, η ισορροπία φορτίου χαρακτηρίζεται από την ακρίβεια και την υψηλή απόδοσή της. Στο SDN, οι ελεγκτές λογισμικού διαχειρίζονται δυναμικά την κατανομή του φορτίου μεταξύ των διακομιστών και των πόρων του δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου [21].

Η διαδικασία της ισορροπίας φορτίου χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, γνωστές ως Layer 4 και Layer 7, στο πλαίσιο του μοντέλου επικοινωνίας OSI (Ανοιχτά Συστήματα Διασύνδεσης).

- **Layer 4 Load Balancing**

Οι εξισορροπητές φορτίου Layer 4 (επίπεδο μεταφοράς) διαχειρίζονται την κίνηση με βάση τα δεδομένα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, λαμβάνουν αποφάσεις βάσει των διευθύνσεων IP των πακέτων και των αριθμών θύρας TCP ή UDP. Αυτό σημαίνει ότι εξετάζουν πληροφορίες που βρίσκονται στο επίπεδο μεταφοράς του μοντέλου OSI και κατευθύνουν τα πακέτα προς τον κατάλληλο διακομιστή χωρίς να εξετάζουν το περιεχόμενο των πακέτων. Οι βασικές λειτουργίες που περιλαμβάνουν είναι να:

- Χρησιμοποιούν τις διευθύνσεις IP πηγής και προορισμού για να καθορίσουν σε ποιον διακομιστή θα σταλούν τα δεδομένα.
- λαμβάνουν υπόψη τους αριθμούς θύρας για να διανέμουν την κίνηση σε διαφορετικούς διακομιστές που εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές ή υπηρεσίες.

Οι εξισορροπητές Layer 4 είναι συνήθως πιο γρήγοροι από τους Layer 7, καθώς δεν χρειάζεται να επεξεργαστούν το περιεχόμενο των πακέτων. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για απλές εφαρμογές όπου η ταχύτητα είναι κρίσιμη.

- **Layer 7 Load Balancing**

Οι εξισορροπητές φορτίου Layer 7 (επίπεδο εφαρμογής) λαμβάνουν αποφάσεις βάσει χαρακτηριστικών στο επίπεδο εφαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι εξετάζουν το περιεχόμενο

των πακέτων για να καθορίσουν πώς θα διανέμουν την κίνηση. Οι λειτουργίες τους περιλαμβάνουν:

- Πληροφορίες κεφαλίδας HTTP στις οποίες χρησιμοποιούν πληροφορίες από την κεφαλίδα των αιτημάτων HTTP για να αποφασίσουν πού θα κατευθύνουν την κίνηση. Για παράδειγμα, μπορούν να δρομολογήσουν αιτήματα βάσει του URL ή του τύπου του περιεχομένου.
- Cookies, τα οποία χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν συνεδρίες χρηστών σε έναν συγκεκριμένο διακομιστή, εξασφαλίζοντας ότι όλες οι αιτήσεις από τον ίδιο χρήστη κατευθύνονται στον ίδιο διακομιστή.
- Ανάλυση περιεχομένου των πακέτων για να λάβουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με το πού θα σταλούν τα δεδομένα.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι ενώ οι εξισορροπητές φορτίου Layer 7 είναι πιο διαδεδομένοι λόγω της ευελιξίας τους και της δυνατότητάς τους να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει περιεχομένου, οι εξισορροπητές φορτίου Layer 4 εξακολουθούν να έχουν αρκετή δημοτικότητα, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η απλότητα και η ταχύτητα είναι πιο σημαντικές από την ευελιξία.

1.3.1 Εισαγωγή στην ισορροπία φορτίου σε δίκτυα SDN

Ο κύριος σκοπός της εξισορρόπησης φορτίου είναι το να παρέχει μια υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS) για το SDN δίκτυο από άκρο σε άκρο. Ως αποτέλεσμα, η συνολική αποδοτικότητα και επίδοση του συστήματος θα βελτιωθούν αποτρέποντας την υπερβολική καθυστέρηση και έτσι στο χρήστη θα παρέχεται μια καλύτερη εμπειρία χρήσης. Για αυτό λοιπόν το SDN LB στοχεύει στη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων όπως σύνδεση, εύρος ζώνης και χρήση μνήμης και ταυτόχρονα της βελτίωσης βασικών μετρικών του QoS όπως:

- 1) Μείωση της καθυστέρησης: Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι μια μετρική που δείχνει τη συμφόρηση της σύνδεσης και την κατάσταση φόρτωσης του διακόπτη. Ως αποτέλεσμα, ο SDN ελεγκτής πρέπει να παρακολουθεί τόσο την ποσότητα των απεσταλμένων bytes όσο και το ρυθμό με τον οποίο αυτά αποστέλλονται. Αυτή η μεταβλητή πρέπει να μειωθεί.
- 2) Μείωση του χρόνου απόκρισης: Ο χρόνος που απαιτείται για μια αίτηση εξυπηρέτησης από τη στιγμή που λαμβάνεται μέχρι τη στιγμή που απαντάται. Ως αποτέλεσμα, είναι ο

χρόνος που απαιτείται για ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο LB να αντιδράσει σε ένα διασπαρμένο SDN δίκτυο. Αυτή η τιμή πρέπει να είναι το χαμηλότερο δυνατό.

3) Αποφυγή των bottlenecks: Οι μέθοδοι LB πρέπει να χρησιμοποιούνται για να διανείμουν το φορτίο ομοιόμορφα σε πολλούς διακόπτες/ελεγκτές ώστε κανένας από αυτούς να μην υπερφορτωθεί. Αυτό επιτρέπει επίσης την αντιμετώπιση αποτυχιών, την επεκτασιμότητα, την αποφυγή στενοχωριών και τη μείωση του χρόνου απόκρισης.

4) Μεγιστοποίηση του εύρους ζώνης: Ένα δίκτυο υψηλής απόδοσης πρέπει να έχει υψηλό εύρος ζώνης, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων εργασίας και των πόρων μεταξύ των κόμβων.

Η εξισορρόπηση φορτίου αποτελεί μία κρίσιμη διαδικασία στη διαχείριση των δικτύων, διασφαλίζοντας την ομαλή και αποτελεσματική διανομή της κυκλοφορίας δικτύου μεταξύ πολλαπλών διακομιστών ή πόρων. Αυτή η διαδικασία συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου, στην αποφυγή υπερφόρτωσης των διακομιστών και στη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας χρήστη. Η εξισορρόπηση φορτίου είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα με υψηλή ζήτηση, όπως κέντρα δεδομένων, εφαρμογές νέφους και υπηρεσίες διαδικτύου, όπου η σταθερότητα και η αποτελεσματικότητα του συστήματος είναι κρίσιμες.

Οι τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου μπορούν να υλοποιηθούν τόσο σε υλικό (hardware) όσο και σε λογισμικό (software), ενώ η ανάπτυξη των SDN δικτύων έχει ανοίξει νέους ορίζοντες στη δυναμική και προσαρμοστική κατανομή του φορτίου. Τα SDN επιτρέπουν τον κεντρικό έλεγχο και την προγραμματιστική διαχείριση των πόρων δικτύου, διευκολύνοντας την ταχύτερη απόκριση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου και την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Όπως θα εξετασθεί και παρακάτω, η εξισορρόπηση φορτίου περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους και αλγορίθμους, που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει της αρχιτεκτονικής εφαρμογής τους (κεντρική ή κατανεμημένη) και της φύσης τους (στατική ή δυναμική). Οι κεντρικές αρχιτεκτονικές βασίζονται σε έναν κεντρικό ελεγκτή που διαχειρίζεται την κατανομή του φορτίου, ενώ οι κατανεμημένες αρχιτεκτονικές επιτρέπουν στους επιμέρους κόμβους να λαμβάνουν αποφάσεις ανεξάρτητα. Η στατική εξισορρόπηση φορτίου χρησιμοποιεί προκαθορισμένους κανόνες για την κατανομή του φορτίου, ενώ η δυναμική

εξισορρόπηση προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου.

Τα Software-Defined Networks (SDN) προσφέρουν μια νέα προοπτική στην ισορροπία φορτίου, επιτρέποντας την κεντρική διαχείριση και τον προγραμματισμό των ροών δεδομένων μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή. Η αρχιτεκτονική τους **διαχωρίζει** το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων, επιτρέποντας στους διαχειριστές δικτύων να εφαρμόζουν δυναμικούς και προσαρμόσιμους αλγορίθμους ισορροπίας φορτίου που ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο στις αλλαγές στην κυκλοφορία και στις συνθήκες του δικτύου.

Η εισαγωγή της ισορροπίας φορτίου στα δίκτυα αυτά επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου, τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών (QoS) και την αύξηση της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας του δικτύου. Με τη χρήση πρωτοκόλλων όπως το OpenFlow, οι διαχειριστές μπορούν να καθορίσουν λεπτομερώς τις ροές δεδομένων και να εφαρμόσουν πολιτικές ισορροπίας φορτίου που ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες ανάγκες των εφαρμογών και των χρηστών.

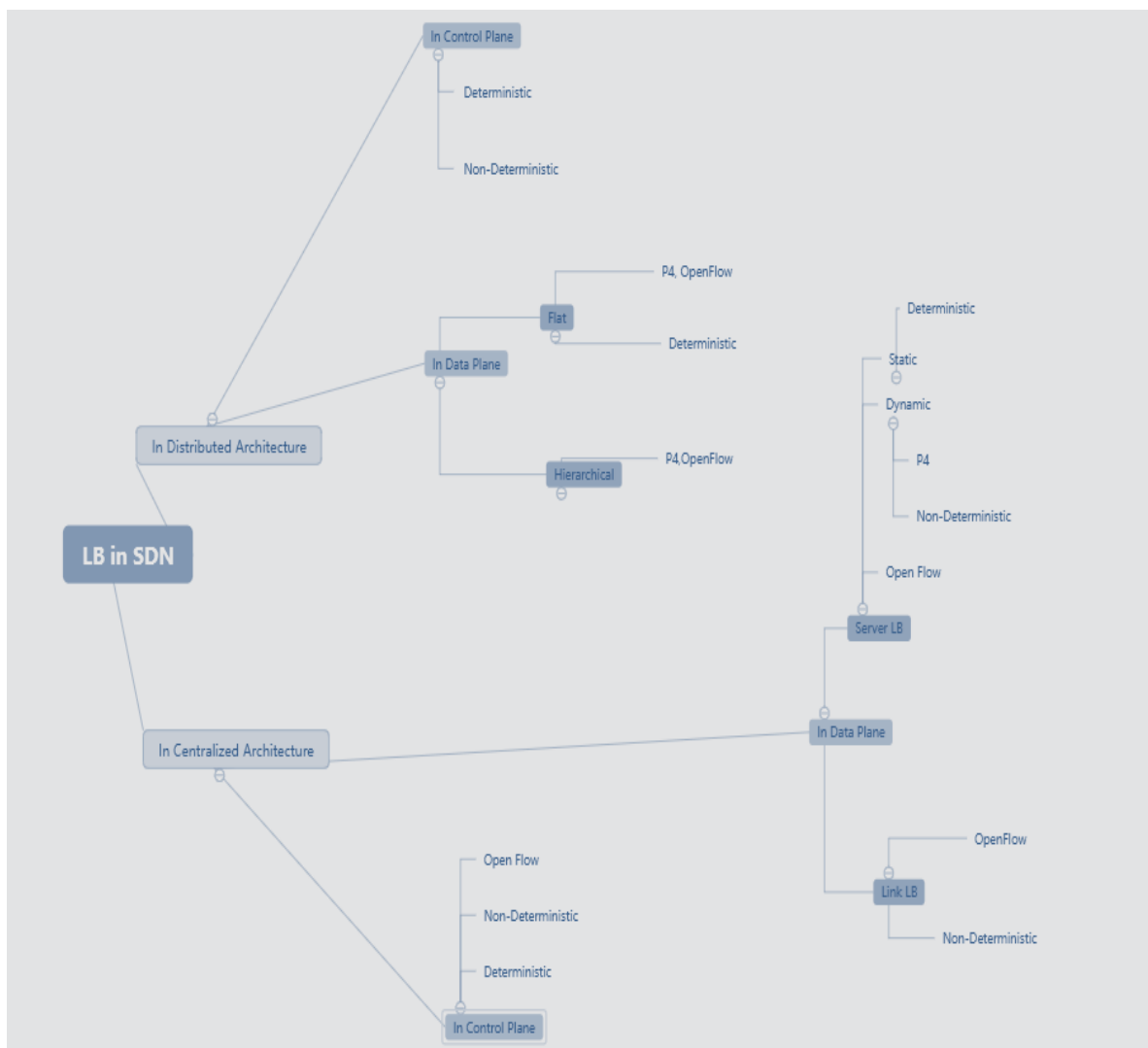
1.3.2 Τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στα SDN δίκτυα

Όπως έχει ήδη τονισθεί προηγουμένως η ισορροπία φορτίου αναφέρεται στη διαδικασία διανομής της εισερχόμενης κίνησης δικτύου σε πολλούς διακομιστές ή πόρους δικτύου. Ο στόχος της ισορροπίας φορτίου είναι να βελτιστοποιήσει τη χρήση των πόρων, να μεγιστοποιήσει το throughput, να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο απόκρισης και να εξασφαλίσει την υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία των υπηρεσιών δικτύου. Με τη διανομή της κίνησης ομοιόμορφα μεταξύ διακομιστών ή πόρων, η ισορροπία φορτίου βοηθά στην αποτροπή του ενδεχόμενου επιβάρυνσης ενός μεμονωμένου διακομιστή ή στοιχείου δικτύου με αιτήσεις, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση και κλιμακοσιμότητα της υποδομής δικτύου.

Διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει τεχνικές για την εξισορρόπηση φορτίου στα δίκτυα SDN. Οι **Neghabi et al.**[22] κατηγοριοποιούν τους αλγόριθμους εξισορρόπησης φορτίου σε ντετερμινιστικούς και μη ντετερμινιστικούς, αξιολογώντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε κατηγορίας με βάση 19 μετρικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση ενός δικτύου. Η σύγκριση αυτή προσφέρει μια ολοκληρωμένη ανάλυση της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων αυτών. Αντίστοιχα, οι **Karakus et al.**[23] εστιάζουν στην αξιολόγηση αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου από την πλευρά

της **QoS**, τονίζοντας την ανάγκη για βέλτιστη απόδοση σε υπηρεσίες όπως websurfing, VoIP, streaming και online gaming. Τέλος, οι **Lin Li et al.[24]** προτείνουν μια διαφορετική προσέγγιση, κατατάσσοντας την εξισορρόπηση φορτίου ανάλογα με την αρχιτεκτονική του δικτύου **SDN**. Στην κεντροποιημένη αρχιτεκτονική, η εξισορρόπηση μπορεί να αφορά είτε το **dataplane** (μέσω διακομιστών ή συνδέσμων) είτε το **controlplane**, ενώ στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική μπορεί να αφορά αρχιτεκτονικές με επίπεδους ή ιεραρχικά κατανεμημένους ελεγκτές

Μια σχηματική απεικόνιση των υφιστάμενων τεχνικών κατανομής φορτίου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



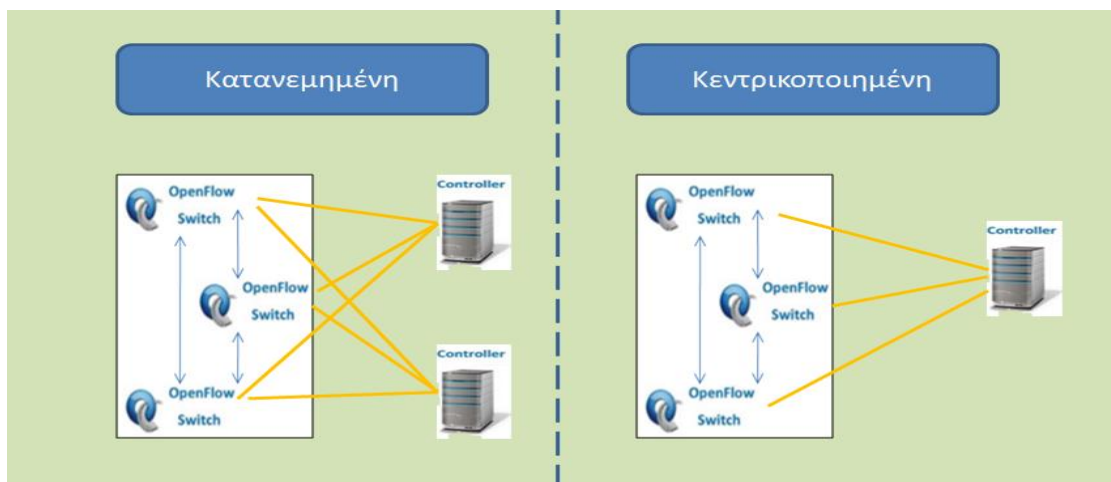
Εικόνα 1.4 Κατηγοριοποίηση τεχνικών LB στο SDN

Ως **κεντρική αρχιτεκτονική** (centralized architecture) ορίζουμε μια δομή όπου ο έλεγχος και οι αποφάσεις για τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων λαμβάνονται από ένα

κεντρικό σημείο ή οντότητα. Στα δίκτυα SDN , αυτή η αρχιτεκτονική συνήθως αναφέρεται στην κεντρική διαχείριση του δικτύου μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή (controller).Αυτός είναι υπεύθυνος για τη λήψη των αποφάσεων δρομολόγησης και τη διαχείριση των ροών κυκλοφορίας δεδομένων σε ολόκληρο το δίκτυο. Οι επιμέρους συσκευές στο δίκτυο (όπως δρομολογητές και διακόπτες) εκτελούν εντολές που λαμβάνουν από τον ελεγκτή.

Η αρχιτεκτονική αυτή προσφέρει πλεονεκτήματα όπως την ευελιξία, την απλοποίηση της διαχείρισης του δικτύου, και τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής στις ανάγκες της εφαρμογής ή του δικτύου. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν προκλήσεις όπως η επιβάρυνση του ελεγκτή όταν το δίκτυο γίνεται πολύ μεγάλο ή πολύπλοκο, καθώς και ζητήματα ασφαλείας που προκύπτουν από το γεγονός ότι ο ελεγκτής αναλαμβάνει τον έλεγχο ολόκληρου του δικτύου.

Επίσης δεν μπορεί να μην αναφερθεί το γεγονός ότι ο **κεντρικός ελεγκτής** μπορεί δυνητικά να θεωρηθεί ένα επισημασμένο σημείο αποτυχίας και μπορεί να περιορίζει την επεκτασιμότητα του δικτύου . Ένας μόνο ελεγκτής ενδέχεται να μην είναι αρκετός για ένα δίκτυο με μεγάλο αριθμό εξοπλισμού. Πολλά από τα διακεκριμένα κέντρα δεδομένων περιλαμβάνουν πολλούς χιλιάδες διακομιστές και εξοπλισμό προώθησης σε πολύπλοκες τοπολογίες που δεν είναι εύκολο να διαχειριστεί ένας μόνο κεντρικός ελεγκτής.



Εικόνα 1.5 Κατανεμημένη και κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική

Σε αντίθεση με έναν κεντρικό ελεγκτή, ένα **κατανεμημένο λειτουργικό σύστημα δικτύου** (NOS) μπορεί να επεκταθεί για να ανταποκριθεί σε διαφορετικές απαιτήσεις, από μικρά έως μεγάλα δίκτυα. Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική αντιπροσωπεύει μια προσέγγιση όπου ο έλεγχος και οι αποφάσεις δρομολόγησης είναι κατανεμημένα σε πολλαπλές συσκευές

στο δίκτυο, αντί να επικεντρώνονται σε έναν μοναδικό ελεγκτή. Στη δομή αυτή, οι συσκευές δικτύου, όπως δρομολογητές και διακόπτες, έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν τις αποφάσεις δρομολόγησης με βάση τοπικές πληροφορίες και πολιτικές.

Οι καταναμεμημένοι ελεγκτές προτείνονται στο SDN για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις της αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας που προκύπτουν με έναν κεντρικό ελεγκτή. Για να διατηρηθεί η συνοχή του δικτύου και να λειτουργεί συνεργατικά, κάθε ελεγκτής μπορεί να επικοινωνεί με άλλους χρησιμοποιώντας τα API Eastbound/Westbound. Ένας καταναμεμημένος ελεγκτής μπορεί να είναι είτε ένα κεντρικό σύνολο οντοτήτων είτε μια φυσικά καταναμεμημένη σειρά οντοτήτων. Επιπλέον, το OpenFlow επιτρέπει τη σύνδεση της συσκευής προώθησης σε πολλούς ελεγκτές ταυτόχρονα, επιτρέποντας σε άλλους ελεγκτές να λειτουργούν ως εφεδρικοί σε περίπτωση βλάβης.

Η καταναμεμημένη αρχιτεκτονική μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα όπως μειωμένη επιβάρυνση στο δίκτυο εξαιτίας της ανάληψης αποφάσεων σε τοπικό επίπεδο, μεγαλύτερη αντοχή σε αποτυχίες επειδή δεν υπάρχει ένα σημείο αποτυχίας και αυξημένη ευελιξία σε ορισμένες περιπτώσεις. Ωστόσο, μπορεί να είναι πιο περίπλοκη στην υλοποίηση και τη διαχείριση σε σχέση με την κεντρική αρχιτεκτονική και ενδέχεται να απαιτεί επαρκή συγχρονισμό και διαχείριση πόρων για να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε μεγάλη κλίμακα.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της καταναμεμημένης αρχιτεκτονικής είναι η ανοχή σφαλμάτων, όπου μια αποτυχία μιας συσκευής αντιμετωπίζεται από γειτονικές συσκευές. Σε αυτού του είδους τα δίκτυα μπορεί να εμφανίζονται οι όροι "master" και "slave" μεταξύ των διακομιστών ή άλλων συσκευών. Συνήθως, ο διακομιστής που αναλαμβάνει τον έλεγχο και τη διαχείριση των άλλων διακομιστών ή πόρων στο δίκτυο ονομάζεται "master", ενώ οι υπόλοιποι διακομιστές που λαμβάνουν εντολές και υποβάλλουν αιτήματα στον "master" ονομάζονται "slaves". Αυτή η δομή χρησιμοποιείται για την οργάνωση και τον συγχρονισμό των εργασιών και των πόρων σε ένα καταναμεμημένο περιβάλλον.

Αν ξαναγυρίσουμε τώρα στην **κεντρική αρχιτεκτονική** [25] και εξετάσουμε τις λύσεις που προσφέρονται είναι είτε μέσω του επιπέδου δεδομένων είτε μέσω του επιπέδου ελέγχου.

Για το **επίπεδο δεδομένων (Data Plane)** έχουμε τον διαχωρισμό σε:

- **Link Load Balancing (Ισορροπία φορτίου διασύνδεσης)**

Η ισορροπία φορτίου διασύνδεσης (Link Load Balancing) στοχεύει στη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων συνδέσεων δικτύου. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές στρατηγικές για την ισορροπία φορτίου στις διασυνδέσεις, επιτρέποντας την πιο αποδοτική διανομή των πόρων και την αποφυγή των προβλημάτων συμφόρησης. Παρακάτω παρατίθενται οι τρεις βασικές κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται οι κυριότεροι αλγόριθμοι του συγκεκριμένου είδους εξισορρόπησης φορτίου:

1. Μετα-ευρετικοί Αλγόριθμοι

Equal-Cost Multi-Path (ECMP) [26]: κατανέμει τις ροές μέσω των πιο διαθέσιμων διαδρομών χρησιμοποιώντας κατακερματισμό ροών, αλλά έχει περιορισμούς όταν μεγάλες ροές προσπαθούν να μοιραστούν την ίδια θύρα εξόδου, προκαλώντας συμφόρηση. Για να ξεπεραστεί αυτό, οι μεγάλες ροές (elephant flows) μπορούν να ανιχνευθούν και να κατευθύνονται από τον κεντρικό ελεγκτή, ενώ οι μικρές ροές (mice flows) ακολουθούν τις στατικές διαδρομές του ECMP. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση μπορεί να επιφέρει αυξημένη κατανάλωση εύρους ζώνης και επεξεργαστικής ισχύος στους μεταγωγείς και τους τερματικούς υπολογιστές.

Ant Colony Optimization (ACO) [27]: για να βελτιωθεί η δρομολόγηση ροών, λαμβάνεται υπόψη η ποιότητα εμπειρίας (QoE). Οι πληροφορίες για τη συνεδρία του χρήστη αποστέλλονται από την εφαρμογή SDN στον ελεγκτή, ο οποίος ενεργοποιεί τον αλγόριθμο ACO σε έναν γράφο με βάρη, τα οποία καθορίζουν την καθυστέρηση και την απώλεια δεδομένων μεταξύ των συσκευών του δικτύου.

2. Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης:

Maximum Probability Fitting (MPF) [28]: Χρησιμοποιεί ένα μοντέλο πολυωνυμικής λογιστικής (MNL). Ο αλγόριθμος MPF επιλέγει μια πιθανοτική αναδρομολόγηση για κάθε ροή και είναι απίθανο να καταλείψει την κίνηση στον ίδιο σύνδεσμο.

Critical Flow Rerouting Reinforcement Learning Scheme (CFR-RL) [29]: ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ενίσχυση μάθησης για να επιλέξει και να αναδρομολογήσει κρίσιμες ροές, χωρίς να βασίζεται σε κανόνες ή ευρετικούς αλγόριθμους. Ο CFR-RL επιτυγχάνει σχεδόν βέλτιστη απόδοση αναδρομολογώντας μόνο ένα μικρό μέρος της κυκλοφορίας και γενικεύει καλά σε νέους πίνακες κυκλοφορίας.

3. Άλλοι αλγόριθμοι

Οι Da Silva, Storck κ.α [30] προτείνουν έναν αλγόριθμο που αλλάζει δυναμικά τις ροές των συνδέσμων καθώς αυξάνεται η χρησιμοποίηση του δικτύου. Βρίσκει τις συντομότερες διαδρομές και υπολογίζει το κόστος του συνδέσμου, επιλέγοντας τον καλύτερο σύνδεσμο αφού εντοπίσει τα σημεία συμφόρησης. Αυτό μειώνει την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων σε σενάρια συμφόρησης δικτύου.

Link Bandwidth Algorithm (LBLB) [31]: Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τα σημεία συμφόρησης και τον μέσο όρο του υπολειπόμενου εύρους ζώνης των συνδέσμων στη διαδρομή για να αποφεύγει τους βαρύνοντες συνδέσμους.

- **Server Load Balancing (Ισορροπία φόρτου διακομιστή)**

Αυτή μπορούμε να τη διακρίνουμε σε δυο κατηγορίες όπου η κάθε μια έχει τα δικά της χαρακτηριστικά αλλά και τους δικούς της αλγορίθμους οι οποίοι ενδείκνυνται ως επί το πλείστον για την κάθε κατηγορία:

Στατικοί αλγόριθμοι κατανομής φορτίου:

Οι αλγόριθμοι στατικής ισορροπίας φορτίου διανέμουν τις εργασίες χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Ένας στατικός ισορροπιστής φορτίου δεν θα γνωρίζει ποιοι διακομιστές λειτουργούν αργά και ποιοι διακομιστές δεν χρησιμοποιούνται αρκετά. Αντίθετα, αναθέτει τις εργασίες βασιζόμενος σε ένα προκαθορισμένο σχέδιο. Η στατική ισορροπία φορτίου είναι γρήγορη στην εγκατάσταση, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε ανεπάρκειες.

Έτσι λοιπόν αυτοί εφαρμόζουν μια σταθερή, προκαθορισμένη μέθοδο για την κατανομή του φορτίου σε διάφορους προορισμούς στο δίκτυο, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη δυναμικές μεταβολές στην κίνηση του δικτύου ή στις απαιτήσεις των υπηρεσιών. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός στατικού αλγορίθμου κατανομής φορτίου είναι ότι η κατανομή του φορτίου γίνεται με βάση σταθερούς κανόνες ή παραμέτρους που έχουν προκαθοριστεί κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος δεν προσαρμόζεται δυναμικά σε αλλαγές στις συνθήκες του δικτύου, όπως η αύξηση της κίνησης ή η αποτυχία ενός δικτυακού κόμβου. Αντί αυτού, η κατανομή του φορτίου παραμένει σταθερή μέχρι να γίνουν επανεξετάσεις και αλλαγές στη διαμόρφωση του

συστήματος. Τέτοιοι αλγόριθμοι περιλαμβάνουν τον **Round Robin** και τον **Least Connections**.

Δυναμικοί αλγόριθμοι κατανομής φορτίου:

Οι δυναμικοί αλγόριθμοι ισορροπίας φορτίου λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα διαθεσιμότητα, το φορτίο εργασίας και την κατάσταση υγείας κάθε διακομιστή. Έχουν τη δυνατότητα να ανακατευθύνουν την κίνηση από υπερφορτωμένους ή αποδοτικά αδύναμους διακομιστές σε αυτούς με χαμηλότερη χρήση, διατηρώντας μια ισορροπημένη και αποτελεσματική κατανομή. Ωστόσο, η δυναμική ισορροπία φορτίου είναι πιο περίπλοκη στη διαμόρφωση. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των διακομιστών, όπως η υγεία και η συνολική χωρητικότητα του κάθε διακομιστή και το μέγεθος των εργασιών που διανέμονται.

Οι δυναμικοί αλγόριθμοι ισορροπίας φορτίου περιλαμβάνουν διάφορους τύπους, όπως ο αλγόριθμος λιγότερων συνδέσεων (Least Connections), ο αλγόριθμος με βάρη λιγότερων συνδέσεων (weighted least connection) , βασισμένος σε πόρους (resource-based) και βασισμένος σε γεωγραφική τοποθεσία (geolocation-based load balancing). Τέλος, για την:

Για το επίπεδο ελέγχου (Control Plane) :

μπορούμε να πούμε ότι εφαρμόζεται και στις δύο αρχιτεκτονικές — τόσο στην κεντροποιημένη όσο και στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική.

Στην *κεντροποιημένη αρχιτεκτονική* οι κυριότεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τους:

Equal-Cost Multi-Path (ECMP): Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την κατανομή της κυκλοφορίας σε πολλαπλές διαδρομές με το ίδιο κόστος. Με τη χρήση του ECMP, η κυκλοφορία μοιράζεται ισότιμα ανάμεσα σε πολλές διαθέσιμες διαδρομές, αυξάνοντας την απόδοση και την ανθεκτικότητα του δικτύου.

Weighted Least Connection (WLC): Σε αυτόν τον αλγόριθμο, κάθε σύνδεση λαμβάνει έναν βάρος, το οποίο αναλογεί στην ικανότητά της να διαχειριστεί φορτίο. Η κατανομή του φορτίου γίνεται αναλογικά με τα βάρη των συνδέσεων, εξασφαλίζοντας έτσι ότι οι πιο ισχυρές συνδέσεις αναλαμβάνουν περισσότερα αιτήματα.

Στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική οι κυριότεροι αλγόριθμοι περιλαμβάνουν:

HULA (Hop-by-hop Utilization-aware Load balancing Architecture) [32]: Ο οποίος εφαρμόζει τεχνικές προγραμματισμού των διαδρομών δεδομένων για να επιτρέψει την ισορροπία του φορτίου σε επίπεδο διαδρομής. Χρησιμοποιεί πακέτα ελέγχου για την ανίχνευση και την ανάκτηση πληροφοριών για την κατάσταση των διαδρομών και ενσωματώνει δυναμικά δεδομένα για τη βελτιστοποίηση της κατανομής του φορτίου.

Distributed Hash Table (DHT) [33]: αυτός χρησιμοποιεί κατανεμημένους πίνακες κατακερματισμού για την αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων. Ο αλγόριθμος επιτρέπει την κατανεμημένη αποθήκευση των πληροφοριών δρομολόγησης και τη βελτίωση της επεκτασιμότητας του δικτύου.

Hierarchical Load Balancing: Σε αυτή την προσέγγιση, οι ελεγκτές είναι οργανωμένοι σε ιεραρχικά επίπεδα, με κάθε επίπεδο να διαχειρίζεται διαφορετικά τμήματα του δικτύου. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη οργάνωση και διαχείριση του φορτίου, μειώνοντας την πιθανότητα υπερφόρτωσης σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου.

Hybrid Controller Load Balancing (Υβριδική Αρχιτεκτονική):

Υπάρχουν επίσης προσεγγίσεις που συνδυάζουν στοιχεία από τις κεντροποιημένες και κατανεμημένες αρχιτεκτονικές, όπως:

Adaptive Load Balancing: Προσαρμόζει δυναμικά τις στρατηγικές κατανομής με βάση την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις αλλαγές της κυκλοφορίας και των απαιτήσεων του δικτύου.

Predictive Load Balancing: Χρησιμοποιεί προβλέψεις για τη μελλοντική κατάσταση του δικτύου για τη βέλτιστη κατανομή του φορτίου. Ο αλγόριθμος αυτός αξιοποιεί ιστορικά δεδομένα και τεχνικές πρόβλεψης για να λαμβάνει αποφάσεις κατανομής πριν προκύψουν προβλήματα συμφόρησης.

Κύριο χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω είναι η δυναμική τους προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου και τις ανάγκες των χρηστών. Αυτοί οι αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες όπως η τρέχουσα κίνηση στο δίκτυο, η φόρτωση των εξυπηρετητών, η διαθεσιμότητα των πόρων και άλλες δυναμικές παράμετροι. Αντίθετα με τους στατικούς αλγορίθμους, οι δυναμικοί μπορούν να προσαρμοστούν στις

μεταβαλλόμενες συνθήκες αυξάνοντας ή μειώνοντας την κατανομή του φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική ανταπόκριση στις διακυμάνσεις της κίνησης στο δίκτυο και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των υπηρεσιών. Μερικοί δυναμικοί αλγόριθμοι περιλαμβάνουν τον **Weighted Round Robin**, τον **Least ResponseTime** και τον **Adaptive Load Balancing**.

Το **OpenFlow** παίζει κρίσιμο ρόλο στην εξισορρόπηση φορτίου τόσο στην κεντροποιημένη όσο και στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική των δικτύων SDN. Με την παροχή ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή και των διακοπών, επιτρέπει την δυναμική διαχείριση και δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων, εξασφαλίζοντας βέλτιστη κατανομή των πόρων και αποφυγή σημείων συμφόρησης. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την ευελιξία και την αποδοτικότητα στη λειτουργία των σύγχρονων δικτύων, είτε μέσω κεντρικής είτε μέσω κατανεμημένης διαχείρισης.

Οι **deterministic** και **non-deterministic** μέθοδοι **εξισορρόπησης φορτίου** παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλες τις περιπτώσεις διαχείρισης δικτύων, προσφέροντας μοναδικά πλεονεκτήματα και προσαρμόζοντας τη διαχείριση του φορτίου ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου.

- **Deterministic Methods**

Αυτές οι μέθοδοι παράγουν πάντα τα ίδια αποτελέσματα για τα ίδια δεδομένα εισόδου, προσφέροντας προβλεψιμότητα και σταθερότητα. Σαν παραδείγματα μπορούμε να αναφέρουμε τους:

Round Robin ο οποίος κατανέμει τα αιτήματα κυκλικά στους διαθέσιμους διακομιστές, εξασφαλίζοντας ότι κάθε διακομιστής θα λάβει ίσο μερίδιο αιτημάτων χωρίς να λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα φόρτωση.

Least Connections ο οποίος αντιστοιχεί τα νέα αιτήματα στον διακομιστή με τις λιγότερες ενεργές συνδέσεις, βοηθώντας στην αποφυγή υπερφόρτωσης συγκεκριμένων διακομιστών και διατηρώντας μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου.

- **Non-Deterministic Methods**

Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα με τα ίδια δεδομένα εισόδου λόγω στοιχείων όπως τυχαία επιλογή ή προσαρμοστική μάθηση, προσφέροντας

ευελιξία και δυνατότητα προσαρμογής σε δυναμικές συνθήκες. Παραδείγματα που μπορούν να αναφερθούν είναι:

Reinforcement Learning (RL) ο οποίος χρησιμοποιεί την ενίσχυση μάθησης για να προσαρμόζει δυναμικά τις στρατηγικές κατανομής φορτίου με βάση την απόδοση του δικτύου, επιτρέποντας προσαρμοστική και βελτιστοποιημένη κατανομή του φορτίου.

Neural Networks (NN) που χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη και την κατανομή του φορτίου. Τα νευρωνικά δίκτυα μαθαίνουν από ιστορικά δεδομένα και προβλέπουν την καλύτερη κατανομή αιτημάτων, επιτρέποντας μια πιο προσαρμοστική και ευέλικτη διαχείριση του δικτύου.

Και οι δύο κατηγορίες μεθόδων εφαρμόζονται τόσο στην κεντριοποιημένη όσο και στην κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως η προβλεψιμότητα και η σταθερότητα των deterministic μεθόδων, αλλά και η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα των non-deterministic μεθόδων. Η χρήση τους επιτρέπει την αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου και την αποφυγή σημείων συμφόρησης, βελτιώνοντας έτσι την συνολική απόδοση και ανθεκτικότητα του δικτύου.

1.3.3 Βασικές μετρικές που χρησιμοποιούμε για να αξιολογήσουμε ένα δίκτυο

Η δημιουργία κανόνων προώθησης για τις βασικές κατηγορίες κίνησης είναι ουσιαστική για τη διαχείριση των δικτύων και τη διασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας τους. Οι μετρικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των δικτύων παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα αυτών των κανόνων και να γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές. Αυτές αποτελούν εργαλεία για την αξιολόγηση της απόδοσης, τη βελτιστοποίηση και την ασφάλεια των δικτύων. Επιτρέπουν την αναγνώριση και επίλυση προβλημάτων, τη βελτίωση της αποδοτικότητας, την πρόβλεψη και προληπτική συντήρηση, τη διαχείριση συμφόρησης και τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Επιπλέον, συμβάλλουν στην ανάλυση χρήσης και στην προστασία του δικτύου από ύποπτη δραστηριότητα, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για τη λήψη ενημερωμένων αποφάσεων.

Οι πιο αντιπροσωπευτικές από αυτές είναι [34]: 1. Ταχύτητα Μετάδοσης Δεδομένων (Throughput): Αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία μπορούν να μεταφερθούν δεδομένα από ένα σημείο του δικτύου σε ένα άλλο. Μετριέται συνήθως σε bits ανά δευτερόλεπτο (bps) ή σε μεγαβάτ ανά δευτερόλεπτο (Mbps ή Gbps). Ο τύπος είναι:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Συνολικά δεδομένα μεταφερθέντα}}{\text{χρόνος μετάδοσης}}$$

Όταν όμως έχουμε να κάνουμε με συστήματα υπολογιστών ή δικτύων, η μεγιστοποίηση της απόδοσης σε αυτά συνδέεται με την εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων (όπως επεξεργαστές ή δίκτυα), ώστε να **μεταφερθούν δεδομένα** όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να ορίσουμε ως Throughput τη σχέση:

$$\tilde{y}(N) = c * (1 - \frac{1}{1 + N * \frac{1+\beta}{1-\beta}}), \text{ όπου:}$$

- $\tilde{y}(N)$ είναι το throughput, δηλαδή η απόδοση του συστήματος που αντιπροσωπεύει την ποσότητα των δεδομένων που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου, ή τον αριθμό των εργασιών που ολοκληρώνονται σε σχέση με τους διαθέσιμους πόρους N.
- c είναι η μέγιστη τιμή του throughput, η οποία ορίζει το ανώτατο όριο της απόδοσης του συστήματος όταν λειτουργεί υπό ιδανικές συνθήκες.
- N είναι ο αριθμός των διαθέσιμων πόρων (π.χ. επεξεργαστών, κόμβων ή συνδέσεων δικτύου) που επηρεάζουν τη δυνατότητα του συστήματος να επεξεργαστεί δεδομένα.
- β είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με τη συμφόρηση και τη χρήση των πόρων, και επηρεάζει το ρυθμό με τον οποίο το throughput προσεγγίζει την τιμή c καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πόρων N.

2. Καθυστέρηση [35] (Latency): Η καθυστέρηση μετρά τον χρόνο που απαιτείται για να μετακινηθεί ένα πακέτο δεδομένων σε ένα δίκτυο. Λαμβάνει υπόψη τόσο την καθυστέρηση κατά τη μετάδοση όσο και την καθυστέρηση διάδοσης, που προκύπτει από τη διαδικασία προώθησης του πακέτου. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση, όπου **L** είναι η καθυστέρηση, **Std** και **Dtd** είναι οι καθυστερήσεις μετάδοσης της πηγής και του προορισμού αντίστοιχα, **Sd** αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση του μεταγωγέα (switch delay) και **Pd** αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay).

$$L = Std + Dtd + Sd + Pd$$

Ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής (Round Trip Time - RTT) είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψει ένα πακέτο δεδομένων από την πηγή στον προορισμό του και να επιστρέψει πίσω στην αρχική πηγή. Αποτελεί ένα βασικό μετρικό απόδοσης για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων εξισορρόπησης φορτίου (Load Balancing - LB). Ο RTT υπολογίζεται ως ο μέσος χρόνος μετάβασης και επιστροφής, τόσο

στον διακομιστή (**AVRTTs**) όσο και στον πελάτη (**AVRTTc**). Η σωστή μέτρηση του RTT είναι κρίσιμη, καθώς υπερβολικά μεγάλα χρονικά όρια (timeouts) μπορεί να οδηγήσουν σε αναποτελεσματική λειτουργία του δικτύου όταν ο πραγματικός χρόνος είναι μικρότερος από τον αναμενόμενο.

$$\mathbf{RTT} = \mathbf{AVRTTs} + \mathbf{AVRTTc}$$

3. Απώλεια Πακέτων (PacketLoss): Αφορά το ποσοστό των πακέτων που χάνονται κατά τη μετάδοσή τους μέσω του δικτύου. Η απώλεια πακέτων μπορεί να οφείλεται σε συμφόρηση του δικτύου ή σε προβλήματα σύνδεσης. Ο τύπος είναι:

$$\text{Packet Loss} = \frac{\text{Πακέτα που χάθηκαν}}{\text{Πακέτα που στάλθηκαν}} \times 100\%$$

4. Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter): Είναι η μεταβολή στην καθυστέρηση της μετάδοσης δεδομένων σε ένα δίκτυο. Η υπερβολική θερμική τιμή μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερή και προβλέψιμη καθυστέρηση, όπως η φωνητική και βίντεο τηλεφωνία. Αναφέρεται στην αστάθεια ή την απρόβλεπτη καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων δεδομένων σε ένα δίκτυο. Συνήθως μετριέται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (milliseconds) και είναι ενδεικτική ως προς τη διακύμανση στον χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων από ένα σημείο σε ένα άλλο μέσα στο δίκτυο. Μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της διακύμανσης της κυκλοφορίας στο δίκτυο, της συνήθους καθυστέρησης πακέτων, της υπερφόρτωσης δικτύου και των διακοπών ή διακυμάνσεων στη σύνδεση του δικτύου. Ο τύπος είναι:

$$\text{Jitter} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |(D_{i+1} - D_i)|$$

όπου:

- n είναι ο αριθμός των πακέτων
- D_i είναι ο χρόνος άφιξης του i -οστού πακέτου
- D_{i+1} είναι ο χρόνος άφιξης του επόμενου πακέτου

Αν το χρονικό διάστημα μεταξύ πακέτων διαφέρει σημαντικά, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει υψηλό jitter, που μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση στην ποιότητα των υπηρεσιών που

εξαρτώνται από τη σταθερότητα της καθυστέρησης πακέτων. Μία άλλη εξίσωση που μπορεί να εφαρμοστεί στον υπολογισμό του είναι η :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta T_m)^2}$$

Στην οποία:

- **ΔT_m** : Αντιπροσωπεύει τη **διαφορά στον χρόνο άφιξης** του πακέτου m σε σχέση με τον αναμενόμενο χρόνο άφιξης ή τον προηγούμενο παρόμοιο χρόνο άφιξης. Έτσι, ΔT_m εκφράζει την **απόκλιση στην καθυστέρηση** (latency) από το αναμενόμενο χρονικό διάστημα μεταξύ των πακέτων.
- $\sum_{n=1}^N (\Delta T_m)^2$: ο άθροισμα αυτό υπολογίζει το **τετραγωνικό άθροισμα των αποκλίσεων** των χρόνων άφιξης (καθυστέρηση) από τον αναμενόμενο χρόνο για κάθε πακέτο. Αυτό μας δίνει ένα συνολικό μέτρο του πόσο ασταθής είναι η καθυστέρηση.
- $\frac{1}{N}$:Ο όρος αυτός υπολογίζει τον **μέσο όρο των αποκλίσεων** αυτών, δηλαδή τη μέση διακύμανση των καθυστερήσεων για το σύνολο των πακέτων N.
- **$\lim_{n \rightarrow \infty}$** Το όριο αυτό μας δείχνει ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πακέτων N, η εξίσωση προσεγγίζει την πραγματική μέτρηση του jitter για ένα **μεγάλο πλήθος δεδομένων**, και μας επιτρέπει να μετρήσουμε το πόσο ασταθής είναι η καθυστέρηση σε μακροχρόνια βάση.
- **Τετραγωνική ρίζα**: Η τετραγωνική ρίζα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τη μονάδα μέτρησης σε γραμμική κλίμακα (από τα τετράγωνα των αποκλίσεων), ώστε να εκφράζεται σε μονάδες χρόνου, που είναι πιο κατανοητές.

5. Διαθεσιμότητα (Availability): Αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου που το δίκτυο είναι διαθέσιμο για χρήση. Η διαθεσιμότητα είναι κρίσιμη για εφαρμογές και υπηρεσίες που απαιτούν συνεχή λειτουργία. Ο τύπος είναι:

$$\text{Διαθεσιμότητα} = \frac{\text{Συνολικός χρόνος λειτουργίας}}{\text{Συνολικός χρόνος}} \times 100\%$$

Επιπλέον μετρικές που χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθεί ένα δίκτυο περιλαμβάνουν:

6. Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS): Αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να παρέχει προτεραιότητα και εγγυημένη απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές ή υπηρεσίες.

7. Ασφάλεια Δικτύου (Network Security): Αφορά την προστασία του δικτύου από ανεπιθύμητη πρόσβαση, κακόβουλα προγράμματα και άλλες απειλές ασφάλειας.

8. Διαχειρισσιμότητα (Manageability): Αναφέρεται στην ευκολία με την οποία μπορούν να διαχειριστούν και να συντηρηθούν τα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των εργαλείων διαχείρισης και παρακολούθησης.

9. Διαμόρφωση Δικτύου (Network Configuration): Αφορά τη σωστή διαμόρφωση των ρυθμίσεων του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των IP διευθύνσεων, του subnetting και των διαδρομών δρομολόγησης.

10. Κλιμάκωση (Scalability): Αφορά τη δυνατότητα του δικτύου να αντιμετωπίζει αυξημένο φόρτο και να επεκτείνεται χωρίς να χάνει απόδοση ή λειτουργικότητα.

11. Total Completion Time (T): Ο **συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης (T)** είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία ή την ολοκλήρωση όλων των k εργασιών σε ένα σύστημα. Υπολογίζεται ως το άθροισμα του χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία κάθε εργασίας i με μέγεθος S_i και την ταχύτητα επεξεργασίας V_m , συν ένα σταθερό χρόνο καθυστέρησης N_d , που είναι ανεξάρτητος από τις εργασίες. Δίνεται από τη σχέση $T = \sum_{i=1}^k \frac{S_i}{V_m} + N_d$

12. Execution Cost (C_E): Το **κόστος εκτέλεσης (C_E)** είναι το συνολικό κόστος που προκύπτει από την επεξεργασία όλων των k εργασιών σε ένα σύστημα. Υπολογίζεται με βάση τον χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση κάθε εργασίας i, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος της εργασίας S_i και την ταχύτητα επεξεργασίας V_m . Το κόστος αυτό πολλαπλασιάζεται με το **κόστος ανά μονάδα χρόνου C_s** για να δώσει το συνολικό κόστος της εκτέλεσης.

Δίνεται από τη σχέση $CE = \sum_{i=1}^k \frac{S_i}{V_m} * C_s$

1.4 Η τεχνική LB Round Robin (RR) και αλγόριθμοι με τους οποίους συνδυάζεται

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει το ρόλο του RR στην εξισορρόπηση φορτίου σε σύγχρονα περιβάλλοντα όπως είναι τα δίκτυα SDN. Όμως ο RR δεν είναι και ο μοναδικός αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε για αυτή τη δουλειά αλλά στη σύγχρονη βιβλιογραφία θα συναντήσουμε και διάφορες άλλες προτάσεις οι οποίες με τη σειρά τους παρουσιάζουν τα μειονεκτήματά τους και τα πλεονεκτήματά τους. Έτσι πολλοί ερευνητές έχουν καταφύγει στο συνδυασμό αυτών των προτάσεων μεταξύ τους προσπαθώντας συνδυάζοντας τα προτερήματα του καθενός να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Παρακάτω αφού θα αναπτυχθεί ο κύριος αλγόριθμος της μελέτης μας στη συνέχεια θα δοθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων αλγορίθμων οι οποίοι συνδυάζονται με τον RR για την επίτευξη αυτού του βέλτιστου αποτελέσματος.

1.4.1 Round Robin (Κυκλική Ανάθεση)

Ο αλγόριθμος κατανομής φορτίου RoundRobin λειτουργεί με έναν απλό και ευθύ τρόπο. Κάθε φορά που φτάνει ένα νέο αίτημα ή σύνδεση, αναθέτει αυτό το αίτημα σε έναν διαφορετικό διακομιστή κάθε φορά. Αυτή η μέθοδος είναι εύκολη στην υλοποίηση και εξασφαλίζει μια βασική ισορροπία φορτίου μεταξύ των διακομιστών. Παρόλα αυτά, ο RoundRobin δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του κάθε διακομιστή ή τον τρέχοντα φόρτο του. Κατά συνέπεια, μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Ο αλγόριθμος αυτός έχει σαν διαδικασία λειτουργίας του την εξής: Καθορίζεται μια λίστα με τους διαθέσιμους διακομιστές ή πόρους που θα εξυπηρετήσουν τα αιτήματα. Κάθε φορά που ένα νέο αίτημα φτάνει, το αναθέτει στον επόμενο διακομιστή ή πόρο στη λίστα, σύμφωνα με μια καθορισμένη σειρά. Ο διακομιστής που εξυπηρετεί το αίτημα ανακατευθύνει την κίνηση προς τον προορισμό του. Κατά την άφιξη του επόμενου αιτήματος, ο αλγόριθμος επιλέγει τον επόμενο διακομιστή ή πόρο στη λίστα, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ο τρόπος λειτουργίας περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Καθορισμός Λίστας: Μια λίστα με τους διαθέσιμους διακομιστές ή πόρους δημιουργείται εκ των προτέρων. Αυτή η λίστα περιέχει όλους τους πόρους που είναι διαθέσιμοι για την εξυπηρέτηση των αιτημάτων.

2. Ανάθεση Αιτημάτων: Όταν φτάνει ένα νέο αίτημα ή σύνδεση, ο αλγόριθμος αναθέτει αυτό το αίτημα στον επόμενο διακομιστή ή πόρο στη λίστα, ακολουθώντας την καθορισμένη σειρά. Ο διακομιστής που επιλέγεται ανακατευθύνει την κίνηση προς τον προορισμό του αιτήματος.

3. Επανάληψη Διαδικασίας: Κατά την άφιξη του επόμενου αιτήματος, ο αλγόριθμος επιλέγει τον επόμενο διακομιστή ή πόρο στη λίστα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κυκλικά, εξασφαλίζοντας ότι κάθε διακομιστής ή πόρος λαμβάνει αιτήματα με ισομερή κατανομή.

Ως προς την εφαρμογή του σε περιβάλλον SDN η τεχνική RoundRobin μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε δίκτυα SDN, προσφέροντας απλότητα και βασική ισορροπία φορτίου. Στα δίκτυα SDN, ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να διαχειριστεί την κατανομή των αιτημάτων με τη μέθοδο RoundRobin, εξασφαλίζοντας ότι κάθε διακομιστής λαμβάνει ίσο αριθμό αιτημάτων. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της διαχείρισης είναι:

1. Κεντρική διαχείριση: Ο ελεγκτής SDN διαχειρίζεται τη λίστα των διακομιστών και κατευθύνει τα αιτήματα στους επόμενους διακομιστές στη σειρά, εξασφαλίζοντας τη δίκαιη κατανομή τους.

2. Ενημέρωση ροών: Ο ελεγκτής ενημερώνει τους πίνακες ροών των SDN switches για να ανακατευθύνουν τα αιτήματα στους σωστούς διακομιστές σύμφωνα με την καθορισμένη σειρά.

3. Προσαρμογή σε αλλαγές: Αν και ο RoundRobin δεν προσαρμόζεται αυτόματα στον φόρτο των διακομιστών, σε ένα περιβάλλον SDN, ο ελεγκτής μπορεί να παρακολουθεί την απόδοση των διακομιστών και να κάνει αλλαγές αν χρειαστεί, όπως προσθήκη νέων διακομιστών στη λίστα.

Ο αλγόριθμος Round Robin RR προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τη μία πλευρά, είναι απλός στην υλοποίηση και κατανόηση, καθώς δεν απαιτεί σύνθετους υπολογισμούς ή παρακολούθηση της κατάστασης των διακομιστών, και εξασφαλίζει μια βασική ισορροπία φορτίου, καθώς κάθε διακομιστής λαμβάνει τον ίδιο αριθμό αιτημάτων με τη σειρά. Παράλληλα, η δίκαιη κατανομή του τον καθιστά ιδανικό για περιβάλλοντα όπου όλα τα φορτία έχουν παρόμοιες απαιτήσεις. Η απλότητά του, το χαμηλό κόστος διαχείρισης

και η προβλεψιμότητα του τον καθιστούν κατάλληλο για βασικές εφαρμογές σε σταθερά δίκτυα.

Ωστόσο, ο RR παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, κυρίως λόγω της αδυναμίας του να λάβει υπόψη τον τρέχοντα φόρτο ή την κατάσταση των διακομιστών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων, με αποτέλεσμα την πιθανή υπερφόρτωση ορισμένων διακομιστών, ενώ άλλοι παραμένουν υποχρησιμοποιούμενοι. Ειδικά σε περιβάλλοντα με μεταβλητό φόρτο και ανάγκες, ο RR δεν εξασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή αιτημάτων. Επιπλέον, σε περιπτώσεις ετερογενών περιβαλλόντων με διαφορετική επεξεργαστική ισχύ ανά διακομιστή, ο RR αδυνατεί να αξιοποιήσει τις δυνατότητες των ισχυρότερων κόμβων. Η έλλειψη υποστήριξης δυναμικών προσαρμογών και προτεραιοτήτων περιορίζει τη χρησιμότητά του σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα, ενώ η υπερβολική εναλλαγή (context switching) που απαιτείται μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση πόρων.

Παρά τους περιορισμούς του, ο RR συνεισφέρει σημαντικά στη διαχείριση φορτίων, προσφέροντας απλότητα, σταθερότητα και βασική ισορροπία σε συστήματα με σταθερές απαιτήσεις. Ωστόσο, για τη βελτιστοποίηση της εξισορρόπησης στα δίκτυα, απαιτούνται βελτιώσεις. Δυναμικές εκδοχές του RR, όπως ο Weighted Round Robin (WRR) ή ο Dynamic Round Robin (DRR)-που θα μελετηθούν παρακάτω-, μπορούν να αντιμετωπίσουν το ζήτημα της διαφορετικής βαρύτητας φορτίων. Επίσης, η ενσωμάτωση παραμέτρων όπως η επεξεργαστική ισχύς ή η χρήση μνήμης, καθώς και η εισαγωγή προτεραιοτήτων, μπορεί να εξασφαλίσει καλύτερη κατανομή και εξυπηρέτηση κρίσιμων αιτημάτων. Τέλος, η χρήση υβριδικών αλγορίθμων, που συνδυάζουν τον RR με άλλες τεχνικές, όπως το Least Connections ή το Least Response Time, μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα. Έτσι μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ο Round Robin αποτελεί μια βασική και χρήσιμη λύση για τη διαχείριση φορτίων, αλλά οι περιορισμοί του υποδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω ανάπτυξης και βελτίωσης για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των σύγχρονων, πολύπλοκων και ετερογενών δικτύων.

Παρακάτω θα αναπτυχθούν κάποιοι από τους αλγόριθμους ο οποίοι σε συνδυασμό με τον RR μπορούν να του προσδώσουν χαρακτηριστικά τα οποία αναιρούν αυτά τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα του και τον καθιστούν ικανό να ανταπεξέρχεται στα σύγχρονα και απαιτητικά περιβάλλοντα.

1.4.2 Least ResponseTime (Ελάχιστος Χρόνος Απόκρισης)

Ο αλγόριθμος Least Response Time (LRT) αποτελεί μια αποτελεσματική στρατηγική εξισορρόπησης φορτίου που μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιβάλλοντα διαχείρισης δικτύων SDN. Στο πλαίσιο των SDN, η εφαρμογή του LRT γίνεται με τη χρήση της ευελιξίας και της δυναμικότητας που προσφέρουν οι ελεγκτές SDN και η εκτέλεση των λειτουργιών από το λογισμικό.

Ο τρόπος λειτουργίας του έχει ως εξής: αρχικά, καταγράφει τους χρόνους απόκρισης για κάθε διαθέσιμο διακομιστή ή πόρο στο περιβάλλον SDN. Κάθε φορά που ένα νέο αίτημα φτάνει, επιλέγει τον διακομιστή με τον ελάχιστο χρόνο απόκρισης από τους διαθέσιμους, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται από τον ελεγκτή SDN. Αυτό επιτρέπει την άμεση προσαρμογή της δρομολόγησης των αιτημάτων στο δίκτυο, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος.

Αν και δεν υπάρχει ένας σταθερός μαθηματικός τύπος που να χρησιμοποιείται για το LRT, για την ανάλυση της απόδοσης του αλγορίθμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μαθηματικά μοντέλα και μέθοδοι, όπως η θεωρία πιθανοτήτων για τη μελέτη της κατανομής των χρόνων απόκρισης ή η ανάλυση αλγορίθμων για την εκτίμηση της απόδοσης τους σε διάφορες συνθήκες φόρτου και δικτυακών τοπολογιών.

Για παράδειγμα, ένας πιθανός τρόπος ανάλυσης του LRT είναι μέσω της θεωρίας της εκτεταμένης ουράς (extended queueing theory), όπου μπορεί να χρησιμοποιηθούν μαθηματικοί τύποι για να προβλεφθούν οι μέσοι χρόνοι αναμονής και οι χρόνοι απόκρισης των αιτημάτων στους διακομιστές. Άλλες μέθοδοι μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση στατιστικών μοντέλων για την εκτίμηση της απόδοσης του αλγορίθμου σε πραγματικές συνθήκες δικτύου.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου LRT σε περιβάλλον SDN περιλαμβάνουν την εξασφάλιση της χαμηλότερης δυνατής απόκρισης για τα αιτήματα, βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Επιπλέον, ο αλγόριθμος αυτός είναι ευέλικτος και μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του δικτύου. Ωστόσο, ένα πιθανό μειονέκτημα είναι η ανάγκη για συχνές μετρήσεις και ενημερώσεις των χρόνων απόκρισης, καθώς και η πρόσβαση στις πληροφορίες του δικτύου από τον ελεγκτή SDN, που ενδέχεται να προσθέσει καθυστερήσεις στην απόκριση των αιτημάτων.

1.4.3 Adaptive Load Balancing (Προσαρμοστική Ισορροπία Φορτίου)

Ο Adaptive Load Balancing είναι ένας αλγόριθμος κατανομής φορτίου που προσαρμόζει δυναμικά τη διανομή του φορτίου στους διαθέσιμους πόρους του δικτύου. Λειτουργεί παρακολουθώντας συνεχώς το φορτίο εργασίας και την κατάσταση των διαθέσιμων πόρων. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, αναλύει την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και λαμβάνει αποφάσεις για τη διανομή του φορτίου. Η προσαρμογή της κατανομής του φορτίου γίνεται δυναμικά, περιλαμβάνοντας τη μετακίνηση εργασιών από υπερφορτωμένους σε λιγότερο φορτωμένους πόρους και την αναδιανομή των εργασιών για να εξισορροπηθεί η φόρτωση. Ο αλγόριθμος συνεχίζει να παρακολουθεί και να προσαρμόζει την κατανομή του φορτίου καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου. Ο στόχος του Adaptive Load Balancing είναι να εξασφαλίσει την αποτελεσματική και ισορροπημένη χρήση των διαθέσιμων πόρων, βελτιώνοντας την απόδοση. Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια προχωρημένη τεχνική εξισορρόπησης φορτίου που στοχεύει στη δυναμική προσαρμογή της κατανομής των αιτημάτων στους διακομιστές, βασιζόμενος στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και των διακομιστών. Αν προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τον αλγόριθμο και να σταχυολογήσουμε τις ενέργειες στις οποίες προβαίνει, θα δούμε ότι έχουμε:

1. Καταγραφή Κατάστασης: Αξιολογεί συνεχώς την τρέχουσα κατάσταση του κάθε διακομιστή και του δικτύου συνολικά. Αυτό συμπεριλαμβάνει πληροφορίες όπως ο φόρτος του κάθε διακομιστή, ο χρόνος απόκρισης, η διαθεσιμότητα των πόρων και άλλα σχετικά μετρήσιμα χαρακτηριστικά.
2. Λήψη Αποφάσεων: Με βάση τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται, ο αλγόριθμος καθορίζει πώς θα δρομολογηθούν τα νέα αιτήματα. Αυτή η απόφαση μπορεί να βασίζεται σε κανόνες, προτεραιότητες ή συνθήκες προειδοποίησης που έχουν καθοριστεί προηγουμένως.
3. Δυναμική Προσαρμογή: Ο αλγόριθμος είναι σε θέση να προσαρμόζει δυναμικά την κατανομή των αιτημάτων ανάλογα με τις αλλαγές στο δίκτυο και τους διακομιστές. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω αυξανόμενου φορτίου, πτώσης απόδοσης κάποιου διακομιστή ή οποιασδήποτε άλλης αλλαγής στις συνθήκες λειτουργίας.

Το Adaptive Load Balancing προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαχείριση φορτίου σε δίκτυα και συστήματα. Οι κύριες αρετές του περιλαμβάνουν τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου, την ελαχιστοποίηση

του χρόνου απόκρισης και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των διακομιστών. Επιπλέον, επιτρέπει την αυτόματη διαχείριση του φορτίου χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης. Ωστόσο, τα μειονεκτήματά του περιλαμβάνουν την αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης και την απαιτούμενη υψηλή χρήση πόρων για την αξιολόγηση και τη λήψη αποφάσεων βασισμένων στην κατάσταση του δικτύου και των διακομιστών.

Σε περιβάλλοντα SDN, ο Adaptive Load Balancing μπορεί να υλοποιηθεί ενσωματώνοντας τον στην ελεγχόμενη επίπεδη επιφάνεια () του δικτύου. Αυτό επιτρέπει τη δυναμική ανακατεύθυνση της κίνησης μέσω της ανάλυσης της κατάστασης των διακομιστών και των συνθηκών του δικτύου με χρήση ειδικών πρωτοκόλλων και εφαρμογών SDN.

1.4.4 Least Loaded (Ελάχιστα Φορτωμένος ή Ελάχιστες Συνδέσεις)

Η τεχνική Least Loaded, γνωστή και ως Least Connection, είναι μια στρατηγική εξισορρόπησης φορτίου, τόσο των παραδοσιακών όσο και των SDN, και που βασίζεται κατευθύνοντας τις νέες συνδέσεις ή τα πακέτα δεδομένων προς τους λιγότερο φορτωμένους διακομιστές ή κόμβους του δικτύου. Η βασική ιδέα είναι να αποφεύγεται η υπερφόρτωση ορισμένων κόμβων και να εξασφαλίζεται μια ομοιόμορφη κατανομή της κυκλοφορίας δεδομένων.

Ο τρόπος λειτουργίας της τεχνικής αυτής περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Παρακολούθηση Φόρτωσης: Κάθε διακομιστής ή κόμβος παρακολουθεί συνεχώς τον αριθμό των ενεργών συνδέσεων ή το ποσοστό χρήσης των πόρων του (CPU, μνήμη, δίσκο κ.λπ.). Αυτή η πληροφορία αποστέλλεται είτε σε έναν κεντρικό διαχειριστή (στο πλαίσιο των SDN) είτε διανέμεται μεταξύ των διακομιστών.
2. Επιλογή Κόμβου: Όταν μια νέα σύνδεση ή αίτηση πακέτου φτάσει στο δίκτυο, η τεχνική Least Loaded εξετάζει τη φόρτωση όλων των διαθέσιμων κόμβων και επιλέγει αυτόν με τη μικρότερη φόρτωση.
3. Κατεύθυνση Πακέτου: Η σύνδεση ή το πακέτο κατευθύνεται προς τον επιλεγμένο κόμβο για επεξεργασία.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς για κάθε νέα σύνδεση ή αίτηση πακέτου, εξασφαλίζοντας ότι η κυκλοφορία κατανέμεται ομοιόμορφα.

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Η τεχνική Least Loaded προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η ομοιόμορφη κατανομή της φόρτωσης και η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Με την αποφυγή της υπερφόρτωσης, η απόδοση του δικτύου βελτιώνεται, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και την απώλεια πακέτων, ενώ συμβάλλει και στην αυξημένη αξιοπιστία, καθώς μειώνονται οι πιθανότητες αποτυχίας λόγω υπερβολικής ζήτησης.

Ωστόσο, η εφαρμογή της μπορεί να προσθέσει πολυπλοκότητα στο δίκτυο. Η παρακολούθηση της φόρτωσης και η συνεχής ενημέρωση της πληροφορίας μπορεί να προσθέσουν φόρτο εργασίας και επικοινωνιακό φόρτο. Σε δίκτυα με πολύ δυναμική κυκλοφορία, η πληροφορία της φόρτωσης μπορεί να αλλάζει γρήγορα, καθιστώντας δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό του λιγότερο φορτωμένου κόμβου.

Εφαρμογή σε Περιβάλλον SDN

Η εφαρμογή της τεχνικής Least Loaded σε δίκτυα SDN γίνεται πιο αποδοτική και ευέλικτη χάρη στις δυνατότητες που παρέχει η αρχιτεκτονική SDN. Ο κεντρικός ελεγκτής του SDN μπορεί να συγκεντρώνει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από όλους τους κόμβους του δικτύου και να λαμβάνει αποφάσεις εξισορρόπησης φορτίου βάσει αυτών των δεδομένων. Η διάρθρωση των ενεργειών στις οποίες προβαίνει ένας ελεγκτής SDN είναι:

1. Συλλογή Δεδομένων: Ο ελεγκτής SDN συλλέγει δεδομένα φόρτωσης από όλους τους διακομιστές ή κόμβους του δικτύου χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως το OpenFlow.
2. Ανάλυση και Απόφαση: Ο ελεγκτής αναλύει τα δεδομένα φόρτωσης και επιλέγει τον λιγότερο φορτωμένο κόμβο για κάθε νέα σύνδεση ή αίτηση πακέτου.
3. Ενημέρωση Ροών: Ο ελεγκτής ενημερώνει τους πίνακες ροών των SDN switches για να κατευθύνει τις συνδέσεις ή τα πακέτα προς τον επιλεγμένο κόμβο.

Αυτή η κεντρική διαχείριση επιτρέπει την εφαρμογή πιο εξελιγμένων και προσαρμοστικών πολιτικών εξισορρόπησης φορτίου, προσφέροντας καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία.

1.4.5 Hashing (Κατακερματισμός)

Η τεχνική Hashing για την εξισορρόπηση φορτίου είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί αλγορίθμους κατακερματισμού (hashing algorithms) για να κατευθύνει τις συνδέσεις ή τα πακέτα δεδομένων σε συγκεκριμένους διακομιστές ή κόμβους του δικτύου. Αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου, χάρη στην αποτελεσματικότητά της και την απλότητα της υλοποίησής της. Η λειτουργία της τεχνικής Hashing περιλαμβάνει τα εξής βήματα [36]:

1. Δημιουργία Hash: Όταν μια νέα σύνδεση ή αίτηση πακέτου φτάνει στο δίκτυο, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος κατακερματισμού για να δημιουργήσει μια μοναδική τιμή hash βασισμένη σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της σύνδεσης, όπως η IP διεύθυνση προέλευσης και προορισμού, η θύρα ή άλλες πληροφορίες της κεφαλίδας του πακέτου.

2. Χαρτογράφηση σε Κόμβους: Η τιμή hash χρησιμοποιείται για να χαρτογραφηθεί η σύνδεση ή το πακέτο σε έναν συγκεκριμένο διακομιστή ή κόμβο του δικτύου. Αυτό γίνεται συνήθως με τη χρήση ενός πίνακα κατακερματισμού (hashtable) που περιέχει τους διαθέσιμους κόμβους.

3. Κατεύθυνση Πακέτου: Το πακέτο κατευθύνεται προς τον κόμβο που αντιστοιχεί στη δημιουργημένη τιμή hash.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε νέα σύνδεση ή αίτηση πακέτου, εξασφαλίζοντας μια συνεπή κατανομή της κυκλοφορίας βασισμένη στον αλγόριθμο κατακερματισμού.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η τεχνική Hashing προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Παρέχει συνεπή κατανομή της κυκλοφορίας, εξασφαλίζοντας ότι οι ίδιες συνδέσεις κατευθύνονται πάντα στον ίδιο διακομιστή, κάτι που είναι σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή σύνδεση και αποθήκευση κατάστασης (stateful applications). Είναι επίσης εύκολη στην υλοποίηση και δεν απαιτεί συνεχή παρακολούθηση της φόρτωσης των κόμβων.

Ωστόσο, η τεχνική Hashing παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Ένα βασικό πρόβλημα είναι η μη ισορροπημένη κατανομή της κυκλοφορίας όταν οι τιμές hash δεν κατανέμονται ομοιόμορφα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση ορισμένων

κόμβων. Επίσης, όταν προστίθενται ή αφαιρούνται κόμβοι από το δίκτυο, απαιτείται ανακατανομή των τιμών hash, κάτι που μπορεί να προκαλέσει διακοπές στην υπηρεσία.

Εφαρμογή σε Περιβάλλον SDN

Η εφαρμογή της τεχνικής Hashing σε δίκτυα SDN μπορεί να γίνει ακόμα πιο αποδοτική και ευέλικτη. Στα δίκτυα SDN, ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να διαχειρίζεται τους αλγορίθμους κατακερματισμού και να εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή της κυκλοφορίας. Επιπλέον, μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά τους αλγορίθμους κατακερματισμού και τους πίνακες κατακερματισμού για να αντιμετωπίζει προβλήματα υπερφόρτωσης ή να ενσωματώνει νέους κόμβους χωρίς να προκαλεί διακοπές στην υπηρεσία.

1. Διαχείριση Hash: Ο ελεγκτής SDN διαχειρίζεται τους αλγορίθμους κατακερματισμού και τους πίνακες κατακερματισμού, εξασφαλίζοντας τη σωστή χαρτογράφηση των συνδέσεων στους διαθέσιμους κόμβους.
2. Προσαρμογή και Βελτιστοποίηση: Ο ελεγκτής μπορεί να προσαρμόζει τους αλγορίθμους κατακερματισμού και να ανακατανέμει τις συνδέσεις δυναμικά για να αντιμετωπίσει προβλήματα υπερφόρτωσης ή να ενσωματώνει νέους κόμβους χωρίς διακοπές.
3. Ενημέρωση Ροών: Ο ελεγκτής ενημερώνει τους πίνακες ροών των SDN switches για να κατευθύνει τις συνδέσεις ή τα πακέτα προς τους σωστούς κόμβους με βάση τις τιμές hash.

Αυτή η κεντρική διαχείριση επιτρέπει την εφαρμογή πιο εξελιγμένων και προσαρμοστικών πολιτικών εξισορρόπησης φορτίου, προσφέροντας καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία.

1. 5 Σχετικές εργασίες

Η εξισορρόπηση φορτίου (Load Balancing) είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων και των υπολογιστικών συστημάτων. Ιδιαίτερα στα δίκτυα με υποστήριξη λογισμικού (SDN), η εξισορρόπηση του φορτίου παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαχείριση της κυκλοφορίας και στη βελτιστοποίηση των πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, η [37] προσφέρει μια λεπτομερή μελέτη των τεχνικών εξισορρόπησης φορτίου στο SDN, κατηγοριοποιώντας τις

τεχνικές σε συμβατικές και βασισμένες σε τεχνητή νοημοσύνη. Εξετάζει τις μετρικές απόδοσης που χρησιμοποιούνται και προτείνει νέες κατευθύνσεις για την περαιτέρω βελτίωση των υφιστάμενων μεθόδων.

Επιπλέον, η εργασία [38] επικεντρώνεται στις προκλήσεις της εξισορρόπησης φορτίου σε περιβάλλοντα cloud computing, ανασκοπώντας αλγόριθμους και προσεγγίσεις τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές συνθήκες. Παρά τις διάφορες προτάσεις για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων και τη μείωση του χρόνου απόκρισης, υπάρχουν ακόμα ζητήματα όπως η ανοχή σε σφάλματα και η μετανάστευση των εικονικών μηχανών που δεν έχουν καλυφθεί πλήρως.

Στην εργασία [39], αναδεικνύονται τα κύρια ζητήματα και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εξισορρόπηση φορτίου σε cloud περιβάλλοντα. Οι τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου κατηγοριοποιούνται σε γενικές, φυσικά εμπνευσμένες, βασισμένες σε εργασίες και βασισμένες σε πράκτορες, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Τέλος, η εργασία [40] προσφέρει μια νέα ταξινόμηση των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου σε επτά κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων των αλγορίθμων που βασίζονται στο Hadoop Map Reduce, των φυσικά εμπνευσμένων τεχνικών, και των αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη τα δίκτυα. Η ανάλυση των τεχνικών αυτών προσφέρει πληροφορίες για την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητά τους, ενώ προτείνει μελλοντικές έρευνες για την περαιτέρω αξιολόγηση των αλγορίθμων σε συνθήκες προσομοίωσης.

Συνολικά, παρά την ποικιλία των τεχνικών εξισορρόπησης φορτίου που έχουν αναπτυχθεί για τα δίκτυα SDN και τα συστήματα cloud, ο αλγόριθμος Round Robin (RR) παραμένει ένας απλός αλλά αποδοτικός μηχανισμός που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση, ειδικά σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες του SDN. Οι μελέτες αναδεικνύουν την ανάγκη για έξυπνους, δυναμικούς αλγόριθμους που μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη διανομή φορτίου σε σύνθετα δίκτυα με περιορισμένους πόρους.

2. Μεθοδολογία έρευνας

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της έρευνας αναφορικά με τη χρήση του αλγορίθμου RoundRobin και των παραλλαγών του στην εξισορρόπηση φορτίου στα δίκτυα SDN. Η προσέγγιση αυτή, αν και δεν αποτελεί συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση (SLR) πλήρους κλίμακας, υιοθετεί παρόμοιες αρχές, δίνοντας έμφαση σε τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου σε περιβάλλοντα SDN. Σε αυτό το πλαίσιο, τα ερευνητικά ερωτήματα, μαζί με τους παράγοντες που τα καθορίζουν, αναφέρονται σε αυτή την ενότητα, ώστε να περιγραφούν οι κύριοι άξονες και οι στόχοι της μελέτης. Τα άρθρα και οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν από έγκυρες επιστημονικές βάσεις δεδομένων, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω, και ακολουθήθηκε συγκεκριμένη στρατηγική αναζήτησης για την απόκτηση των σχετικών άρθρων στον τομέα. Στη συνέχεια, τα επιλεγμένα άρθρα υπέστησαν προσεκτική αξιολόγηση, με βάση τα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού που καθορίζονται παρακάτω, ώστε να επιτευχθεί ουσιαστική αξιολόγηση του ρόλου του RR και των παραλλαγών του στα SDN.

Για τον προσδιορισμό της τρέχουσας κατάστασης της τεχνολογίας στην εξισορρόπηση φορτίου στα SDN, στον παρακάτω Πίνακα 1 παρατίθενται τα ερευνητικά ερωτήματα και οι παράγοντες που οδήγησαν στη διαμόρφωσή τους.

2.1 Διατύπωση ερευνητικών ερωτημάτων

Πηγές Δεδομένων: Τα άρθρα προέρχονται από έγκυρους εκδότες όπως οι IEEE, Springer, Science Direct, Wiley, ACM Digital Library, Sage, Inderscience, MDPI και Google Scholar. Οι πηγές που συλλέχθηκαν για ανασκόπηση φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.

Στρατηγική Αναζήτησης: Η εστίαση στα δίκτυα SDN για τη βελτίωση της απόδοσης και την παρακολούθηση των δικτύων ξεκίνησε από το 2011, καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία συνδέεται στενά με το υπολογιστικό νέφος (cloud computing). Επειδή στην αρχή η έρευνα ήταν περιορισμένη, τα άρθρα που εξετάζονται στη μελέτη αυτή αφορούν την τελευταία πενταετία, δηλαδή από το 2020 και μετά. Με βάση το θέμα και τα ερευνητικά ερωτήματα, προσδιορίστηκε ως πρώτο βήμα η εύρεση των κατάλληλων λέξεων-κλειδιά για τη διαμόρφωση της αναζήτησης. Έτσι λοιπόν αποφασίστηκε η αναζήτηση να περιλαμβάνει κάποιους από τους όρους όπως οι: «load balancing»,

«Software-Defined Networking», «Software-Defined Networks», «SDN», «RoundRobin» ως βασικές λέξεις-κλειδιά και οι λογικοί τελεστές «AND» και «OR» για τον συσχετισμό τους.

Ερευνητικό ερώτημα	Motivation
1. Πώς οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που βασίζονται στον Round Robin βελτιώνουν τις επιδόσεις σε κρίσιμες μετρικές, σε σχέση με βασικούς αλγόριθμους αναφοράς όπως ο RR;	Η κατανόηση των στόχων και της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων αλγορίθμων είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της συμβολής τους στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης φορτίων. Αυτή η ανάλυση προσφέρει πολύτιμες γνώσεις για τη συνολική πρόοδο και τις δυνατότητες περαιτέρω βελτιώσεων.
2. Πώς διαφοροποιούνται οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που βασίζονται στον Round Robin ως προς τα χαρακτηριστικά τους, τις απαιτήσεις και την απόδοσή τους, και ποιος αλγόριθμος είναι πιο κατάλληλος για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης σε περιβάλλοντα SDN και Cloud;	Η συστηματική σύγκριση των χαρακτηριστικών και επιδόσεων των αλγορίθμων επιτρέπει την κατανόηση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε προσέγγισης, παρέχοντας καθοδήγηση για την επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε δικτύου ή περιβάλλοντος.
3. Πώς συγκρίνονται οι επιδόσεις αλγορίθμων που δεν βασίζονται στον Round Robin ως προς τις κρίσιμες μετρικές απόδοσης σε σχέση με τον RR, και σε ποιο βαθμό επιτυγχάνουν βελτιώσεις σε αυτές τις μετρικές;	Η αξιολόγηση των βελτιώσεων που προσφέρουν οι αλγόριθμοι αυτοί σε σύγκριση με τον Round Robin παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη συνολική αποδοτικότητα και τις απαιτήσεις τους. Αυτή η ανάλυση βοηθά στην αναγνώριση αλγορίθμων που είναι καλύτερα προσαρμοσμένοι σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα και καθοδηγεί την επιλογή ή την ανάπτυξη ακόμα πιο αποδοτικών προσεγγίσεων.
4. Πώς διαμορφώνεται η κατανομή των μετρικών στις έρευνες που αξιολογούν τον αλγόριθμο Round Robin, ποιες είναι οι κυρίαρχες προτεραιότητες της ερευνητικής κοινότητας, και ποια ερευνητικά κενά προκύπτουν από αυτή την κατανομή;	Η ανάλυση της κατανομής των ερευνητικών προτεραιοτήτων στις μετρικές του Round Robin αναδεικνύει κρίσιμα ερευνητικά κενά. Η επικέντρωση στην απόδοση δικτύου και τον χρόνο απόκρισης δείχνει τη σημασία τους, ενώ η περιορισμένη μελέτη σε τομείς όπως η εξισορρόπηση φορτίου και η αξιοπιστία υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και βελτιώσεις του αλγορίθμου.

Πίνακας 2. 1 Ερευνητικά ερωτήματα και κίνητρα έρευνας

Publisher	URL
ACM Digital Library	https://dl.acm.org
DSpace	https://www.dspace.org/
Elsevier	https://www.elsevier.com/
Google Scholar	https://scholar.google.com
IEEE Xplore	https://ieeexplore.ieee.org
IJACSA	https://thesai.org/Publications/IJACSA .
IJECE	https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/about/submissions
Inderscience Publishers	https://www.inderscience.com
MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)	https://www.mdpi.com
SAGE Journals	https://journals.sagepub.com
Science Direct	https://www.sciencedirect.com
Springer Link	https://link.springer.com
Wiley Online Library	https://onlinelibrary.wiley.com

Πίνακας 2. 2 Οι εκδότες και οι διευθύνσεις τους

2.2 Διαδικασία και τρόπος εργασίας

Η εργασία που πραγματοποιήθηκε ακολουθεί τις αρχές της μεθοδολογίας PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), που προτείνεται για την διεξαγωγή συστηματικών ανασκοπήσεων σε επιστημονικά πεδία. Το PRISMA περιλαμβάνει μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων, που στοχεύει στη συγκέντρωση, αξιολόγηση και επιλογή της διαθέσιμης βιβλιογραφίας με αυστηρά και τεκμηριωμένα κριτήρια. Στην ανασκόπηση αυτή, ο στόχος ήταν να συγκεντρωθούν άρθρα που αφορούν το Load Balancing σε SDN δίκτυα, με ιδιαίτερη έμφαση στους αλγορίθμους τύπου RoundRobin. Αφού ολοκληρώθηκε το 1^ο στάδιο δηλαδή αυτό της αναζήτησης των άρθρων με τη χρήση των κατάλληλων λέξεων κλειδιών, στα άρθρα που συλλέχθηκαν εφαρμόστηκαν τα φίλτρα επιλογής που περιγράφονται στο 2^ο στάδιο (βλ. επόμενη ενότητα) για να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα και η συνάφεια των άρθρων που περιλήφθηκαν τελικά στην ανάλυση.

Η διαδικασία επιλογής των κατάλληλων άρθρων για την εργασία μου πραγματοποιήθηκε μέσω μιας συστηματικής και πολυεπίπεδης προσέγγισης, η οποία περιλαμβάνει τα εξής στάδια και φίλτρα:

- *Στάδιο 1: Αυτόματη Αναζήτηση βάσει Λέξεων-Κλειδιών*
- *Στάδιο 2: Εφαρμογή Φίλτρων Επιλογής*

Φίλτρο 1: Χρονική περίοδος και τύπος δημοσιεύσεων

Η αναζήτηση περιορίστηκε κυρίως σε άρθρα που δημοσιεύθηκαν την περίοδο 2020 έως 2024. Οι δημοσιεύσεις που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν άρθρα από περιοδικά, πρακτικά συνεδρίων, πατέντες, βιβλία και διατριβές. Το συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο παραβιάστηκε μόνο όταν έγινε αναζήτηση για προτάσεις νέων αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου που έχουν βασιστεί στον RoundRobin.

Σε αυτή την αρχική φάση της έρευνας, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση σχετικών εργασιών σε αξιόπιστα ακαδημαϊκά αποθετήρια και επιστημονικές πλατφόρμες, ώστε να εντοπιστεί υψηλής ποιότητας επιστημονικό περιεχόμενο. Εξετάστηκαν πηγές όπως τα *IEEE Xplore*, *SpringerLink*, *DSpace*, *WileyOnlineLibrary*, *ScienceDirect (Elsevier)* και *GoogleScholar*, τα οποία θεωρούνται από τα πιο καταξιωμένα αποθετήρια στον τομέα της επιστήμης και της μηχανικής των υπολογιστών. Παράλληλα, η έρευνα επεκτάθηκε σε πλατφόρμες όπως η *ACM DigitalLibrary*, το *IJECE (International Journal of Electrical and Computer Engineering)* και το *IJACSA (International Journal of Advanced Computer Science and Applications)*, για να διασφαλιστεί η εύρεση ερευνητικών εργασιών από ευρύτερο φάσμα πεδίων. Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε με τις λέξεις-κλειδιά (*Software DefinedNetwork OR SDN*) *AND* (*Load OR Balancing*) *AND* (*ROUND ROBIN*), ώστε να ανευρεθούν εργασίες που αφορούν τα δίκτυα SDN και τεχνικές κατανομής φόρτου στις οποίες γίνεται αναφορά στη μέθοδο RoundRobin. Η διαδικασία αυτή οδήγησε σε ένα σύνολο 300+ επιστημονικών εργασιών, οι οποίες για την εξαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και ιδεών που θα υποστηρίξουν την περαιτέρω ανάπτυξη της έρευνας περάστηκαν στη διαδικασία επιλογής του δεύτερου φίλτρου.

Φίλτρο 2: Ποιότητα της έκδοσης

Σε αυτό το στάδιο, εφαρμόστηκε το δεύτερο φίλτρο που αφορά την ποιότητα των εκδόσεων. Για να διασφαλιστεί ότι τα άρθρα προέρχονται από αξιόπιστες πηγές και διαθέτουν

επιστημονική εγκυρότητα, η αναζήτηση περιορίστηκε σε εργασίες συνεδρίων και άρθρα περιοδικών που εκδίδονται από κορυφαίους εκδοτικούς οίκους και οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν άρθρα που δημοσιεύονται από εκδότες με καθιερωμένη φήμη και αναγνώριση στον χώρο της τεχνολογίας και των επιστημών, όπως οι IEEE, Wiley, Springer, καθώς και δημοσιεύσεις σε εξειδικευμένα περιοδικά όπως το *International Journal of Electrical and Computer Engineering* (IJECE) και το *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (IJACSA). Πηγές από το αποθετήριο DSpace περιλήφθηκαν επίσης, λόγω της ευρείας χρήσης και της αξιοπιστίας του για ακαδημαϊκές και ερευνητικές εργασίες. Με αυτόν τον περιορισμό, αποκλείστηκαν άρθρα από περιοδικά με αμφισβητούμενες πρακτικές αξιολόγησης, διασφαλίζοντας ότι οι επιλεγμένες δημοσιεύσεις χαρακτηρίζονται από διαφάνεια στην κρίση των ερευνητικών ευρημάτων και ακαδημαϊκή αξιοπιστία. Επιπλέον, αποκλείστηκαν άρθρα που δεν ήταν γραμμένα στα Αγγλικά, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία στη γλώσσα και η δυνατότητα συγκριτικής μελέτης των δεδομένων. Μετά την εφαρμογή αυτών των κριτηρίων, ο αριθμός των άρθρων που παρέμειναν για αξιολόγηση μειώθηκε σε περίπου 170, διαμορφώνοντας έτσι ένα αξιόπιστο και ποιοτικό σύνολο εργασιών προς μελέτη.

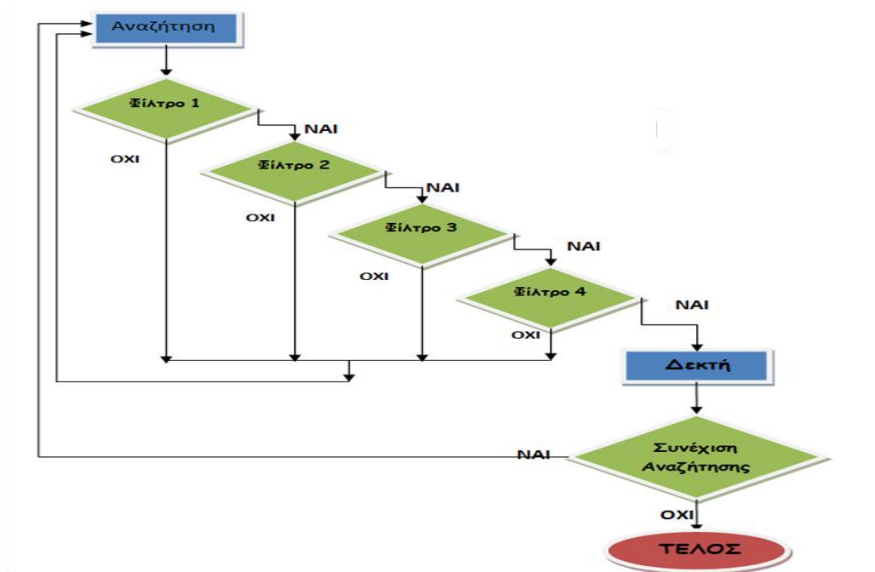
Φίλτρο 3: Ποιοτική αξιολόγηση (Quality Assessment Checklist - QAC)

Κατά την τρίτη φάση, εφαρμόστηκε μια Λίστα Ποιοτικής Αξιολόγησης (QAC), διαμορφωμένη με βάση την προσέγγιση των Kitchenham [41], ώστε να διασφαλιστεί η επιλογή μόνο των πιο αξιόλογων και σχετικών άρθρων. Στην αξιολόγηση αυτή, οι περιλήψεις και οι λέξεις-κλειδιά κάθε άρθρου εξετάστηκαν λεπτομερώς, προκειμένου να διαπιστωθεί αν το περιεχόμενο τους συνάδει με τα ερευνητικά ερωτήματα και τους στόχους της μελέτης. Τα άρθρα που δεν πληρούσαν τα προκαθορισμένα κριτήρια ποιότητας, όπως η σαφήνεια στους στόχους, η επάρκεια της μεθοδολογίας και η τεκμηρίωση των συμπερασμάτων, αποκλείστηκαν από το τελικό σύνολο των αναφορών, επιτρέποντας έτσι την επικέντρωση σε 58 εργασίες που προσφέρουν υψηλής ποιότητας δεδομένα και ανάλυση.

Φίλτρο 4: Σχετικότητα με το αντικείμενο μελέτης

Στο τελευταίο στάδιο, εξετάστηκε το πλήρες κείμενο των άρθρων που είχαν περάσει από τα προηγούμενα φίλτρα. Τα άρθρα που δεν ήταν άμεσα σχετιζόμενα με την περιοχή μελέτης αποκλείστηκαν.

Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί:



Εικόνα 2. 1 Διάγραμμα ροής του τρόπου επιλογής των εργασιών

Αφού περάστηκε η διαδικασία των φίλτρων, οι επιλεγμένες δημοσιεύσεις ήταν 26 και αποτέλεσαν τη βάση της ανάλυσης της παρούσας συστηματικής ανασκόπησης. Σε όλες τις μελέτες, κοινός παράγοντας ήταν η χρήση αλγορίθμων της οικογένειας Round Robin, οι οποίοι συγκρίνονταν με άλλους γνωστούς αλγορίθμους βάσει διάφορων παραμέτρων απόδοσης.

2.3 Η ταυτότητα της έρευνας

2.3.1 Εργαλεία προσομοίωσης

Οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με το Load Balancing σε SDN δίκτυα χρησιμοποίησαν μια σειρά από εργαλεία προσομοίωσης και πλατφόρμες για να δημιουργήσουν τα περιβάλλοντα εργασίας τους και να συλλέξουν μετρήσεις απόδοσης. Τα πιο δημοφιλή εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα *Mininet*, *CloudSim 3.0.3*, *F5*, *NS-3 simulator*, και *OpenStack*. Κάθε εργαλείο διαθέτει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα, και ενδείκνυται για συγκεκριμένα σενάρια μελέτης.

Mininet: Το Mininet είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο για τη δημιουργία δικτυακών τοπολογιών SDN. Εξομοιώνει δίκτυα πλήρως λειτουργικών διακομιστών, διακοπτών, και συνδέσεων με εξαιρετικά μικρό κόστος υπολογιστικής ισχύος, καθώς

βασίζεται σε containers Linux. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η υποστήριξη πραγματικών SDN ελεγκτών, όπως OpenFlow, που επιτρέπει τη γρήγορη ανάπτυξη και δοκιμή αλγορίθμων Load Balancing σε περιβάλλοντα που προσομοιώνουν μικρά έως μεσαία data centers. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για μελέτες που απαιτούν ρεαλιστική απεικόνιση της απόδοσης σε SDN δίκτυα.

CloudSim 3.0.3: Το CloudSim είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης ανοιχτού κώδικα για μελέτες σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους (Cloud). Είναι ιδανικό για την ανάλυση της απόδοσης των συστημάτων σε μεγάλη κλίμακα, όπως data centers και υπηρεσίες παροχής νέφους. Παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης σύνθετων διαχειριστικών πολιτικών, όπως κατανομή πόρων και κατανομή φόρτου. Το CloudSim επιτρέπει την προσαρμογή των μοντέλων υποδομής και την προσομοίωση των αλγορίθμων κατανομής, κάνοντας το ιδανικό για μελέτες που επικεντρώνονται στη βελτίωση των υπηρεσιών σε μεγάλα, κατανεμημένα περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους.

F5: Το F5 είναι μια εμπορική πλατφόρμα που εστιάζει κυρίως στη διαχείριση δικτυακών πόρων και την εξισορρόπηση φορτίου σε πραγματικά δίκτυα. Το εργαλείο αυτό προσφέρει δυνατότητες βελτιστοποίησης της απόδοσης δικτύου, ασφάλειας και εφαρμογής πολιτικών διαχείρισης φόρτου. Η ενσωμάτωση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το Intelligent Traffic Management και το Application Delivery Controller (ADC), το καθιστούν ιδανικό για επιχειρηματικά περιβάλλοντα και μελέτες που εστιάζουν στην επιχειρησιακή συνέχεια και στην παροχή υπηρεσιών υψηλής απόδοσης.

NS-3 Simulator: Το NS-3 είναι ένα ευέλικτο εργαλείο προσομοίωσης δικτύων που προσφέρει λεπτομερή και ακριβή προσομοίωση πρωτοκόλλων και τοπολογιών δικτύου. Προσφέρει δυνατότητες διαχείρισης χαμηλού επιπέδου και προσομοίωσης σε πακέτο επίπεδο, καθιστώντας το ιδανικό για ερευνητές που μελετούν την απόδοση πρωτοκόλλων δικτύου σε ποικίλα περιβάλλοντα, όπως τα δίκτυα κέντρων δεδομένων (DCN) και τα ασύρματα δίκτυα. Η μεγάλη ακρίβεια και η ευελιξία του NS-3 το καθιστούν κατάλληλο για μελέτες που απαιτούν ακριβείς μετρήσεις απόδοσης και διαχείρισης ροής.

OpenStack: Το OpenStack είναι μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα για τη δημιουργία και διαχείριση ιδιωτικών και δημόσιων υποδομών νέφους. Παρέχει μια πλήρη σουίτα εργαλείων για τη διαχείριση υπολογιστικών, αποθηκευτικών και δικτυακών πόρων σε μεγάλα περιβάλλοντα νέφους. Το OpenStack είναι ιδανικό για μελέτες που απαιτούν την

προσομοίωση ενός πλήρους περιβάλλοντος νέφους με δυνατότητες αυτοματισμού και εικονικοποίησης, προσφέροντας μεγάλη επεκτασιμότητα και προσαρμοστικότητα.

Συνολικά, η επιλογή του κατάλληλου εργαλείου εξαρτάται από τις ιδιαίτερες ανάγκες της κάθε μελέτης, όπως η κλίμακα, η πολυπλοκότητα, και το είδος του περιβάλλοντος (π.χ. SDN, Cloud, DCN), καθώς και από τις απαιτήσεις για ακρίβεια, ταχύτητα και προσομοίωση πραγματικών σεναρίων. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι προτιμήσεις των ερευνητών ανά εργαλείο και σε αυτό αποτυπώνεται η συντριπτική υπεροχή του mininet ως εργαλείο μελέτης και κατανόησης του τρόπου λειτουργίας των SDN δικτύων καθώς και αιχμή του δόρατος των προσπαθειών εξέλιξής του.



Εικόνα 2. 2 Λογισμικά προσομοίωσης που αξιοποιήθηκαν

Από το παραπάνω διάγραμμα λείπει η αναφορά σε λογισμικά προσομοίωσης από την εργασία που αναφέρεται στον Dynamic Weighted Round Robin. Αυτό γιατί και στην εργασία αυτή οι συγγραφείς έχουν καταφύγει στην μαθηματική επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από την πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησαν για να αποδείξουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου.

2.3.2 Ταξινόμηση με βάση τους εκδότες

Για τη συλλογή των δεδομένων και τη διαμόρφωση της θεωρητικής βάσης, εξετάστηκαν και μελετήθηκαν διεξοδικά 26 επιστημονικές εργασίες όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Οι εργασίες αυτές αντλήθηκαν από διάφορα έγκυρα αποθετήρια. Συγκεκριμένα:

- **IEEE Xplore:** Η κύρια πηγή της μελέτης (15 εργασίες) είναι ένα από τα κορυφαία αποθετήρια επιστημονικών άρθρων στον τομέα της τεχνολογίας, της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Παρέχει πρόσβαση σε πληθώρα εργασιών υψηλής ποιότητας από συνέδρια και περιοδικά του IEEE. Η κυριαρχία του οφείλεται στην εξειδίκευση στα δίκτυα και τα SDN, την ποικιλία συνεδρίων και περιοδικών, τη διαδικασία αυστηρής αξιολόγησης που διασφαλίζει την ποιότητα των δημοσιεύσεων, και την παγκόσμια εμβέλειά του. Επιπλέον, το IEEE προωθεί έρευνα αιχμής σε αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως η εξισορρόπηση φορτίου και τα SDN.

- **Springer Link:** Από το συγκεκριμένο αποθετήριο αντλήθηκαν 6 εργασίες. Το SpringerLink είναι μια ευρέως γνωστή πλατφόρμα που φιλοξενεί επιστημονικές δημοσιεύσεις σε ποικίλα πεδία, όπως η πληροφορική, οι εφαρμοσμένες επιστήμες και η μηχανική.

- **IJECE (International Journal of Electrical and Computer Engineering):** Ένα αξιολόγο περιοδικό με έμφαση στις ηλεκτρικές και υπολογιστικές επιστήμες, το οποίο συνεισέφερε μία εργασία σχετική με το θέμα της εξισορρόπησης φορτίου.

- **ACM (Association for Computing Machinery):** Το ACM Digital Library είναι ένα κορυφαίο αποθετήριο στις επιστήμες των υπολογιστών, με έμφαση σε καινοτόμες τεχνολογίες και προηγμένα θέματα όπως η δικτύωση και τα SDN. Από εδώ αντλήθηκε μία εργασία.

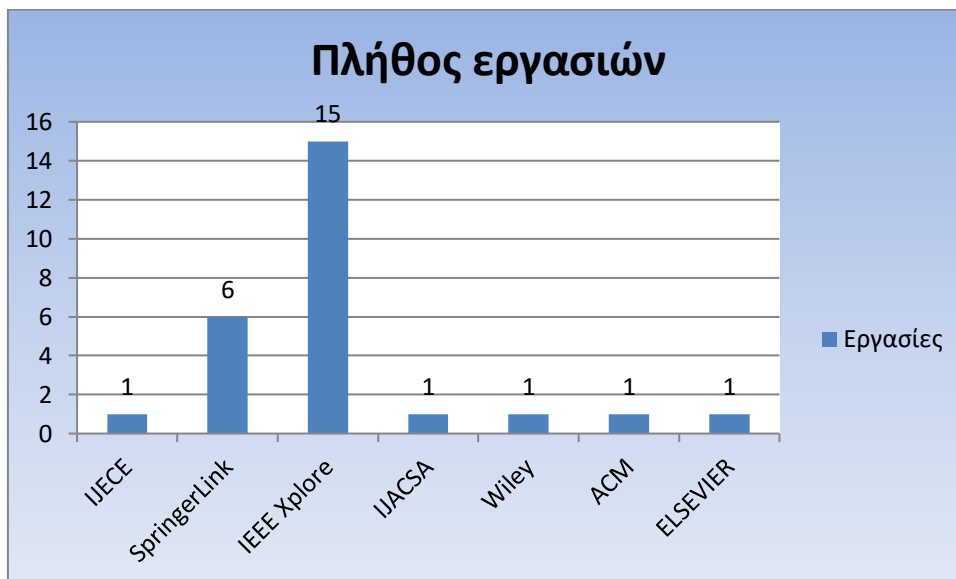
- **IJACSA (International Journal of Advanced Computer Science and Applications):** Το συγκεκριμένο περιοδικό εστιάζει σε καινοτόμες έρευνες στις επιστήμες των υπολογιστών και συνεισέφερε επίσης μία εργασία.

- **Wiley Online Library:** Από την πλατφόρμα αυτή αντλήθηκε μία εργασία. Το Wiley είναι γνωστό για τη δημοσίευση υψηλής ποιότητας επιστημονικού υλικού σε ένα ευρύ φάσμα θεματικών πεδίων, περιλαμβάνοντας και τα δίκτυα υπολογιστών.

-**Elsevier:** Ένα από τα κορυφαία αποθετήρια επιστημονικής έρευνας μέσω του ScienceDirect, από το οποίο αντλήθηκε 1 εργασία σχετική με την εξισορρόπηση φορτίου.

Όσον αφορά το γεγονός ότι οι περισσότερες εργασίες προέρχονται από το IEEE Xplore – βλ. παρακάτω εικόνα- αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί με επισήμανση ότι το συγκεκριμένο αποθετήριο αντικατοπτρίζει την εξειδίκευση και την αναγνωρισιμότητα του IEEE στον

τομέα των τεχνολογιών δικτύωσης, καθιστώντας το την κύρια επιλογή για έρευνα σε αυτό το αντικείμενο.



Εικόνα 2. 3 Πλήθος εργασιών ανά αποθετήριο

2.3.3 Ταξινόμηση με βάση το έτος έκδοσης

Στην παρούσα εργασία, δόθηκε προτεραιότητα στη μελέτη εργασιών που έχουν δημοσιευθεί από το **2020 και έπειτα**, καθώς τα δίκτυα SDN και οι σχετικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, με την πρόοδο στις τεχνολογίες δικτύων και την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των υποδομών. Συγκεκριμένα, οι περισσότερες εργασίες προέρχονται από τα έτη 2022 (12 εργασίες), 2021 (5 εργασίες), 2020 (3 εργασίες), 2023 (3 εργασίες) και 2024 (2 εργασίες), γεγονός που αντικατοπτρίζει τη συνεχή ερευνητική δραστηριότητα και τις καινοτομίες στο πεδίο.

Αν και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η εργασία αυτή εξετάζει αλγόριθμους εξισορρόπησης φορτίου από το 2020 και μετά, με έμφαση στον ρόλο του Round Robin κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθεί σε αυτή και ο Weighted Round Robin (WRR) ο οποίος προτάθηκε το 2019. Αυτό έγινε αφ' ενός λόγω της σχετικότητάς του, καθώς βασίζεται στον RR και προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην εξισορρόπηση φορτίου, αφ' ετέρου δε αρκετοί σύγχρονοι αλγόριθμοι, που αναπτύχθηκαν μετά το 2020, βασίζονται στις αρχές του WRR. Η κατανόηση του WRR είναι κρίσιμη για την ανάλυση αυτών των αλγορίθμων,

επιτρέποντας μια πληρέστερη ανάλυση των εξελίξεων στην εξισορρόπηση φορτίου στα SDN δίκτυα.



Εικόνα 2. 4 Χρονολογική κατανομή των μελετημένων εργασιών

Από το 2020 και μετά, οι εργασίες επικεντρώνονται σε πιο σύγχρονες εφαρμογές, γεγονός που αντικατοπτρίζει την ενσωμάτωση των SDN στα δίκτυα υπολογιστών. Η επιλογή της εστίασης σε πιο πρόσφατες εργασίες εξασφαλίζει ότι τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης είναι εναρμονισμένα με τις σύγχρονες προκλήσεις και τις τρέχουσες τεχνολογικές τάσεις.

3. Εισαγωγή στο ρόλο του RR στην εξισορρόπηση φορτίου

Όπως έχει προαναφερθεί ο αλγόριθμος RoundRobin (RR) αποτελεί μια από τις πιο θεμελιώδεις και διαδεδομένες μεθόδους εξισορρόπησης φορτίου στα δικτυακά συστήματα. Βασίζεται στην απλή, κυκλική κατανομή των αιτημάτων στους διαθέσιμους διακομιστές, ακολουθώντας μια δίκαιη και τακτική προσέγγιση, η οποία διευκολύνει την ομοιόμορφη διανομή των πόρων χωρίς περίπλοκες διαδικασίες απόφασης. Ωστόσο, με την εξέλιξη των απαιτήσεων στα σύγχρονα δίκτυα και τις εφαρμογές, έχουν προκύψει νέες προκλήσεις που καθιστούν τον RR περιορισμένο σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα και απαιτητικές συνθήκες.

Στο κεφάλαιο αυτό, διερευνούμε τον κεντρικό ρόλο του RR στην εξισορρόπηση φορτίου, παρακολουθώντας τη συμβολή του ως βάση για την ανάπτυξη νεότερων αλγορίθμων και την εξέλιξή του ως μέτρο σύγκρισης με νεότερες τεχνικές. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 3.1, παρουσιάζουμε αλγορίθμους που βασίζονται στην αρχή του RR, αναπτύσσοντας όμως προηγμένα χαρακτηριστικά για την προσαρμογή τους στις σύγχρονες ανάγκες. Στην ενότητα 3.2, εξετάζουμε αλγορίθμους που χρησιμοποιούν τον RR ως μέτρο σύγκρισης, αξιολογώντας την αποδοτικότητα και την ακρίβειά τους σε σχέση με αυτόν. Οι ενότητες 3.3 και 3.4 αναφέρονται στα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς του RR, καταλήγοντας σε συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή του στη διαχείριση των φορτίων και την αναγκαιότητα περαιτέρω βελτιώσεων για τη βελτιστοποίηση της εξισορρόπησης στα δίκτυα.

3.1 Αλγόριθμοι που βασίζονται στον RR

3.1.1 Weighted Round Robin (WRR)

Είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους εξισορρόπησης φορτίου, ειδικά στα SDN. Στα δίκτυα SDN, ο WRR [42] χρησιμοποιείται για την κατανομή πόρων και αιτημάτων μεταξύ διακομιστών ή άλλων πόρων του δικτύου, με βάση τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και την απόδοση των διαθέσιμων κόμβων. Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια παραλλαγή του παραδοσιακού RoundRobin (RR) αλγορίθμου, ο οποίος κατανέμει

αιτήματα σε διακομιστές ή πόρους με κυκλικό τρόπο, χωρίς να λαμβάνει υπόψη το φορτίο ή τις δυνατότητες κάθε πόρου. Ο WRR, όμως, διαφοροποιείται καθώς εισάγει το "βάρος" (weight) κάθε πόρου στο σύστημα κατανομής φορτίου. Δηλαδή, διακομιστές ή πόροι με μεγαλύτερες δυνατότητες (π.χ. CPU, μνήμη, εύρος ζώνης) λαμβάνουν μεγαλύτερο βάρος και επομένως περισσότερα αιτήματα. Στα δίκτυα SDN, ο WRR μπορεί να ενσωματωθεί στο επίπεδο του controller, που αποτελεί την κεντρική νοημοσύνη του δικτύου και που είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την κατανομή της κίνησης (traffic) και την εξισορρόπηση του φορτίου σε διακομιστές, δικτυακές συσκευές και κανάλια. Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- **Βάρη (Weights):** Κάθε διακομιστής ή πόρος στο δίκτυο λαμβάνει ένα προκαθορισμένο βάρος, το οποίο είναι ανάλογο με την υπολογιστική ισχύ ή το εύρος ζώνης του. Διακομιστές με μεγαλύτερο βάρος θα εξυπηρετούν περισσότερα αιτήματα σε σχέση με εκείνους με μικρότερο βάρος.
- **Κυκλική Κατανομή Αιτημάτων:** Παρότι τα αιτήματα κατανέμονται κυκλικά, οι διακομιστές με μεγαλύτερο βάρος θα εξυπηρετούν περισσότερα αιτήματα πριν μεταβεί ο αλγόριθμος στον επόμενο διακομιστή της σειράς. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι ισχυρότεροι διακομιστές δεν παραμένουν υποφορτωμένοι.
- **Δυναμική Προσαρμογή:** Στα SDN, όπου υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης του φορτίου και των συνθηκών δικτύου σε πραγματικό χρόνο, ο WRR μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά. Ο SDNcontroller μπορεί να ενημερώνει τα βάρη των διακομιστών ή των πόρων ανάλογα με την τρέχουσα χρήση ή τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου.
- **Ευελιξία στην Κατανομή Πόρων:** Σε αντίθεση με τον κλασικό RoundRobin αλγόριθμο, ο WRR προσφέρει ευελιξία στην κατανομή πόρων. Στα SDN δίκτυα, όπου οι πόροι μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες, ο WRR εξασφαλίζει ότι διακομιστές με ισχυρότερη υπολογιστική ισχύ ή ευρύτερο εύρος ζώνης λαμβάνουν μεγαλύτερο μερίδιο κίνησης. **Βελτιστοποίηση Απόδοσης:** Επειδή τα αιτήματα κατανέμονται με βάση τις δυνατότητες των διακομιστών, ο WRR μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου, ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα των πόρων.
- **Απλότητα Εφαρμογής:** Ο WRR είναι ένας σχετικά απλός αλγόριθμος, που μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε SDN περιβάλλοντα. Η κυκλική φύση της κατανομής αιτημάτων τον καθιστά εύκολο στη διαχείριση, χωρίς να απαιτεί σύνθετες αποφάσεις.

- Δίκαιη Κατανομή: Παρέχει έναν δίκαιο τρόπο κατανομής των αιτημάτων, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση διακομιστών ή πόρων που έχουν λιγότερες δυνατότητες.
- Υπολογιστικό Κόστος: Αν και ο WRR είναι σχετικά απλός αλγόριθμος, όταν συνδυάζεται με τη δυναμική προσαρμογή βαρών στα SDN δίκτυα, μπορεί να προκύψει επιπλέον υπολογιστικό κόστος λόγω της συνεχούς ενημέρωσης των δεδομένων για το φορτίο.
- Αδυναμία Αντιμετώπισης Δραστικών Αλλαγών: Σε περιπτώσεις που οι συνθήκες του δικτύου αλλάζουν δραστικά, η στατική προσέγγιση των βαρών μπορεί να μην είναι αρκετή. Εδώ απαιτείται πιο δυναμική προσαρμογή, την οποία πρέπει να διαχειριστεί ο SDN controller.

Σε ένα SDN δίκτυο που διαχειρίζεται ένα σύνολο διακομιστών με διαφορετικές δυνατότητες, ο SDN controller μπορεί να εφαρμόσει τον WRR για την κατανομή των αιτημάτων. Αν, για παράδειγμα, ένας διακομιστής έχει διπλάσιες δυνατότητες από έναν άλλο, ο WRR θα διασφαλίσει ότι ο ισχυρότερος διακομιστής θα λάβει διπλάσιο αριθμό αιτημάτων σε σύγκριση με τον λιγότερο ισχυρό. Παράλληλα, ο controller μπορεί να παρακολουθεί το τρέχον φορτίο και να προσαρμόζει τα βάρη αν παρατηρηθεί ανισορροπία. Ο Weighted Round Robin (WRR) αποτελεί μια σημαντική τεχνική εξισορρόπησης φορτίου στα SDN δίκτυα, παρέχοντας ευελιξία και αποδοτικότητα στην κατανομή των αιτημάτων, με βάση τις δυνατότητες των πόρων. Η δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής των βαρών καθιστά τον WRR κατάλληλο για τα ευμετάβλητα και σύνθετα περιβάλλοντα των SDN, όπου η αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου είναι κρίσιμη.

Ο ψευδοκώδικας λειτουργίας του είναι ο:

Begin

Initialize:

servers = [s1, s2, s3, ..., sn] // Λίστα διακομιστών

weights = [w1, w2, w3, ..., wn] // Λίστα βαρών για κάθε διακομιστή

current_weight = 0

max_weight = max(weights) // Το μέγιστο βάρος από όλους τους διακομιστές

```

gcd_weight = gcd(weights)    // Το μέγιστο κοινό διαιρέτη των βαρών

server_index = -1            // Δείκτης διακομιστή

While True:

server_index = (server_index + 1) % n // Επόμενος διακομιστής κυκλικά

    If server_index == 0:

current_weight = current_weight - gcd_weight // Μείωση τρέχοντος βάρους κατά τον gcd

    If current_weight <= 0:

current_weight = max_weight // Επαναφορά στο μέγιστο βάρος αν μηδενιστεί ή γίνει αρνητικό

    If weights[server_index] >= current_weight:

        return servers[server_index] // Επέλεξε τον διακομιστή

End

```

στον οποίο υπάρχουν δύο πίνακες οι οποίοι αρχικοποιούνται, ένας με τους διακομιστές και ένας με τα αντίστοιχα βάρη τους. Το μέγιστο βάρος είναι το μεγαλύτερο από τα βάρη και ο μέγιστος κοινός διαιρέτης (gcd) χρησιμοποιείται για εξισορρόπηση. Ο αλγόριθμος κυκλικά επιλέγει διακομιστές. Αν το βάρος ενός διακομιστή είναι αρκετά μεγάλο, επιλέγεται για το επόμενο αίτημα. Το τρέχον βάρος μειώνεται σε κάθε κύκλο με βάση τον gcd και, όταν γίνει μηδέν, επαναφέρεται στο μέγιστο βάρος.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των παραμέτρων Transfer, Bandwidth, RTTmin, RTTmax, και MDev πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου εξισορρόπησης φορτίου WeightedRoundRobin. Τα δεδομένα για αυτές τις μεταβολές εξήχθησαν από τα γραφήματα που παρέθεσαν οι συγγραφείς, ενώ η σύγκριση

επιτρέπει την ανάδειξη των επιδόσεων του συστήματος με και χωρίς τη χρήση του αλγορίθμου. Όπως διακρίνεται από το γράφημα, η εφαρμογή του WRR είχε σημαντικά θετική επίδραση στις παραμέτρους, με ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση της μεταφοράς δεδομένων (Transfer) και του εύρους ζώνης (Bandwidth), καθώς και στη μείωση των καθυστερήσεων, όπως αυτές αποτυπώνονται στις παραμέτρους RTTmin, RTTmax και MDev. Οι βελτιώσεις αυτές υπογραμμίζουν την αποδοτικότητα του WRR στην εξισορρόπηση του φορτίου και στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.



Εικόνα 3.1 % Μεταβολή των παραπάνω μετρικών σε περιβάλλον με και χωρίς LB

3.1.2 TA-ASLB (Traffic – Aware Adaptive Server Load Balancing)

Είναι σχεδιασμένος για τη βελτιστοποίηση της κατανομής φορτίου σε δίκτυα κέντρων δεδομένων (DCN), λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις μικρές (mice flows) όσο και τις μεγάλες ροές δεδομένων (elephant flows). Ο στόχος του είναι η βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών (QoS), της ενεργειακής απόδοσης και της κλιμακοσιμότητας των υπολογιστικών συστημάτων. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα βελτιωμένο μοντέλο **Weighted Least Connection** και προσαρμόζεται δυναμικά στις συνθήκες του δικτύου, εξισορροπώντας το φορτίο στους διακομιστές με βάση το διαθέσιμο bandwidth. Τα μικρά αιτήματα εξυπηρετούνται γρήγορα από τον διακομιστή με τις λιγότερες συνδέσεις, ενώ τα μεγαλύτερα αιτήματα μεταφέρονται σε λιγότερο φορτωμένους διακομιστές.

Η μέθοδος TA-ASLB [43] χωρίζεται σε τρεις βασικές φάσεις:

α. **Παρακολούθηση κίνησης:** Ο SDN ελεγκτής συλλέγει πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία του δικτύου, παρακολουθώντας τις ροές δεδομένων και το διαθέσιμο bandwidth, καθώς και τους πόρους των διακομιστών.

β. **Προσαρμοστική απόφαση:** Αν μια ροή δεδομένων είναι μικρότερη από 10 kB, χρησιμοποιείται ο κλασικός αλγόριθμος RoundRobin για την κατανομή της σε διακομιστές. Για μεγαλύτερες ροές δεδομένων, εφαρμόζεται ο TA-ASLB, προσαρμόζοντας την κατανομή βάσει των διαθέσιμων πόρων.

γ. **Επιλογή διακομιστή:** Ο αλγόριθμος επιλέγει διακομιστή με βάση το υπολειπόμενο εύρος ζώνης και την υπολογιστική ισχύ κάθε διακομιστή, επιτυγχάνοντας έτσι τη βέλτιστη εξισορρόπηση του φόρτου.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε throughput και latency, καθιστώντας τον αποτελεσματικό για κέντρα δεδομένων που υποστηρίζουν εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον αλγόριθμο όπως τον παραθέτουν οι συγγραφείς στην εργασία τους:

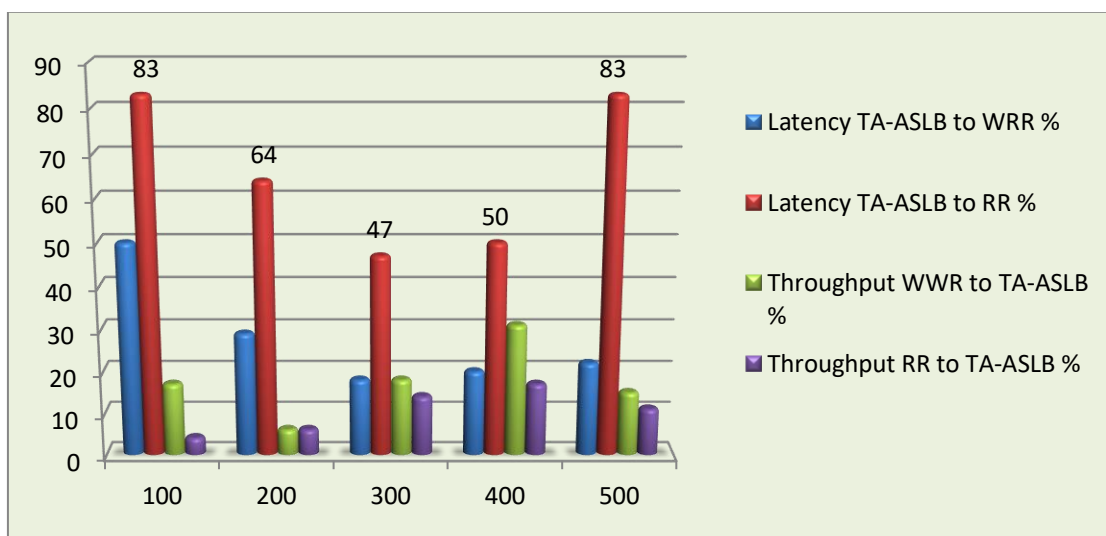
Algorithm 1: TA-ASLB algorithm
Traffic monitoring phase: Data: Flow in the Switches $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ Data: Capacity of all possible links to reach server $L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ Data: Capacity of the servers in the server pool $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ Adaptive decision phase: begin while packet(i) generated by clients do for each $f_i \in F$ do if Flow size (f_i) > Threshold T_s follow Traffic aware load balancing else: follow Round robin load balancing Server selection phase: $[\alpha] = \max (L_i)$ find the servers S_i which are present in this best links $\beta_i = \max (S_i)$ Optimal Server = β_i

Εικόνα 3. 2 Ο ψευδοκώδικας του TA-ASLB

Η λειτουργία του στηρίζεται στη χρήση δύο παραμέτρων: της χωρητικότητας του συνδέσμου προς τον διακομιστή και των χαρακτηριστικών του διακομιστή. Ο στόχος του είναι να βρει τους κόμβους που έχουν μεγαλύτερο υπολειπόμενο εύρος ζώνης. Το

υπολειπόμενο εύρος ζώνης ενός συνδέσμου υπολογίζεται με βάση το φορτίο που διαχειρίζεται ο σύνδεσμος εκείνη τη στιγμή. Οι σύνδεσμοι που μεταφέρουν φορτίο θα χρησιμοποιούν εύρος ζώνης, άρα θα έχουν μικρότερο υπολειπόμενο εύρος ζώνης. Στη συνέχεια, οι κόμβοι ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά με βάση το βάρος του διακομιστή. Αυτό σημαίνει ότι ένας κόμβος με μεγαλύτερο υπολειπόμενο εύρος ζώνης και μεγαλύτερο βάρος θα έχει προτεραιότητα. Έτσι, το φορτίο μοιράζεται μεταξύ των κόμβων με βάση δύο παραμέτρους: το εύρος ζώνης και το βάρος. Με αυτόν τον τρόπο, το φορτίο κατανέμεται βέλτιστα μεταξύ των κόμβων.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές στις παραμέτρους throughput και latency κατά τη σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου TA-ASLB με τους αλγόριθμους WRR και RR, για διαφορετικά parallel requests (100, 200, 300, 400, 500 πακέτων TCP των 1024 bytes). Όπως φαίνεται, ο αλγόριθμος TA-ASLB επιτυγχάνει σημαντικές βελτιώσεις σε αυτές τις δύο παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η ποσοστιαία μεταβολή στο throughput υπολογίστηκε με βάση τη βελτίωση που επέφερε ο TA-ASLB σε σχέση με τους WRR και RR, αντίστοιχα. Αντίθετα, στην περίπτωση της παραμέτρου latency, η % μεταβολή υπολογίστηκε με γνώμονα τη χειροτέρευση που παρατηρείται κατά τη μετάβαση από τον TA-ASLB στους άλλους δύο αλγόριθμους. Το γράφημα αυτό υπογραμμίζει την υπεροχή του TA-ASLB, ιδιαίτερα όσον αφορά τη βελτίωση του throughput, ενώ καταδεικνύει τις προκλήσεις που παρουσιάζονται στην παράμετρο της καθυστέρησης (latency) όταν γίνεται η μετάβαση από αυτόν στους WRR και RR.



Εικόνα 3. 3 % Μεταβολή του Latency και του Throughput μεταξύ των τριών αλγορίθμων για διαφορετικά parallel requests πακέτων TCP των 1024 bytes

3.1.3 Priority Weighted Round-Robin (PWRR)

Βασίζεται στον αλγόριθμο WRR , αλλά τον μετατρέπει από στατικό σε δυναμικό. Αυτός ο αλγόριθμος βοηθά στον εντοπισμό της κατάλληλης εικονικής μηχανής (VM) με τη βοήθεια πληροφοριών που περιλαμβάνουν την επεξεργαστική ισχύ της VM, το μήκος των εργασιών, την προτεραιότητα των εισερχόμενων εργασιών και τον χρόνο επεξεργασίας που απαιτείται για τις VMs να ολοκληρώσουν εργασίες ίσης ή υψηλότερης προτεραιότητας.

Όταν μια εργασία φτάνει στο σύστημα, καταγράφονται πληροφορίες όπως το μήκος και η προτεραιότητα της εργασίας. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το βάρος κάθε VM, το οποίο αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρώσει τις εργασίες ίσης ή υψηλότερης προτεραιότητας στην ουρά της. Το βάρος της VM αυξάνεται αν ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι μικρότερος και αντίστροφα. Η εισερχόμενη εργασία προωθείται στη VM με το μεγαλύτερο βάρος.

Σε γενικές γραμμές, ο χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία μιας εργασίας μπορεί να διαφέρει κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης. Σε αυτή την περίπτωση, πραγματοποιείται μετανάστευση εργασιών. Η εργασία υψηλής προτεραιότητας από την ουρά της υπερφορτωμένης VM μεταφέρεται στην υποφορτωμένη ή ιδανικά φορτωμένη VM, εντοπίζοντας ποια VM έχει λιγότερες εργασίες ίσης ή υψηλότερης προτεραιότητας. Αυτό βοηθά στην ταχύτερη ολοκλήρωση των εργασιών υψηλής προτεραιότητας και η μετανάστευση βοηθά στην αύξηση της σωστής αξιοποίησης των πόρων. Ο αλγόριθμος έτσι όπως δίνεται από τους συγγραφείς παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα:

Algorithm 1 Priority Weighted RR Algorithm Pseudocode

- (1) Identify the priority of an incoming task.
 - (2) Calculate waiting time for each VM based on the priority on an incoming tasks.
 - (3) A weight is given to each VM based on the waiting time, VM with less waiting time should have more weight.
 - (4) Assign an incoming task to VM which has less waiting time based on priority.
 - (5) Once the incoming task is assigned, calculate threshold and load in each VM.
 - (6) If any VM is found to be overloaded
 - (a) Pick high priority task from the task waiting queue of the VM.
 - (b) Identity the under loaded VMs.
 - (c) Select the VM which has less number of tasks of same or higher priority.
 - (d) Continue till it has overloaded VMs.
 - (7) Process the high priority task from the waiting queue.
 - (8) If the low priority task is waiting for more than fixed number of iterations, increase the priority of the waiting task by one level
 - (9) Allow the VM to pick the next task from the waiting queue, it should select the high priority task from the queue and scheduler will continue from step 1 simultaneously
-

Εικόνα 3. 4 Ο ψευδοκώδικας του PRR

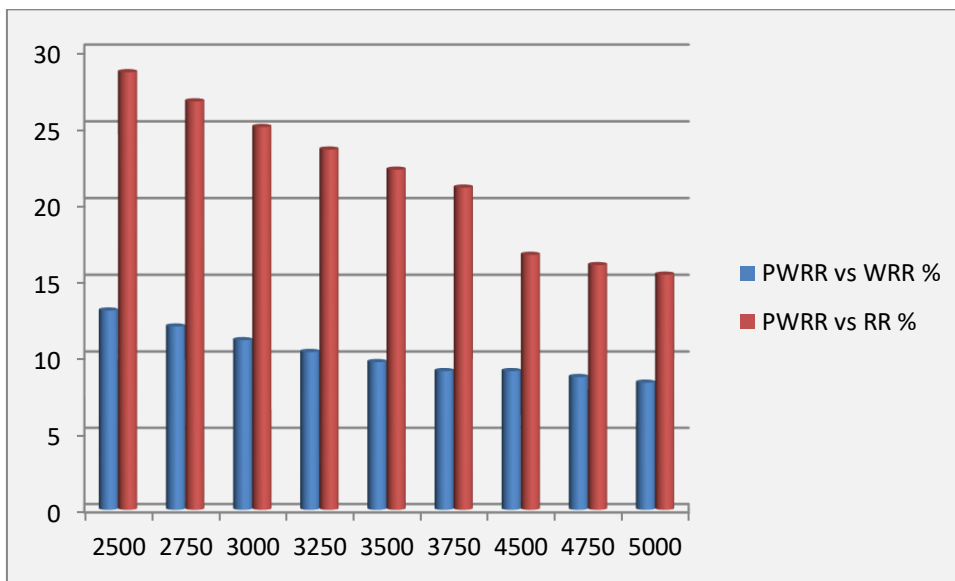
Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατηγοριοποιεί τα αιτήματα με βάση την προτεραιότητα, εξυπηρετώντας πρώτα τα πιο κρίσιμα αιτήματα και διασφαλίζοντας ότι οι πόροι κατανέμονται ανάλογα με τη σημασία κάθε αιτήματος. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει την αποδοτική κατανομή πόρων σε περιβάλλοντα όπου η προτεραιότητα εξυπηρέτησης είναι κρίσιμη.

Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται, συγκρίνονται οι επιδόσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους Weighted Round Robin και RoundRobin ως προς το *execution cost* για διάφορα πλήθη cloudlets. Το *execution cost* αναφέρεται στον συνολικό χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση των cloudlets ανάλογα με την προτεραιότητα της εκάστοτε εργασίας. Το διάγραμμα δείχνει ξεκάθαρα τη βελτίωση του PWRR σε σχέση με τους WRR και RR.

Όπως φαίνεται από τα δεδομένα, ο PWRR [44] επιδεικνύει σταθερές βελτιώσεις σε σύγκριση με τον WRR και τον RR. Η ποσοστιαία μεταβολή στο *execution cost* μεταξύ του PWRR και του WRR κυμαίνεται από 8.33% έως 13.04%, ανάλογα με το πλήθος των cloudlets, με τις μεγαλύτερες βελτιώσεις να εμφανίζονται στα μικρότερα μεγέθη cloudlets. Αντίστοιχα, η

σύγκριση μεταξύ του PWRR και του RR αποκαλύπτει ακόμα μεγαλύτερη διαφορά, με ποσοστιαίες μεταβολές που κυμαίνονται από 15.38% έως 28.57%, τονίζοντας τη σημαντική απόδοση του PWRR έναντι του RR, ειδικά σε μικρότερα σύνολα cloudlets.

Συνολικά, το διάγραμμα επιβεβαιώνει την ανωτερότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου PWRR στην εκτέλεση εργασιών προτεραιότητας σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους WRR και RR, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση και μειώνοντας το κόστος εκτέλεσης σε διάφορα μεγέθη cloudlets.



Εικόνα 3.5 % Μεταβολή του Execution cost για διάφορα πλήθη cloudlets

3.1.4 Improved Weighted Round Robin (IWRR)

Βασίζεται στη συνδυασμένη δυναμική και στατική κατανομή εργασιών στις εικονικές μηχανές (VMs), λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις δυνατότητες και το φορτίο των VMs όσο και την προτεραιότητα και το μέγεθος των εργασιών. Ο στόχος του IWRR [45] είναι η αποδοτική αξιοποίηση των πόρων στο cloud computing και η βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων.

Κατά τη στατική κατανομή, ο αλγόριθμος αξιολογεί την επεξεργαστική ικανότητα των VMs και το πλήθος και το μήκος των εργασιών για την αρχική τοποθέτησή τους. Στη συνέχεια, κατά την εκτέλεση, εφαρμόζεται δυναμική κατανομή, όπου το φορτίο των VMs επανεκτιμάται σε πραγματικό χρόνο και γίνεται ανακατανομή των εργασιών, αν

χρειάζεται. Σε περιπτώσεις που εργασίες διαρκούν περισσότερο από το αναμενόμενο λόγω της φύσης τους, ο εξισορροπητής φορτίου αναδιανέμει αυτές τις εργασίες σε υποεκμεταλλευμένες VMs για να ελαχιστοποιήσει τις καθυστερήσεις.

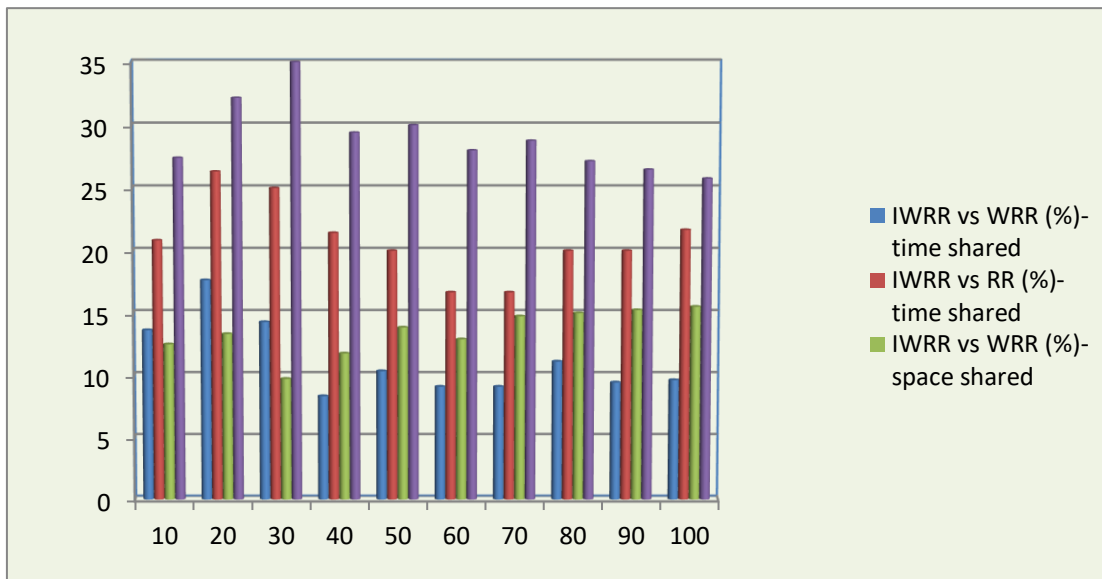
Ο IWRR δεν επιβαρύνει συνεχώς το σύστημα παρακολουθώντας τις VMs, αλλά επανεξετάζει το φορτίο τους μετά την ολοκλήρωση κάθε εργασίας. Εάν μια VM υπερφορτωθεί, ο εξισορροπητής μεταφέρει εργασίες σε άλλες VMs για να διατηρηθεί η ισορροπία του συστήματος. Ο Resource Monitor επικοινωνεί με τις VMs για την παρακολούθηση της κατάστασής τους και ενημερώνει τον εξισορροπητή για τις διαθέσιμες δυνατότητες και τα τρέχοντα φορτία.

Το σύστημα περιλαμβάνει πέντε μονάδες: τον στατικό κατανεμητή για την αρχική τοποθέτηση, τον δυναμικό κατανεμητή για την κατανομή σε πραγματικό χρόνο, τον εξισορροπητή για την ανακατανομή εργασιών, τον κατανεμητή αλληλεξαρτώμενων εργασιών και τον επόπτη πόρων. Έτσι, ο αλγόριθμος επιδιώκει την αποδοτική κατανομή του φορτίου και τη μείωση καθυστερήσεων, ενισχύοντας την ικανοποίηση των χρηστών και την απόδοση του συστήματος.

Συνολικά, ο IWRR αξιοποιεί τον δυναμικό κατανεμητή, ο οποίος εκχωρεί εργασίες βάσει του εκκρεμούς χρόνου εκτέλεσης στις VMs, και τον εξισορροπητή φορτίου, ο οποίος διασφαλίζει την ισορροπημένη κατανομή εργασιών ανάμεσα στις VMs σε πραγματικό χρόνο, αποτρέποντας την υπερφόρτωση και ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις.

Οι δύο αλγόριθμοι που δίνονται από τους συγγραφείς, αυτός του δυναμικού σχεδιασμού αλλά και αυτός της εξισορρόπησης δίνονται, λόγω μεγέθους, στο παράρτημα.

Το διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζει τις ποσοστιαίες διαφορές στον χρόνο ολοκλήρωσης εργασιών του αλγορίθμου σε σχέση με τους αλγόριθμους Weighted Round Robin και RoundRobin, σε συνάρτηση με τον αριθμό των εικονικών μηχανών (VMs). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από δύο διαφορετικές περιπτώσεις προγραμματισμού: time shared και space shared.



Εικόνα 3. 6 % Βελτίωση του execution time ανάλογα με το πλήθος των VMs

Στην περίπτωση **timeshared**, όπου η κατανομή των εργασιών γίνεται σε έναν δυναμικό χρόνο, παρατηρείται μια σταθερή βελτίωση του IWRR έναντι του WRR και του RR, με ποσοστιαίες διαφορές που κυμαίνονται από 12.50% έως 15.52% για το WRR και από 25.76% έως 35.00% για το RR. Αυτό σημαίνει ότι ο IWRR μειώνει σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης των εργασιών, ιδιαίτερα σε σύγκριση με τον RR, ο οποίος δεν λαμβάνει υπόψη το μήκος των εργασιών ή τη δυνατότητα επεξεργασίας κάθε VM.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση **spaceshared**, η οποία αφορά στατικό καταμερισμό εργασιών ανάμεσα σε VMs, η βελτίωση του IWRR παραμένει σταθερά καλύτερη. Οι διαφορές κυμαίνονται από 10.42% έως 16.94% έναντι του WRR και από 21.28% έως 40.43% έναντι του RR, με τη βελτίωση να γίνεται εμφανέστερη σε συστήματα με λιγότερες VMs.

Η υπεροχή του αλγόριθμου IWRR οφείλεται στη δυνατότητά του να λαμβάνει υπόψη το μήκος των εργασιών και τη δυναμικότητα των VMs, γεγονός που επιτρέπει την καλύτερη κατανομή των εργασιών και τη μείωση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης. Οι διαφορές είναι ιδιαίτερα αισθητές στην περίπτωση του RR, που βασίζεται σε έναν απλό μηχανισμό κατανομής χωρίς περαιτέρω κριτήρια, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις.

3.1.5 W-RRLC και Hybrid Least Weight

Οι δύο αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου που περιγράφονται παρακάτω βασίζονται στην ίδια θεμελιώδη αρχή, δηλαδή στον συνδυασμό των αλγορίθμων *Least Connection (LC)* και *Weighted RoundRobin (WRR)*, με στόχο την κατανομή των αιτημάτων στους διακομιστές με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Ωστόσο, παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις τόσο στον τρόπο λειτουργίας όσο και στους στόχους που επιδιώκουν να επιτύχουν.

Α. Ο αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου **W-RRLC (Weighted-Round Robin with Least Connections)** [46] είναι ένας συνδυασμός δύο παραδοσιακών αλγορίθμων, του RoundRobin (RR) και του Least Connections (LC), σχεδιασμένος να υπερβεί τις περιορισμένες δυνατότητες αυτών των δύο προσεγγίσεων. Ο αλγόριθμος στοχεύει στη βελτίωση της αξιοποίησης των πόρων του διακομιστικού cluster και της αξιοπιστίας, μέσω δυναμικής κατανομής φορτίου και ανίχνευσης βλαβών. Οι Βασικές Αρχές του W-RRLC είναι:

1. **Καθορισμός συνολικού βάρους για κάθε διακομιστή:** Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη τις διαφορές στην απόδοση των διακομιστών, οι οποίες οφείλονται σε παράγοντες όπως η χρήση CPU, η διαθέσιμη μνήμη και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Για κάθε διακομιστή υπολογίζεται ένα συνολικό βάρος με βάση την απόδοση του, ώστε οι διακομιστές με ισχυρότερη απόδοση να διαχειρίζονται περισσότερο φορτίο. Οι αναλογίες για CPU, μνήμη και εύρος ζώνης καθορίζονται σε 0.5, 0.4 και 0.1 αντίστοιχα.
2. **Δημιουργία λίστας φόρτου σε πραγματικό χρόνο:** Ο αλγόριθμος διατηρεί μια λίστα φόρτου σε πραγματικό χρόνο, η οποία ενημερώνεται περιοδικά με βάση τις τρέχουσες συνδέσεις κάθε διακομιστή. Ο συνδυασμός του αριθμού συνδέσεων με το συνολικό βάρος καθορίζει την προτεραιότητα του κάθε διακομιστή. Εάν κάποιος διακομιστής ανιχνευθεί ως μη διαθέσιμος, αφαιρείται από τη λίστα.
3. **Κανόνας κατανομής φόρτου:** Όταν ένας διακομιστής λαμβάνει αιτήσεις, αυτές κατανέμονται με βάση τη λίστα φορτίου και τις αρχές του RoundRobin, συνδυάζοντας το συνολικό βάρος του διακομιστή και τον αριθμό συνδέσεων. Η λίστα αυτή ενημερώνεται δυναμικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προσαρμοζόμενη στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου.

Ο αλγόριθμος W-RRLC επιδιώκει να επιλύσει τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου, προσφέροντας μια πιο δυναμική και προσαρμοστική προσέγγιση για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των διακομιστικών cluster. Στην εργασία τους οι συγγραφείς δεν έχουν παραθέσει ούτε τον αλγόριθμο ούτε τον ψευδοκώδικα λειτουργίας του.

B. Ο **Hybrid Least Weight** [47] σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της υπερφόρτωσης και την έλλειψη ευέλικτων μηχανισμών εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ κατανεμημένων ελεγκτών SDN. Ο στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι η αποτελεσματική κατανομή των πόρων και η βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, ιδίως σε συνθήκες υψηλού φόρτου.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτεινόμενου αυτού αλγορίθμου είναι:

1. Ο αλγόριθμος βασίζεται-όπως προαναφέρθηκε-σε μια υβριδική τεχνική που συνδυάζει τον *Least Connection* και τον *Weighted RoundRobin*. Ο *Least Connection* εξασφαλίζει ότι κάθε διακομιστής δέχεται αιτήματα ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών συνδέσεων του, δίνοντας προτεραιότητα σε εκείνους με τις λιγότερες συνδέσεις. Αυτό βοηθά στην ισορροπία του φόρτου μεταξύ των διακομιστών, αποτρέποντας την υπερφόρτωση κάποιων από αυτούς, ειδικά όταν οι συνδέσεις έχουν μεγάλες χρονικές διάρκειες. Ο *Weighted Round Robin*, από την άλλη, εισάγει βάρη στη διαδικασία εξισορρόπησης, επιτρέποντας στους διακομιστές με υψηλότερη επεξεργαστική ισχύ ή δυνατότητες να δέχονται περισσότερα αιτήματα. Αυτή η στρατηγική βελτιώνει την απόδοση του συστήματος σε περιπτώσεις όπου οι διακομιστές δεν έχουν την ίδια επεξεργαστική ικανότητα.

2. *Δυναμική Ενημέρωση Φορτίου*: Ο αλγόριθμος βασίζεται στη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τους διακομιστές, σχετικά με το τρέχον φορτίο τους. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την περιοδική αποστολή ICMPecho μηνυμάτων (ping) από τον ελεγκτή στα διακομιστικά συστήματα, προκειμένου να αξιολογηθεί το βάρος και η τρέχουσα κατάσταση κάθε διακομιστή. Ο ελεγκτής λαμβάνει τα δεδομένα αυτά και τα χρησιμοποιεί για να καθορίσει ποιος διακομιστής είναι ο πιο κατάλληλος για να εξυπηρετήσει ένα νέο αίτημα. Αυτό διασφαλίζει ότι τα αιτήματα κατευθύνονται στους διακομιστές με τον χαμηλότερο φόρτο, γεγονός που μειώνει τους χρόνους απόκρισης και βελτιώνει τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή προσθέτει επιπλέον υπολογιστικό κόστος, καθώς απαιτεί τη συνεχή παρακολούθηση της

κατάστασης του φόρτου και την περιοδική ενημέρωση από τους διακομιστές προς τον ελεγκτή.

3. *Αντιμετώπιση των Αδυναμιών του WRR*: Η τεχνική που προτείνεται λαμβάνει υπόψη τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει ο απλός RoundRobin αλγόριθμος, ο οποίος, χωρίς την εφαρμογή βαρών, ενδέχεται να κατευθύνει τα αιτήματα σε διακομιστές με χαμηλότερη δυνατότητα διαχείρισης φόρτου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των καθυστερήσεων, ειδικά όταν το εισερχόμενο φορτίο κατευθύνεται σε διακομιστές που βρίσκονται πιο μακριά στο δίκτυο. Η υβριδική προσέγγιση του προτεινόμενου αλγορίθμου εξαλείφει αυτή την αδυναμία, εξισορροπώντας καλύτερα το φορτίο μεταξύ διακομιστών με βάση τον αριθμό των ενεργών συνδέσεων και τις δυνατότητές τους, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα να δρομολογηθεί το φορτίο σε έναν υπερφορτωμένο διακομιστή.

4. *Μηχανισμός Ενημέρωσης και Απόφασης*: Ο ελεγκτής του δικτύου παίζει κεντρικό ρόλο στην εξισορρόπηση του φορτίου, καθώς είναι υπεύθυνος για την απόφαση εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα, η διαδικασία περιλαμβάνει την ενημέρωση για την κατάσταση του φόρτου (loadinforming), την απόφαση για την κατανομή του φορτίου (load balancing decision) και τη μετανάστευση των μεταγωγών (switch migration) για την ομοιόμορφη κατανομή του φόρτου στους διακομιστές. Ο ελεγκτής λαμβάνει υπόψη του μετρήσεις φόρτου και συγκρίνει τις τιμές με προκαθορισμένα κατώφλια για να αποφασίσει αν απαιτείται εξισορρόπηση. Εάν ο φόρτος ενός διακομιστή ξεπεράσει τα όρια, το σύστημα μπορεί να αναδιανείμει το φορτίο σε άλλους διακομιστές, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

5. *Προσαρμογή στις Συνθήκες Δικτύου*: Ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί με στόχο να ανταποκρίνεται στις δυναμικές αλλαγές της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη του φόρτου και τις απρόβλεπτες αλλαγές που μπορεί να προκύψουν, η τεχνική αυτή προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες, εξασφαλίζοντας την καλύτερη κατανομή των αιτημάτων ανάμεσα στους διακομιστές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις που υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στον αριθμό των συνδέσεων ή στην ένταση της κυκλοφορίας.

6. *Μέτρηση Φορτίου και Προτεραιότητα*: Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αλγορίθμου, παρακολουθείται συνεχώς ο αριθμός των ενεργών συνδέσεων κάθε διακομιστή. Ανάλογα με τις αυξομειώσεις στις συνδέσεις, ο αλγόριθμος δίνει

προτεραιότητα στον διακομιστή με τις λιγότερες ενεργές συνδέσεις. Εάν ορισμένες συνδέσεις λήξουν (π.χ. λόγω χρονικών ορίων), ο αλγόριθμος επαναπροσδιορίζει τις προτεραιότητες για να βεβαιωθεί ότι το νέο αίτημα θα εξυπηρετηθεί από τον διακομιστή με το χαμηλότερο φόρτο.

Συνολικά, το προτεινόμενο σύστημα εξισορρόπησης φορτίου βασίζεται σε μια καινοτόμα υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει την ακρίβεια και τη δυναμική παρακολούθηση του φόρτου του LC με την ευελιξία του WRR, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη λύση για τη βελτίωση της διαχείρισης των πόρων σε δίκτυα SDN.

Στην συγκεκριμένη εργασία οι συγγραφείς δε μας παρέχουν τον ψευδοκώδικα υλοποίησης του αλγορίθμου.

3.1.6 Least Delay Dynamic Weighted Round Robin (LDDWRR)

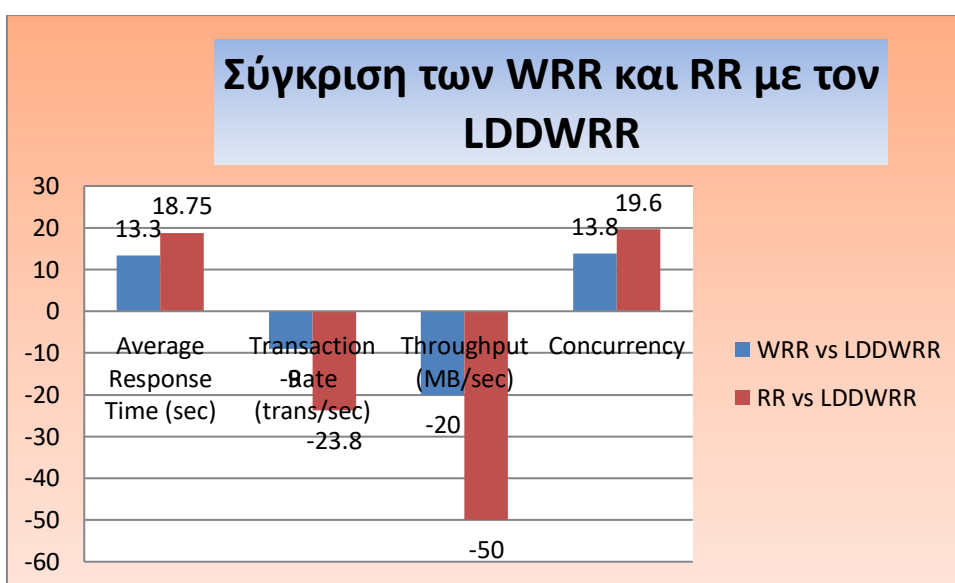
Ο αλγόριθμος που προτείνεται από τους ερευνητές αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή του παραδοσιακού αλγορίθμου κυκλικής περιστροφής (RoundRobin) και του αλγορίθμου κυκλικής περιστροφής με βάρη (Weighted Round Robin - WRR). Ο σκοπός του είναι να ενισχύσει την εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα καθορισμένα από λογισμικό (SDN), επιτρέποντας καλύτερη αξιοποίηση των πόρων και αποφυγή υπερφόρτωσης.

Η βασική λειτουργία του αλγορίθμου LDDWRR [48] στηρίζεται στην κατανομή βαρών (weights) στους διαθέσιμους διακομιστές, αντανakλώντας την ικανότητά τους να διαχειρίζονται αιτήματα. Οι διακομιστές με υψηλότερες προδιαγραφές ή μεγαλύτερη απόδοση λαμβάνουν υψηλότερα βάρη, αναλογικά με τα αιτήματα που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Για παράδειγμα, αν ο διακομιστής 1 είναι πέντε φορές πιο ισχυρός από τον διακομιστή 2, λαμβάνει βάρος 5, ενώ ο δεύτερος βάρος 1. Αυτό σημαίνει ότι τα πρώτα πέντε αιτήματα θα αποδίδονται στον διακομιστή 1 και το επόμενο στον διακομιστή 2, συνεχίζοντας με την ίδια λογική.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδεικνύεται αποτελεσματικός σε περιβάλλοντα όπου οι απαιτήσεις εξυπηρέτησης των χρηστών αλλάζουν δυναμικά. Σε αντίθεση με στατικούς αλγόριθμους, ο LDDWRR λαμβάνει υπόψη ποικίλες παραμέτρους, όπως ο χρόνος καθυστέρησης και η ταχύτητα σύνδεσης, προσαρμόζοντας την κατανομή φορτίου σύμφωνα με την απόδοση του κάθε διακομιστή σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η προσαρμογή γίνεται μέσω του SDN controller, ενώ το πρωτόκολλο OpenFlow εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων, επιτρέποντας κυκλική

κατανομή των αιτημάτων στους διαθέσιμους διακομιστές και αποφυγή υπερφόρτωσης σε κρίσιμους για την επιχείρηση διακομιστές.

Με τα πειράματα που εκτελέστηκαν με το εργαλείο Mininet, ο LDDWRR εμφάνισε σημαντικά καλύτερη απόδοση σε παραμέτρους όπως ο μέσος χρόνος απόκρισης, η απόδοση (throughput), ο ρυθμός συναλλαγών και η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση αιτημάτων, συγκριτικά με τους αλγόριθμους RoundRobin και WRR. Ο αλγόριθμος αυτός είναι κατάλληλος για κέντρα δεδομένων και δικτυακά περιβάλλοντα βασισμένα σε SDN, όπου η υψηλή απόδοση, η ευελιξία και η σταθερότητα στη διαχείριση της κίνησης είναι απαραίτητες.



Εικόνα 3. 7 % μεταβολή της επίδοσης του LDDWRR ανά συγκρινόμενη παράμετρο

Συνοπτικά, ο αλγόριθμος LDDWRR εξισορρόπησης φορτίου αποτελεί μια σημαντική αναβάθμιση στη διαχείριση της κίνησης των SDN δικτύων, προσφέροντας βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων και μείωση του χρόνου απόκρισης. Με την προσαρμοστική του φύση, παρέχει μια αποδοτική λύση στις ανάγκες των σύγχρονων data centers, συμβάλλοντας στη σταθερότητα και την αξιοπιστία των δικτύων.

3.1.7 Συμπεράσματα

Απαντώντας λοιπόν στο «**1ο ερευνητικό ερώτημα**» που τέθηκε, μπορούμε να πούμε ότι οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που βασίζονται στον Round Robin επιτυγχάνουν βελτιώσεις σε

διάφορες κρίσιμες μετρικές απόδοσης, όπως το transfer, το bandwidth, το latency, το throughput, το execution cost, το execution time, το average response time, το transaction rate και το concurrency, σε σύγκριση με τον βασικό αλγόριθμο RR. Με βάση τον υπολογισμό των ποσοστών βελτίωσης για κάθε μετρική, διαπιστώθηκε ότι οι τροποποιήσεις που εισάγουν οι ερευνητές βελτιστοποιούν συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας, όπως η ταχύτερη εκτέλεση, η μείωση καθυστερήσεων και η αυξημένη απόδοση δεδομένων, προσφέροντας πιο αποδοτική διαχείριση φορτίων.

Οι ερευνητές φαίνεται να επικεντρώνονται σε συγκεκριμένα προβλήματα και στόχους που σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της διαχείρισης πόρων. Οι βελτιώσεις που σημειώνονται στις παραπάνω μετρήσεις δείχνουν ότι ένα σημαντικό ζήτημα που τους απασχολεί είναι η ταχύτητα ανταπόκρισης και η καθυστέρηση (latency), ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν πραγματικού χρόνου λειτουργία, όπως οι τηλεδιασκέψεις, τα online παιχνίδια ή τα αυτόνομα συστήματα. Παράλληλα, η καλύτερη αξιοποίηση των πόρων και η αποφυγή συμφόρησης μέσα από την αποδοτική διαχείριση φορτίων υποδηλώνουν την ανάγκη μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων με τον πιο αποδοτικό τρόπο, χωρίς σπατάλη χωρητικότητας ή άλλων πόρων.

Τα ζητήματα που πιθανώς τους προβληματίζουν περιλαμβάνουν την αυξανόμενη ζήτηση για πόρους δικτύου λόγω της ραγδαίας εξάπλωσης των συνδεδεμένων συσκευών IoT, των εφαρμογών streaming και των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης. Επιπλέον, η ανάγκη για μείωση καθυστερήσεων και διαχείριση συμφόρησης συνδέεται με τις προκλήσεις που προκύπτουν από τα πολυσύνθετα δίκτυα, όπως αυτά του 5G, του edge computing και του cloud. Ενδεχομένως, οι ερευνητές να εξετάζουν και την ενεργειακή αποδοτικότητα, που αποτελεί κρίσιμη πτυχή για τη βιωσιμότητα των σύγχρονων δικτύων.

Προσπαθώντας τώρα να συνοψίσουμε όλα τα παραπάνω παραθέτουμε παρακάτω έναν συνοπτικό συγκριτικό πίνακα των βασικών χαρακτηριστικών των αλγορίθμων κατανομής φορτίου που περιγράφηκαν προηγουμένως. Ο πίνακας αυτός παρέχει μια συνοπτική επισκόπηση των διαφορετικών μεθόδων εξισορρόπησης, των κριτηρίων που χρησιμοποιούν για την κατανομή αιτημάτων, καθώς και των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους. Κάθε αλγόριθμος αξιολογείται ως προς την ικανότητά του να ανταποκρίνεται σε δυναμικές συνθήκες δικτύου, την επεκτασιμότητα και την καταλληλότητά του για σύγχρονα περιβάλλοντα SDN και cloud. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό κόστος και η ανθεκτικότητα του κάθε

αλγορίθμου, χαρακτηριστικά που είναι καθοριστικά για την απόδοσή τους σε μεγάλα δίκτυα ή περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις διαθεσιμότητας. Ο πίνακας αναδεικνύει τις διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων ως προς την πολυπλοκότητα υλοποίησης και την καταλληλότητά τους για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, διευκολύνοντας έτσι τη συγκριτική ανάλυση και την επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου για συγκεκριμένες εφαρμογές ή ανάγκες δικτύου. Η παράθεση αυτή αποσκοπεί στη γρήγορη κατανόηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε αλγορίθμου, προσφέροντας ένα σαφές υπόβαθρο για την επιλογή των καταλληλότερων στρατηγικών κατανομής φόρτου, ανάλογα με το εκάστοτε δικτυακό περιβάλλον και τις επιδιώξεις διαχείρισης των πόρων.

Η σύνταξή του υλοποιήθηκε με βάση παραδοχές και ερμηνείες των όσων ισχυρίζονται οι συγγραφείς στις εργασίες τους και για τις οποίες καταβλήθηκε προσπάθεια να αντιστοιχηθούν και να κατανεμηθούν σε μια ποιοτική κλίμακα 3 επιπέδων (Χαμηλό/Απλή – Μέτριο – Υψηλό/Πολύπλοκη) . Η συγκεκριμένη κλίμακα για να αποδοθεί διαγραμματικά αντιστοιχήθηκε σε ποσοτική (Χαμηλό/Απλή → 1, Μέτριο/α → 2, Υψηλό/Πολύπλοκη → 3).

Χαρακτηριστικά	WRR	TA-ASLB	PWRR	DRR	LDDWRR	IWRR	W-RRLC	Hybrid Least Weighted
Μέθοδοι / Προσέγγιση	Βάρη διακομιστών	Συγκέντρωση αιχμών	Ανάλυση φορτίου	Κβάντο ανάροή	Δυναμικά βάρη	Επαναληπτικό βάρος RR	Βάρη & Ροές	Υβριδική (LC + WRR)
Κριτήρια εξισορρόπησης	Στατικά βάρη	Χρόνος αιχμής	Προτεραιότητα ροών	Μέγεθος πακέτου	Απόδοση διακομιστών	Βάρη και κυκλικότητα	Προσαρμογή με βάση το φορτίο	Ενεργές συνδέσεις & Βάρη
Ανταπόκριση σε δυναμικές συνθήκες	Χαμηλή-Αργή προσαρμογή	Υψηλή-Ανταπόκριση σε αιχμές	Μέτρια-Ευαίσθητη στις αλλαγές	Χαμηλή-Καθυστέρηση προσαρμογή	Υψηλή-Προσαρμοστική	Μέτρια-Περιορισμένη προσαρμογή	Υψηλή-Γρήγορη απόκριση	Υψηλή-Σταθερή σε αιχμές

Πλεονεκτήματα	Καλή ισορροπία	Αποδοτικό σε αιχμές	Δίκαιη Κατανομή	O(1) επεξεργασία	Προσρμοστικότητα	Δίκαιη και επαναληπτική ισορροπία	Υψηλή αποδοτικότητα σε ροές	Ισορροπία σε υψηλά φορτία
Μειονεκτήματα	Δεν προσαρμόζεται	Πολυπλοκότητα	Υψηλό κόστος	Υπολογιστικό κόστος	Υπολογιστική επιβάρυνση	Επιπλέον επεξεργασία	Απαιτησή συνεχούς παρακολούθησης	Αυξημένο υπολογιστικό κόστος
Απλότητα υλοποίησης	Απλή-Μη ευέλικτη	Μέτρια-Περίπλοκη δομή	Πολύπλοκη - Δύσκολη διαχείριση	Απλή-Καλή ή για βασικά σενάρια	Μέτρια-Προσρμοστική πολυπλοκότητα	Μέτρια-Απαιτεί υπολογιστική δύναμη	Πολύπλοκη-Πολυεπίπεδη υλοποίηση	Πολύπλοκη-Απαιτεί εξειδίκευση
Συμβατότητα με SDN και Cloud	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Περιπτώσεις χρήσης	Ομοιογενείς πόροι	Υποδομές υψηλού φόρτου	SDN με πολλές ροές	Δίκτυα υψηλής ταχύτητας	SDN και Cloud	Δίκτυα πολλών συνδέσεων	SDN σε περιβάλλοντα cloud	Δίκτυα με υψηλές απαιτήσεις
Επεκτασιμότητα	Μέτρια-Κατάλληλη για μικρές κλίμακες	Υψηλή ή-Καλή σε μεγάλα δίκτυα	Υψηλή - Διαχειρίσιμη πολυπλοκότητα	Υψηλή - Προσαρμοστικότητα	Υψηλή ή-Επεκτασιμη δομή	Υψηλή ή-Αποτελεσματική σε μεγάλο εύρος	Υψηλή ή-Αναγκαία για μεγάλα SDN	Υψηλή ή-Ιδανική για δίκτυα αιχμής
Υπολογιστικό κόστος	Χαμηλό-Οικονομικό	Υψηλό-Απαιτητική υλοποίηση	Μέτριο-Καλή ή ισορροπία κόστους	Μέτριο-Αποδοτική χρήση πόρων	Μέτριο-Υπολογιστική σταθερότητα	Μέτριο-Αποδοτικότητα με κόστος	Υψηλό-Υπερβολικά απαιτητικό	Υψηλό-Χρήσιμο σε κρίσιμες συνθήκες

Ανθεκτι κότητα	Μέτρ ια- Ευάλ ωτη σε αλλαγ ές	Υψηλ ή- Ανθε κτική σε σφάλ ματα	Υψ ηλή - Δια χειρ ίζετ αι δια κοπ ές	Μέτ ρια- Περ ιορι σμέ νη ανθ εκτι κότ ητα	Υψηλ ή- Προσ αρμο στική σε κατα στάσε ις	Υψηλ ή- Σταθε ρή σε αποτυ χίες	Υψηλ ή- Αξιοπ ιστη με βλάβε ς	Υψηλ ή- Ιδανι κή για περιβ άλλον τα αιχμή ς
-------------------	---	---	---	--	--	---	---	--

Πίνακας 3. 1 Σύγκριση του κάθε αλγορίθμου με βάση επιλεγμένα χαρακτηριστικά

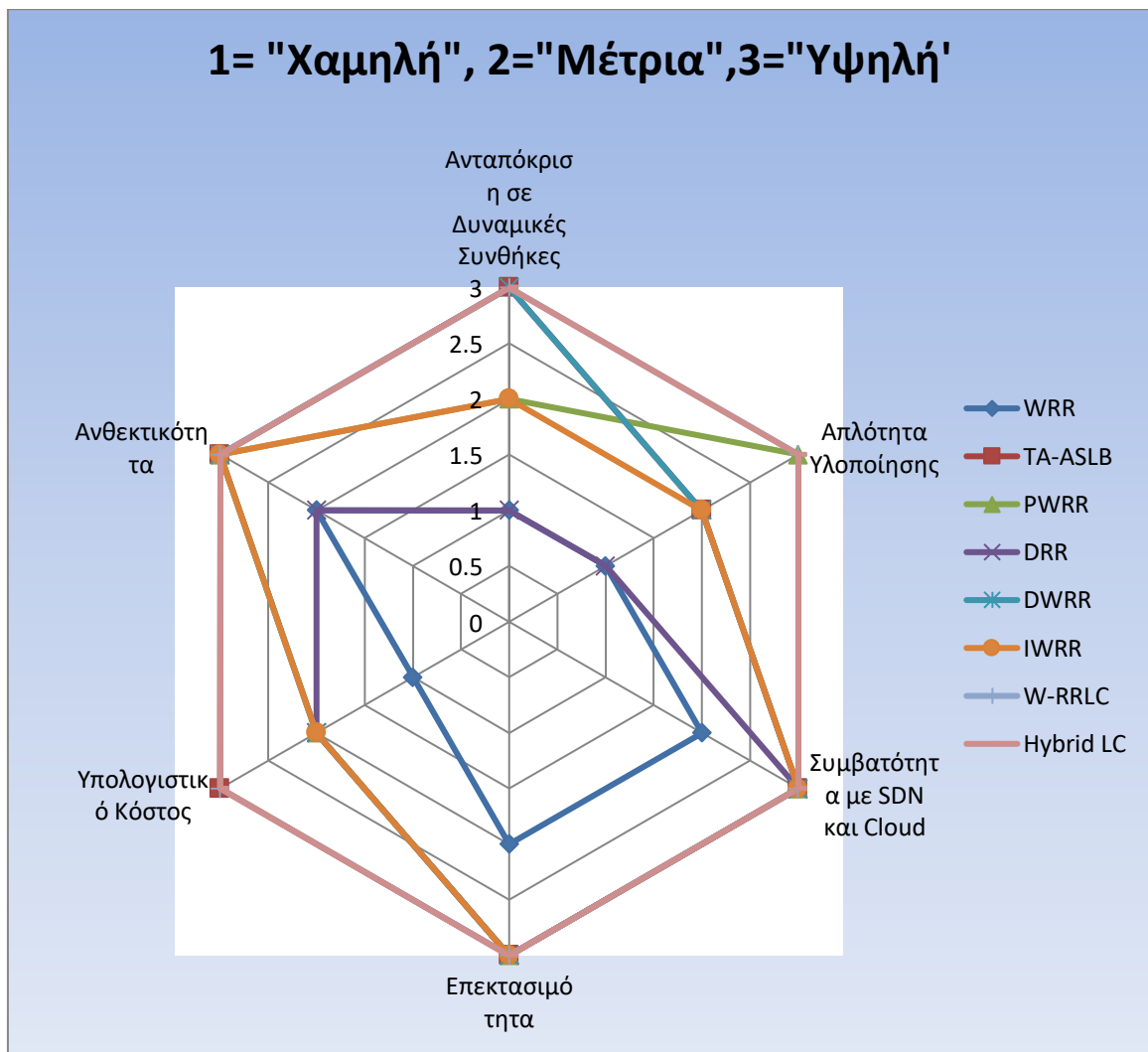
Το παρακάτω διάγραμμα τύπου ραντάρ προσπαθεί να δώσει μια απάντηση το « 2^ο ερευνητικό ερώτημα » παρέχοντας μια γραφική αναπαράσταση των αλγορίθμων κατανομής φορτίου βάσει συγκεκριμένων βασικών χαρακτηριστικών απόδοσης και καταλληλότητας, όπως παρουσιάστηκαν στον συγκριτικό πίνακα. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για την απεικόνιση είναι: η ανταπόκριση σε δυναμικές συνθήκες, η απλότητα υλοποίησης, η συμβατότητα με περιβάλλοντα SDN και cloud, η επεκτασιμότητα, το υπολογιστικό κόστος και η ανθεκτικότητα.

Στο διάγραμμα όπως προειπώθηκε, κάθε τιμή αξιολογείται αριθμητικά, με την "υψηλή" απόδοση να λαμβάνει την τιμή 3, τη "μέτρια" την τιμή 2 και τη "χαμηλή" την τιμή 1. Αυτή η κλίμακα επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αλγορίθμων, αποκαλύπτοντας δυνατά και αδύνατα σημεία, όπως την ικανότητά τους να διαχειρίζονται μεταβαλλόμενες συνθήκες, την ευκολία ενσωμάτωσής τους σε σύγχρονα δικτυακά περιβάλλοντα και την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ. Το διάγραμμα αυτό, επομένως, παρέχει έναν ευδιάκριτο τρόπο για την εκτίμηση της καταλληλότητας κάθε αλγορίθμου σε σχέση με τις απαιτήσεις ενός δικτύου, διευκολύνοντας την επιλογή της βέλτιστης λύσης ανά περίπτωση.

Με βάση λοιπόν το διάγραμμα, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που βασίζονται στον Round Robin διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τα χαρακτηριστικά, τις απαιτήσεις και την απόδοσή τους, επιτρέποντας την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την καταλληλότητά τους σε περιβάλλοντα SDN και Cloud. Ο αλγόριθμος **Hybrid LC** φαίνεται να επιτυγχάνει συνολικά καλή ισορροπία ανάμεσα στην ανθεκτικότητα, την απλότητα υλοποίησης και τη συμβατότητα με SDN και Cloud, καθιστώντας τον ιδανικό για δυναμικά περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις. Ο **TA-ASLB**, αν και υστερεί σε κάποιες παραμέτρους, παρουσιάζει υψηλές επιδόσεις στην ανταπόκριση σε δυναμικές συνθήκες και μπορεί να προτιμηθεί σε περιπτώσεις που η προσαρμοστικότητα είναι κρίσιμη.

Αντίθετα, αλγόριθμοι όπως ο **IWRR** και ο **DW-RR** διακρίνονται για την απλότητα υλοποίησης, αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματικοί σε πιο απαιτητικά χαρακτηριστικά, όπως η επεκτασιμότητα και η ανθεκτικότητα. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις ή περιορισμούς υπολογιστικού κόστους. Ο **WRR** και ο **PW-RR** έχουν συγκριτικά χαμηλότερες επιδόσεις σε βασικά χαρακτηριστικά όπως η επεκτασιμότητα και η ανταπόκριση, γεγονός που τους περιορίζει σε πιο σταθερά και προβλέψιμα περιβάλλοντα.

Συμπερασματικά, η επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες του περιβάλλοντος χρήσης. Για δυναμικά περιβάλλοντα SDN και Cloud με έμφαση στην προσαρμοστικότητα και την αποδοτική διαχείριση φορτίων, ο **Hybrid LC** και ο **TA-ASLB** φαίνονται ως οι πιο κατάλληλοι, ενώ για εφαρμογές με έμφαση στο χαμηλό υπολογιστικό κόστος, προτιμώνται πιο απλοί αλγόριθμοι όπως ο **IWRR**.



Εικόνα 3. 8 Επιδόσεις κάθε αλγορίθμου ανά χαρακτηριστικό

3.2 Νέοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τον RR ως μέτρο σύγκρισης

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν κάποιοι από τους πιο συχνά αναφερόμενους αλγορίθμους πάνω στην κίνηση φορτίου στα δίκτυα SDN. Κύριο μέλημα τους είναι να προσαρμόσουν την λειτουργία του δικτύου πάνω στα νέα δεδομένα που παράγει η εκρηκτική άνοδος της κίνησης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια καθώς και της συνακόλουθης αύξησης των απαιτήσεων των χρηστών για καλύτερο QoS. Για λόγους αξιολόγησης και τεκμηρίωσής τους οι ερευνητές έχουν προχωρήσει σε σύγκριση των επιδόσεων αυτών των αλγορίθμων με τις αντίστοιχες του RR, πράγμα που έρχεται να αναδείξει μια άλλη πτυχή του συγκεκριμένου αλγορίθμου, αυτή του σημείου αναφοράς στην εξισορρόπηση φορτίου.

3.2.1 MRBS (Multiple Regression-Based Searching)

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος MRBS [49] αποτελεί μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει μοντέλα στοχαστικής παλινδρόμησης και ευρετικούς αλγόριθμους για την εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα κέντρων δεδομένων (Data Center Networks - DCNs). Η βασική φιλοσοφία του MRBS είναι η δυναμική επιλογή διακομιστή και διαδρομής με βάση παραμέτρους όπως το φορτίο, η χωρητικότητα (bandwidth), ο χρόνος απόκρισης και η αξιοποίηση των διακομιστών. Μέσω της παλινδρόμησης, ο αλγόριθμος προβλέπει την καθυστέρηση για κάθε διακομιστή και επιλέγει τον βέλτιστο με βάση το ιστορικό δεδομένων. Παράλληλα, ο ευρετικός αλγόριθμος εξασφαλίζει τη βέλτιστη διαδρομή για τη μεταφορά δεδομένων με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Ο MRBS υπερέχει συγκριτικά με παραδοσιακούς αλγορίθμους, όπως οι Round Robin και Weighted Round Robin, καθώς μειώνει τον χρόνο καθυστέρησης και απόκρισης κατά 45% και αυξάνει την αξιοποίηση των διακομιστών στο 83%. Επιπλέον, βελτιώνει τη χρήση του bandwidth κατά 14–20%, γεγονός που καθιστά τον MRBS αποτελεσματικό σε περιβάλλοντα υψηλής κυκλοφορίας δεδομένων, όπως τα δίκτυα Cloud και εφαρμογές web traffic ή data mining.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται κυρίως σε DCNs με αρχιτεκτονική τύπου Leaf-Spine, όπου επιτυγχάνει εξισορρόπηση φορτίου τόσο στους διακομιστές όσο και στις συνδέσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση αιχμών κυκλοφορίας (message spikes) και την πρόληψη συμφόρησης, επιλέγοντας δυναμικά εναλλακτικές διαδρομές με βάση την προβλεπόμενη απόδοση. Συνολικά, πρόκειται για έναν ευέλικτο υβριδικό αλγόριθμο που

προάγει την αποδοτικότητα των πόρων και τη βελτιστοποίηση της ροής δεδομένων σε σύγχρονα δίκτυα.

3.2.2 LBSMT (Load Balancing Switch Migration Technique)

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος LBSMT [50] σχεδιάστηκε για να επιλύσει την ανισορροπία φορτίου στα Συστήματα Ευφυούς Μεταφοράς (ITS) μέσω της δυναμικής μετανάστευσης διακοπών σε δίκτυα SDN. Χρησιμοποιεί μια QoS-aware προσέγγιση, ανιχνεύοντας διαφορές φορτίου μεταξύ τομέων με βάση προκαθορισμένα όρια και αποστάσεις, για να επιλέξει τη βέλτιστη μετανάστευση. Ενισχύει την απόδοση των ITS, επιτυγχάνοντας έως και 98% μείωση του χρόνου απόκρισης, αύξηση του throughput κατά 45% και βελτιστοποίηση της χρήσης CPU (34%) και μνήμης (14%). Ο LBSMT εφαρμόζεται σε ενδο-τομεακή και δια-τομεακή εξισορρόπηση, ιδανικός για συνεργατικές εφαρμογές IoT και δικτύων 5G, ενώ ενσωματώνει δυναμικές τεχνικές βελτιστοποίησης για βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε περιβάλλοντα υψηλής κυκλοφορίας.

3.2.3 Priority D-BMAP (Discrete-Batch Markovian Arrival Process)

Η προτεινόμενη μέθοδος εξισορρόπησης φορτίου σε δίκτυα SDN βασίζεται στη χρήση πολλαπλών controllers και του μοντέλου Priority D-BMAP (Discrete-Batch Markovian Arrival Process)[51], επιτυγχάνοντας κατανομή πόρων με βάση την προτεραιότητα των αιτημάτων. Το μοντέλο αυτό διαχωρίζει την κίνηση δικτύου σε κρίσιμη και μη, αποδίδοντας μεγαλύτερο bandwidth και μικρότερη καθυστέρηση στα κρίσιμα δεδομένα, ενώ τα μη κρίσιμα διοχετεύονται σε εναπομείναντες πόρους, μειώνοντας τη συμφόρηση. Συγκριτικά με τον Round Robin (RR) και Weighted Round Robin (WRR), ο αλγόριθμος πέτυχε μείωση καθυστερήσεων κατά 28%, αύξηση του throughput κατά 15% και βελτίωση της χρήσης των πόρων, όπως η CPU και η μνήμη, κατά 12%. Ο αλγόριθμος προεκτιμώμενου κυκλικού χρονοπρογραμματισμού (Preemptive Round Robin) διαχειρίζεται αιτήματα με βάση τον χρόνο άφιξης και τις προτεραιότητές τους. Τα πειράματα με χρήση του POX controller και προσομοιωτή NS3 έδειξαν συνολικές βελτιώσεις στη χρήση πόρων και στην απόδοση του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για εφαρμογές σε κέντρα δεδομένων, cloud υπολογιστική και IoT περιβάλλοντα, παρέχοντας ευελιξία και επεκτασιμότητα.

3.2.4 Traffic pattern-based load-balancing algorithm

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος [52] εξισορρόπησης φορτίου στην εργασία βασίζεται στη διαχείριση μοτίβων κίνησης δικτύου (traffic patterns) και εφαρμόζεται σε δίκτυα SDN με

τη χρήση καταμετρημένων ελεγκτών. Εστιάζει στη διαχωρισμένη διαχείριση TCP και UDP κυκλοφορίας, μέσω διαφορετικών ελεγκτών που κατανέμουν δυναμικά τους πόρους, και βρίσκει εφαρμογή σε κέντρα δεδομένων (DCN) και περιβάλλοντα cloud, επιτυγχάνοντας εξισορρόπηση στους ελεγκτές. Ανήκει στην κατηγορία των ευρητικών αλγορίθμων, χρησιμοποιώντας μηχανισμό failover για αυξημένη διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα. Σε σύγκριση με τους Round Robin και Weighted Round Robin, ο αλγόριθμος επιτυγχάνει βελτίωση στις μετρικές: διαθεσιμότητα (+10-15%), χρόνο απόκρισης (-20-25%), ρυθμό συναλλαγών (+15-20%), throughput (+25-30%), και μείωση απώλειας πακέτων (-15-20%). Τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων σε Mininet με έως και 500 ταυτόχρονους χρήστες, καταδεικνύοντας υψηλή αποδοτικότητα και αξιοπιστία.

3.2.5 Novel Load Balancing Algorithm

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος [53] εξισορρόπησης φορτίου στην εργασία εισάγει μια τεχνική δυναμικής ανάθεσης βαρών που χρησιμοποιεί πέντε βασικές μετρικές εξυπηρετητών (CPU, RAM, bandwidth, thread count, και network buffers) για τον υπολογισμό της τρέχουσας φόρτωσης και της δυναμικής ανάθεσης βάρους στους εικονικούς εξυπηρετητές (VMs). Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε τριών επιπέδων αρχιτεκτονικές εφαρμογών (three-tier web applications) που βρίσκουν χρήση σε *συστήματα cloud* και σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως οι απότομες αυξήσεις αιτημάτων (flash crowds) και οι αποτυχίες πόρων (resource failures). Κατηγοριοποιείται ως *υβριδικός δυναμικός αλγόριθμος* και συνεργάζεται με μηχανισμούς αυτόματης κλιμάκωσης. Ο αλγόριθμος επιτυγχάνει εξισορρόπηση φορτίου στους *εξυπηρετητές εφαρμογών*, διατηρώντας σταθερή την απόδοση κάτω από συνθήκες υψηλής ζήτησης.

Συγκριτικά με τον Round Robin και έναν *βασικό αλγόριθμο εξισορρόπησης (Baseline)*, ο προτεινόμενος αλγόριθμος πέτυχε βελτίωση στον χρόνο απόκρισης κατά 20.7% και 21.4% αντίστοιχα σε καταστάσεις αποτυχίας πόρων, και κατά 12.5% και 22.3% αντίστοιχα σε συνθήκες flash crowds. Αυτή η βελτίωση επιτυγχάνεται μέσω της ευέλικτης διαχείρισης των πόρων σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας την καθυστέρηση και την αδυναμία εξυπηρέτησης αιτημάτων. Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε ιδιωτική υποδομή cloud που βασίζεται στο OpenStack και αποδείχθηκε πιο αποδοτικός στη διατήρηση των συμφωνιών επιπέδου υπηρεσιών (SLA) ακόμη και υπό ακραίες συνθήκες.

3.2.6 GLBA (Genetic Load Balancing Algorithm)

Ο προτεινόμενος Γενετικός Αλγόριθμος Εξισορρόπησης Φορτίου (GLBA)[54] σχεδιάστηκε για να βελτιώσει τις μετρικές QoS σε δίκτυα SDN που εξυπηρετούν πολυμεσικές εφαρμογές. Βασίζεται στη χρήση γενετικής προγραμματιστικής για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η διαθέσιμη χωρητικότητα, το κόστος διαδρομής και η πολυπλοκότητα λειτουργίας. Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Mininet και ελεγκτή POX, κατανεμήθηκε σε επίπεδο συνδέσμων (link-level balancing), και συγκρίθηκε με τους Round Robin, Weighted Round Robin, και άλλους δυναμικούς αλγορίθμους εξισορρόπησης. Βελτίωσε τον χρόνο απόκρισης έως και 75% και το throughput έως 28%, ενώ μείωσε τη χρήση μνήμης και CPU στους εξυπηρετητές. Ο GLBA στοχεύει στη βελτίωση της αποδοτικότητας σε πολυμεσικές εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή διαθεσιμότητα και χαμηλές καθυστερήσεις.

3.2.7 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι οι κύριες μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν: τον χρόνο απόκρισης, το throughput, τη χρήση CPU και μνήμης, και τη χωρητικότητα (bandwidth), καθώς αυτές είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση της απόδοσης των δικτύων και της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) που παρέχουν. Η βελτίωση αυτών των μετρικών όχι μόνο οδηγεί σε καλύτερη εμπειρία χρήστη, αλλά και σε αυξημένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία του δικτύου, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλών απαιτήσεων, όπως τα SDN και τα δίκτυα Cloud.

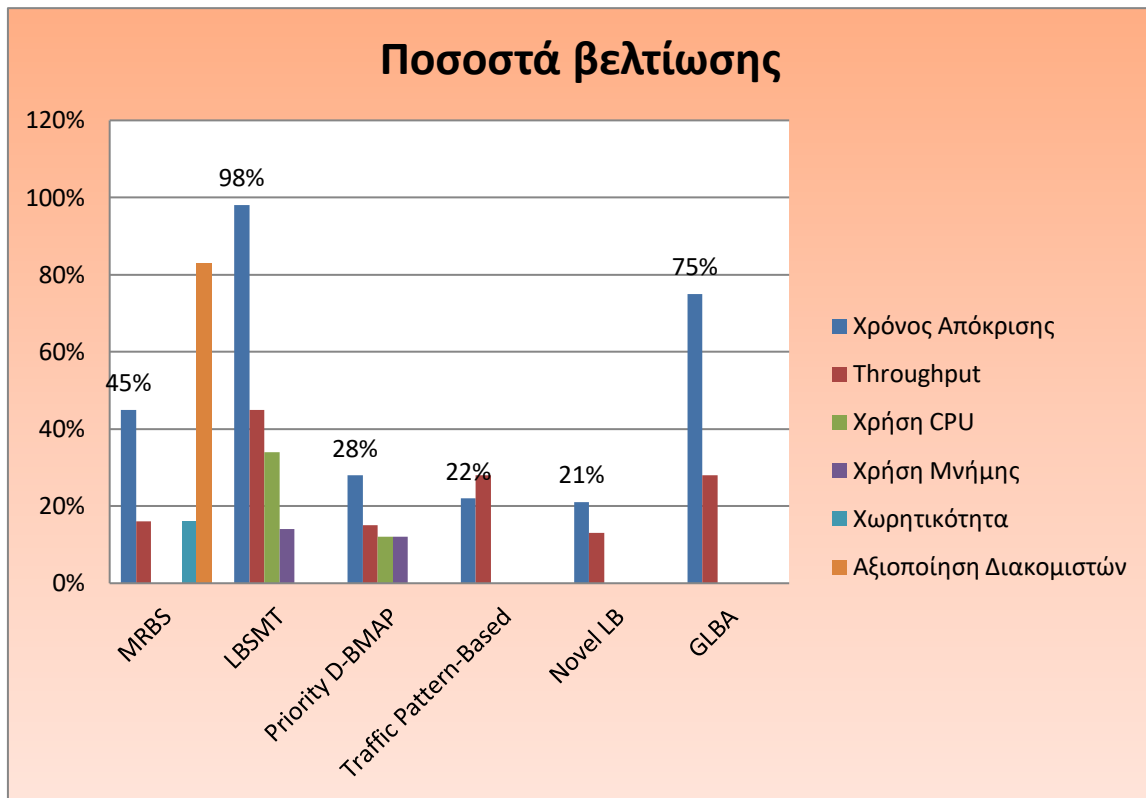
Οι αλγόριθμοι που προτάθηκαν από τους ερευνητές έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε διάφορα κρίσιμα σημεία του δικτύου, όπως οι διακομιστές, οι διαδρομές δεδομένων, οι διακόπτες και οι ελεγκτές. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος **MRBS** επιλέγει τον βέλτιστο διακομιστή και τη βέλτιστη διαδρομή με βάση την τρέχουσα φόρτωση και την προβλεπόμενη απόδοση, προσφέροντας σημαντική μείωση στον χρόνο απόκρισης και βελτίωση του throughput. Αντίστοιχα, ο **LBSMT** χρησιμοποιεί δυναμική μετανάστευση διακοπών για την εξισορρόπηση του φορτίου μεταξύ τομέων, ενισχύοντας τη χρήση πόρων και τη συνολική απόδοση του δικτύου.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει την ποσοστιαία βελτίωση των αλγορίθμων **MRBS**, **LBSMT**, **Priority D-BMAP**, **Traffic Pattern-Based**, **Novel Load Balancing**, και **GLBA** σε

σχέση με τον Round Robin στις διάφορες μετρικές. Η χρήση του RR ως μέτρο σύγκρισης επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση της απόδοσης αυτών των αλγορίθμων στις μετρικές που αναλύθηκαν.

Αυτή η ανάλυση απαντά στο «3^ο ερευνητικό ερώτημα» της εργασίας και παράλληλα, τεκμηριώνει το βαθμό στον οποίο οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι υπερέχουν έναντι του RR, υπογραμμίζοντας τη συμβολή τους στη βελτίωση των σύγχρονων συστημάτων δικτύωσης. Με βάση λοιπόν το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι οι αλγόριθμοι που δεν βασίζονται στον Round Robin (RR) παρουσιάζουν **σημαντικές βελτιώσεις σε ορισμένες** κρίσιμες μετρικές απόδοσης, αν και οι επιδόσεις τους ποικίλλουν ανάλογα με τη μετρική. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος LBSMT ξεχωρίζει, επιτυγχάνοντας την υψηλότερη βελτίωση στην αξιοποίηση διακομιστών (98%) και στον χρόνο απόκρισης (83%). Ο GLBA επίσης καταγράφει αξιόλογες βελτιώσεις, ιδιαίτερα στη χωρητικότητα (75%). Αντίθετα, οι αλγόριθμοι Novel LB και Priority D-BMAP δείχνουν χαμηλότερες βελτιώσεις στις περισσότερες μετρικές, με εξαίρεση κάποιες μικρές βελτιώσεις στη χρήση CPU και μνήμης.

Αυτό υποδεικνύει ότι οι μη Round Robin αλγόριθμοι **έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν υψηλότερη αποδοτικότητα σε εξειδικευμένα περιβάλλοντα**, ειδικά όταν οι απαιτήσεις σχετίζονται με την κατανομή φόρτου ή την ελαχιστοποίηση χρόνου απόκρισης. Ωστόσο, **οι επιδόσεις τους δεν είναι ομοιόμορφα καλύτερες σε όλες τις μετρικές**, κάτι που αναδεικνύει τη σημασία της προσαρμογής του κατάλληλου αλγορίθμου στις ανάγκες του εκάστοτε περιβάλλοντος.



Εικόνα 3. 9 Ποσοστά βελτίωσης της κάθε μετρικής για κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο σε σχέση με τον RR

Από τα παραπάνω αναδεικνύεται ο ρόλος του Round Robin να λειτουργεί ως σημείο αναφοράς ή βάση σύγκρισης για την αξιολόγηση της απόδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου. Ο RR είναι ένας απλός και ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος που κατανέμει τα αιτήματα κυκλικά στους διαθέσιμους διακομιστές χωρίς να λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα φόρτωση ή την απόδοση των διακομιστών. Αυτό τον καθιστά ιδανικό για χρήση ως μέτρο αναφοράς, καθώς παρέχει μια βασική γραμμή απόδοσης που μπορεί να συγκριθεί με πιο εξελιγμένους και προσαρμοστικούς αλγορίθμους.

3.3 Ανάλυση επικέντρωσης ερευνών -Ομαδοποίηση μετρικών

Για την ανάλυση επικέντρωσης ερευνών, κατατάσσουμε τις μετρικές σε έξι κύριες ομάδες και υπολογίζουμε τη συνολική συχνότητα εμφάνισης κάθε ομάδας. Αυτή η κατάταξη γίνεται για να επιτευχθούν δύο βασικοί στόχοι.

Ο πρώτος είναι, η συστηματοποίηση και κατανόηση των δεδομένων και αυτό γιατί η κατηγοριοποίηση των μετρικών σε ομάδες διευκολύνει την ανάλυση και την κατανόηση τους. Μέσα από αυτήν τη συστηματοποίηση, μπορούμε να διακρίνουμε πιο εύκολα τάσεις και συσχετίσεις στις έρευνες, επιτρέποντας μια πιο δομημένη και ολοκληρωμένη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Ο δεύτερος είναι ότι ο εντοπισμός ερευνητικών κενών και προτεραιοτήτων. Η ανάλυση των συχνότητων εμφάνισης κάθε ομάδας αποκαλύπτει πού εστιάζει περισσότερο η τρέχουσα ερευνητική κοινότητα και πού υπάρχουν ερευνητικά κενά. Αυτό είναι σημαντικό για την κατανόηση των προτεραιοτήτων στην έρευνα και για τον εντοπισμό τομέων που χρειάζονται περαιτέρω μελέτη. Η γνώση αυτών των κενών μπορεί να οδηγήσει σε προτάσεις για νέα ερευνητικά θέματα και βελτιώσεις στις υπάρχουσες μεθοδολογίες. Αυτοί οι λόγοι υποστηρίζουν τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης και αποτελεσματικής ανάλυσης που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην πρόοδο της έρευνας στον τομέα του Round Robin και των δικτύων SDN.

Οι ομάδες αυτές είναι:

1. Απόδοση δικτύου (Network Performance): Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει μετρικές που αξιολογούν την αποτελεσματικότητα και την ποιότητα του δικτύου. Οι μετρικές σε αυτή την κατηγορία είναι:

- Latency (6 φορές), που μετράει την καθυστέρηση.
- Throughput (17 φορές), που μετράει τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.
- RTT (5 φορές), που μετράει τον συνολικό χρόνο μετάβασης και επιστροφής των δεδομένων.
- Jitter (4 φορές), που μετράει τις διακυμάνσεις στις καθυστερήσεις.
- Bandwidth (2 φορές), που μετράει την εύρος ζώνης του δικτύου.
- Packet Loss (2 φορές), που μετράει την απώλεια πακέτων.

Σύνολο συχνότητας: 36

2. Αξιοπιστία και απώλειες (Reliability and Loss): Εδώ περιλαμβάνονται μετρικές που εστιάζουν στην σταθερότητα και την αποφυγή απωλειών στο δίκτυο:

- Request Loss (3 φορές), που μετράει την απώλεια αιτημάτων.
- Loss Rate (3 φορές), που μετράει τον ρυθμό απώλειας δεδομένων.
- Server Load (5 φορές), που μετράει το φορτίο του διακομιστή.

Σύνολο συχνότητας: 11

3. Αποδοτικότητα πόρων (Resource Efficiency): Αυτή η κατηγορία επικεντρώνεται στην αποδοτική χρήση των πόρων:

- Utilization of Resources (7 φορές), που μετράει την χρησιμοποίηση των πόρων.
- Server Transaction per Time (2 φορές), που μετράει τις συναλλαγές ανά χρόνο στον διακομιστή.
- Server CPU Capacity (1 φορά), που μετράει την ικανότητα της CPU του διακομιστή.

Σύνολο συχνότητας: 10

4. Χρόνος και απόκριση (Time and Response): Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει μετρικές που αξιολογούν τον χρόνο απόκρισης και ολοκλήρωσης:

- Response Time (12 φορές), που μετράει τον χρόνο απόκρισης.
- Average Total Time (2 φορές), που μετράει τον μέσο συνολικό χρόνο.
- Completion Time (1 φορά), που μετράει τον χρόνο ολοκλήρωσης.
- Idle Time (1 φορά), που μετράει τον αδρανή χρόνο.

Σύνολο συχνότητας: 16

5. Εξισορρόπηση φορτίου (Load Balancing): Περιλαμβάνει μετρικές που αξιολογούν την κατανομή του φορτίου:

- Fairness Index (1 φορά), που μετράει την δικαιοσύνη της κατανομής.
- Average Load Variance (1 φορά), που μετράει την μέση διακύμανση του φορτίου.
- Number of Task Migrations (1 φορά), που μετράει τον αριθμό των μετακινήσεων εργασιών.

Σύνολο συχνότητας: 3

6. Στατιστικά και επικοινωνία (Statistics and Communication): Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει μετρικές που αξιολογούν την επικοινωνιακή απόδοση:

- Number of TCP Connections (2 φορές), που μετράει τον αριθμό των TCP συνδέσεων.
- Number of Requests (2 φορές), που μετράει τον αριθμό των αιτήσεων.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι συνολικές συχνότητες και τα ποσοστά των μετρικών της κάθε ομάδας:

Ομάδα	Συχνότητα εμφάνισης	Ποσοστό επί του συνόλου
Απόδοση Δικτύου	36	45%
Αξιοπιστία και Απώλειες	11	13.75%
Αποδοτικότητα Πόρων	10	12.5%
Χρόνος και Απόκριση	16	20%
Εξισορρόπηση Φορτίου	3	3.75%
Στατιστικά και Επικοινωνία	4	5%
Σύνολο	80	100%

Πίνακας 3. 2 Πίνακας συχνοτήτων εμφάνισης της κάθε ομάδας μετρικών

3.3.1 Συμπεράσματα επικέντρωσης ερευνών

Η ανάλυση της κατανομής των μετρικών στις έξι κατηγορίες απαντά στο «4^ο ερευνητικό ερώτημα » και αποκαλύπτει σημαντικά ευρήματα σχετικά με την εστίαση της έρευνας καθώς και αναδεικνύει ερευνητικά κενά που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω. Πιο συγκεκριμένα, η κυρίαρχη ομάδα είναι η **Απόδοση Δικτύου**, που αντιπροσωπεύει το 45% του συνόλου των εμφανίσεων. Οι μετρικές αυτής της κατηγορίας, όπως το *Throughput* και το *Latency*, είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες από τους ερευνητές. Αυτό δείχνει ότι η ερευνητική κοινότητα επικεντρώνεται κυρίως σε παραμέτρους που σχετίζονται με την απόδοση των δικτύων SDN. Το εύρημα αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι η απόδοση δικτύου αποτελεί βασικό στόχο σε συστήματα εξισορρόπησης φορτίου.

Η δεύτερη πιο σημαντική κατηγορία είναι ο **Χρόνος και η Απόκριση**, που καλύπτει το 20% των εμφανίσεων. Αυτό υποδηλώνει ότι η ανάλυση παραμέτρων όπως ο χρόνος απόκρισης και οι καθυστερήσεις αποτελεί κρίσιμο σημείο για τους ερευνητές, καθώς σχετίζεται άμεσα με την εμπειρία του τελικού χρήστη και την αποτελεσματικότητα του δικτύου. Παράλληλα, οι κατηγορίες **Αξιοπιστία και Απώλειες** (13.75%) και **Αποδοτικότητα Πόρων** (12.5%) παρουσιάζουν παρόμοια ποσοστά, γεγονός που

υποδεικνύει ότι, αν και λιγότερο συχνά, αποτελούν επίσης σημαντικούς άξονες της έρευνας. Η κατηγορία *Αξιοπιστία και Απώλειες* εστιάζει στη μελέτη της σταθερότητας και της αποφυγής απωλειών στο δίκτυο, ενώ η *Αποδοτικότητα Πόρων* εξετάζει την καλύτερη χρήση των διαθέσιμων υπολογιστικών και δικτυακών πόρων.

Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι κατηγορίες **Εξισορρόπηση Φορτίου** (3.75%) και **Στατιστικά και Επικοινωνία** (5%) εμφανίζονται πολύ λιγότερο συχνά. Η χαμηλή συχνότητα εμφάνισης της ομάδας *Εξισορρόπησης Φορτίου* είναι αξιοσημείωτη, καθώς αφορά τον κεντρικό στόχο της συγκεκριμένης μελέτης. Το γεγονός ότι οι μετρικές όπως ο *Fairness Index* και το *Average Load Variance* δεν χρησιμοποιούνται συχνά δείχνει ότι η δικαιοσύνη και η αποτελεσματικότητα της κατανομής φορτίου δεν έχουν μελετηθεί σε βάθος στο πλαίσιο του Round Robin. Από την άλλη, η σπάνια αναφορά σε μετρικές που σχετίζονται με *Στατιστικά και Επικοινωνία*, όπως ο αριθμός των συνδέσεων και αιτήσεις, δείχνει ότι αυτές οι πτυχές δεν έχουν αποτελέσει κύρια εστίαση της ερευνητικής κοινότητας.

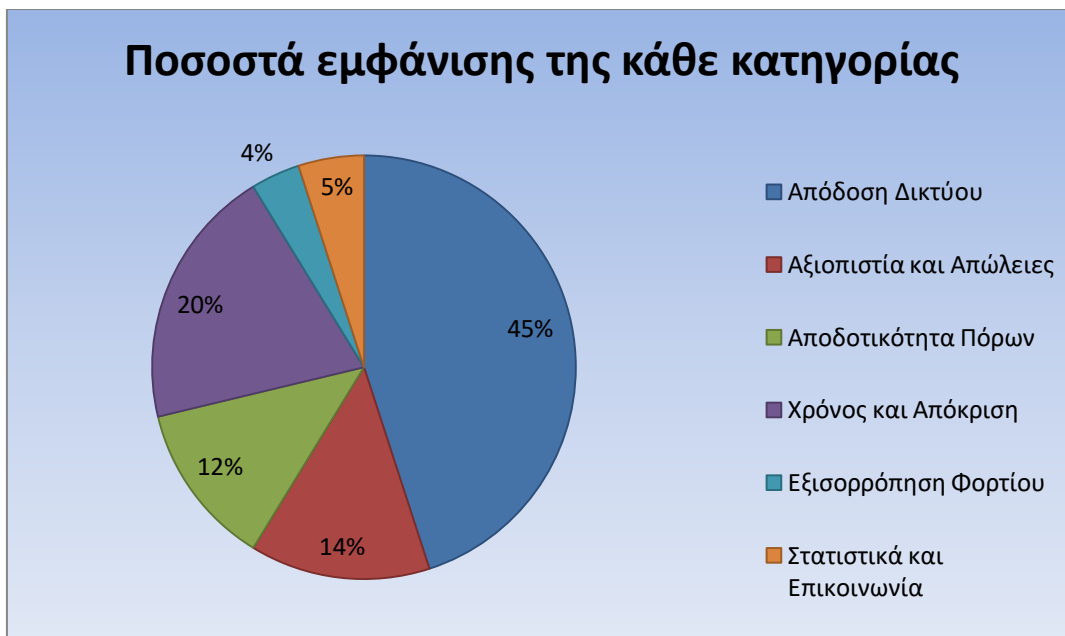
Η παραπάνω κατανομή φανερώνει επίσης *ερευνητικά κενά* που μπορούν να αξιοποιηθούν για περαιτέρω μελέτη:

1. **Υποεκπροσωπούμενες κατηγορίες:** Η *Εξισορρόπηση Φορτίου* και τα *Στατιστικά και Επικοινωνία* αποτελούν τομείς με χαμηλή εστίαση. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως έλλειψη ανάλυσης για το κατά πόσο ο αλγόριθμος Round Robin πετυχαίνει δίκαιη κατανομή των πόρων ή υποστηρίζει τις επικοινωνιακές απαιτήσεις δικτύου. Ειδικότερα, η δικαιοσύνη της κατανομής φορτίου είναι κεντρική για τη λειτουργία του αλγορίθμου, και η έλλειψη συχνής μελέτης σε αυτή την κατεύθυνση αναδεικνύει ένα ερευνητικό κενό που αξίζει να καλυφθεί.
2. **Αξιοπιστία και απώλειες:** Η χαμηλή εστίαση σε μετρικές όπως το *Request Loss* και το *Loss Rate* υποδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω μελέτης της σταθερότητας και της ανθεκτικότητας του αλγορίθμου υπό συνθήκες πίεσης.
3. **Σχέση με τα χαρακτηριστικά του Round Robin:** Η ανάλυση των μετρικών αναδεικνύει τη συσχέτιση μεταξύ συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του Round Robin και των ομάδων μετρικών. Για παράδειγμα, η σπάνια χρήση μετρικών της κατηγορίας *Εξισορρόπηση Φορτίου* υποδηλώνει ότι υπάρχει περιορισμένη έμφαση στη δίκαιη διανομή του φορτίου, παρά το γεγονός ότι αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του Round Robin. Αντίθετα, η κυριαρχία της *Απόδοσης Δικτύου* δείχνει ότι οι ερευνητές

ενδιαφέρονται περισσότερο για τη συνολική αποτελεσματικότητα παρά για τη δικαιοσύνη.

3.3.2 Συνολικά Συμπεράσματα

Η έρευνα εστιάζει κυρίως στην απόδοση δικτύου και τον χρόνο απόκρισης, καθώς αυτές οι κατηγορίες αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό των μετρικών που χρησιμοποιούνται. Ωστόσο, οι ομάδες με λίγες εμφανίσεις, όπως η εξισορρόπηση φορτίου και τα στατιστικά επικοινωνίας, αναδεικνύουν τομείς που δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει χώρος για περαιτέρω έρευνα, με στόχο την κάλυψη αυτών των κενών, και παράλληλα αναδεικνύει ευκαιρίες για τη βελτίωση του αλγορίθμου Round Robin. Η ανάπτυξη νέων εκδόσεων ή παραλλαγών του αλγορίθμου που να βελτιώνουν τη δικαιοσύνη και την αποδοτικότητα, λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα λιγότερο μελετημένα χαρακτηριστικά, μπορεί να αποτελέσει ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο για τη βελτίωση των συστημάτων SDN.



Εικόνα 3. 10 Οι 6 κατηγορίες και τα ποσοστά τους

3.4 Επίλογος

Η έρευνά μας επικεντρώθηκε στην ανάλυση και αξιολόγηση αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου στα δίκτυα SDN, με ιδιαίτερη αναφορά στη χρήση του Round Robin (RR) και των

παραλλαγών του. Έγινε μια εκτενής επισκόπηση των δικτύων SDN και των τεχνικών εξισορρόπησης φορτίου, παρουσιάστηκαν σχετικές εργασίες και νέοι αλγόριθμοι, και πραγματοποιήθηκε ανάλυση των επιδόσεών τους.

3.4.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Τα κύρια ευρήματα της έρευνας δείχνουν ότι οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που βασίζονται στον Round Robin (RR) επιτυγχάνουν σημαντικές βελτιώσεις σε διάφορες κρίσιμες μετρικές απόδοσης. Αυτές οι βελτιώσεις περιλαμβάνουν την αύξηση του throughput, τη μείωση του χρόνου απόκρισης, και την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων. Οι ερευνητές επικεντρώνονται σε θέματα όπως η ταχύτητα ανταπόκρισης και η αποδοτική χρήση των πόρων, που είναι κρίσιμα για εφαρμογές που απαιτούν πραγματικού χρόνου λειτουργία και για περιβάλλοντα με υψηλή ζήτηση, όπως τα δίκτυα 5G και το cloud computing.

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά, τις απαιτήσεις και την απόδοσή τους. Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι Hybrid LC και TA-ASLB επιδεικνύουν υψηλή προσαρμοστικότητα και αποδοτική διαχείριση φορτίων, καθιστώντας τους κατάλληλους για δυναμικά περιβάλλοντα. Αντίθετα, οι απλοί αλγόριθμοι όπως ο IWRR είναι καταλληλότεροι για εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις.

3.4.2 Όρια και Περιορισμοί της Έρευνας

Κατά την έρευνα εντοπίστηκαν ορισμένοι περιορισμοί και προκλήσεις. Υπάρχουν περιορισμοί στην αξιοποίηση συγκεκριμένων μετρικών, όπως ο Fairness Index και το Average Load Variance, που δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς. Επίσης, η χαμηλή εστίαση σε μετρικές όπως το Request Loss και το Loss Rate αναδεικνύει την ανάγκη για βελτίωση της σταθερότητας και της ανθεκτικότητας των αλγορίθμων υπό συνθήκες πίεσης. Επιπλέον, η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στην απόδοση και την καθυστέρηση, αφήνοντας άλλες κρίσιμες πτυχές, όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα, λιγότερο μελετημένες.

3.4.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Για τη μελλοντική εργασία, μπορούν να εξεταστούν αρκετές κατευθύνσεις:

1. **Δίκαιη κατανομή πόρων:** Διερεύνηση της δικαιοσύνης στην κατανομή φορτίου, εισάγοντας μετρικές όπως ο Fairness Index και μελετώντας την κατανομή φορτίων σε ετερογενή περιβάλλοντα.
2. **Ανθεκτικότητα και σταθερότητα:** Ανάπτυξη αλγορίθμων που διατηρούν υψηλή απόδοση υπό συνθήκες αυξημένης ζήτησης ή αποτυχίας συστημάτων, με έμφαση σε μετρικές όπως το Request Loss και το Loss Rate.
3. **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Εξερεύνηση μεθόδων για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα δίκτυα SDN, ενσωματώνοντας πράσινες τεχνολογίες και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα χρήσης των πόρων.

Με αυτές τις προτάσεις, η έρευνα μπορεί να προχωρήσει σε νέα επίπεδα, προσφέροντας πιο αποδοτικές και αξιόπιστες λύσεις για τα δίκτυα του μέλλοντος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

[Υλικό που είναι ογκώδες, παραδείγματος χάριν αποτελέσματα ερωτηματολογίων, σχήματα, πίνακες κ.ά. που εμποδίζουν τον αναγνώστη να κατανοήσει τη συνέχεια του κειμένου, μπορεί να τοποθετηθεί σε παραρτήματα. Η αρίθμηση των παραρτημάτων γίνεται με κεφαλαία ελληνικά γράμματα Α, Β, Γ, ... ενώ σχήματα, σχέδια, πίνακες κ.λπ., που περιλαμβάνονται πρέπει να ονομάζονται Σχήμα Α1, Πίνακας Β2, κ.λπ.]

[Διαγράψτε αυτή τη σελίδα αν δεν τη χρειάζεστε]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Open Networking Foundation. (n.d.). *SDN Definition*. Open Networking Foundation. Retrieved June 17, 2024, from <https://opennetworking.org/sdn-definition/>
- [2] Paul Göransson, C. B. (2017). *Software Defined Networks A Comprehensive Approach*. Cambridge, United States: Todd Green-Morgan Kaufman Publishers.
- [3] Haleplidis, E., Pentikousis, K., Denazis, S. G., Salim, J. H., Meyer, D., & Koufopavlou, O. G. (2015). *Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology*. RFC 7426. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org>
- [4] Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2014). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 14-76.
- [5] GeeksforGeeks. (n.d.). *Software-defined networking*. Retrieved from <https://www.geeksforgeeks.org/software-defined-networking/>
- [6] GeeksforGeeks. (n.d.). *Difference between software-defined network and traditional network*. Retrieved from https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-software-defined-network-and-traditional-network/?ref=ml_lbp
- [7] Bhuiyan, Z. A., Islam, S., Islam, M. M., Ullah, A. A., Naz, F., & Rahman, M. S. (2023). On the (in) security of the control plane of SDN architecture: A survey. *IEEE Access*.
- [8] CloudSwit.ch. (n.d.). *Network Controller: Everything You Need to Know in This Article*. Retrieved from <https://cloudswit.ch/blogs/network-controllereverything-you-need-to-know-in-this-article/#sdn-controller-software-defined-networking-controller>
- [9] Bhuiyan, Z. A., Islam, S., Islam, M. M., Ullah, A. A., Naz, F., & Rahman, M. S. (2023). On the (in) security of the control plane of SDN architecture: A survey. *IEEE Access*.
- [10] Chahlaoui, F., El-Fenni, M. R., & Dahmouni, H. (2019, March). Performance analysis of load balancing mechanisms in SDN networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security* (pp. 1-8).
- [11] Buzhin, I. G., Derevyankin, A. Y., Antonova, V. M., & Perevalov, A. P. (2023). Comparative Analysis of the REST and gRPC Used in the Monitoring System of Communication Network Virtualized Infrastructure. *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*, 17(4), 50-55.
- [12] Latif, Z., Sharif, K., Li, F., Karim, M. M., Biswas, S., & Wang, Y. (2020). A comprehensive survey of interface protocols for software defined networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 156, 102563.
- [13] Latif, Z., Sharif, K., Li, F., Karim, M. M., Biswas, S., & Wang, Y. (2020). A comprehensive survey of interface protocols for software defined networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 156, 102563.
- [14] Valenčić, D., & Mateljan, V. (2019, May). Implementation of netconf protocol. In *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 421-430). IEEE.

- [15] Alabarce, M. G., & Bravalheri, A. (2018, July). Overview of South-Bound interfaces for software-defined optical networks. In *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (pp. 1-5). IEEE.
- [16] Brandt, M., Khondoker, R., Marx, R., & Bayarou, K. (2014, July). Security analysis of software defined networking protocols—openflow, of-config and ovsdb. In *The 2014 IEEE fifth international conference on communications and electronics (ICCE 2014), DA NANG, Vietnam*.
- [17] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S. and Turner, J., 2008. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM computer communication review*, 38(2), pp.69-74.
- [18] Braun, W., & Menth, M. (2014). Software-defined networking using OpenFlow: Protocols, applications and architectural design choices. *Future Internet*, 6(2), 302-336.
- [19] Bosshart, P., Daly, D., Gibb, G., Izzard, M., McKeown, N., Rexford, J., ... & Walker, D. (2014). P4: Programming protocol-independent packet processors. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(3), 87-95.
- [20] Hauser, F., Häberle, M., Merling, D., Lindner, S., Gurevich, V., Zeiger, F., ... & Menth, M. (2023). A survey on data plane programming with p4: Fundamentals, advances, and applied research. *Journal of Network and Computer Applications*, 212, 103561.
- [21] Alhilali, A. H., & Montazerolghaem, A. (2023). Artificial intelligence based load balancing in SDN: A comprehensive survey. *Internet of Things*, 22, 100814.
- [22] Neghabi, A. A., Navimipour, N. J., Hosseinzadeh, M., & Rezaee, A. (2018). Load balancing mechanisms in the software defined networks: a systematic and comprehensive review of the literature. *IEEE access*, 6, 14159-14178.
- [23] Karakus, M., & Durresi, A. (2017). Quality of service (QoS) in software defined networking (SDN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 80, 200-218.
- [24] Li, L., & Xu, Q. (2017, July). Load balancing researches in SDN: A survey. In *2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)* (pp. 403-408). IEEE.
- [25] Hamdan, M., Hassan, E., Abdelaziz, A., Elhigazi, A., Mohammed, B., Khan, S., ... & Marsono, M. N. (2021). A comprehensive survey of load balancing techniques in software-defined network. *Journal of Network and Computer Applications*, 174, 102856.
- [26] Hopps, C. (2000). *Analysis of an equal-cost multi-path algorithm* (No. rfc2992).
- [27] Dobrijevic, O., Santl, M., & Matijasevic, M. (2015, November). Ant colony optimization for QoE-centric flow routing in software-defined networks. In *2015 11th international conference on network and service management (CNSM)* (pp. 274-278). IEEE.
- [28] Hu, T., Yi, P., Guo, Z., Lan, J., & Hu, Y. (2019). Dynamic slave controller assignment for enhancing control plane robustness in software-defined networks. *Future Generation Computer Systems*, 95, 681-693.
- [29] Zhang, J., Ye, M., Guo, Z., Yen, C. Y., & Chao, H. J. (2020). CFR-RL: Traffic engineering with reinforcement learning in SDN. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(10), 2249-2259.

- [30] da Silva, L. S., Storck, C. R., & de LP Duarte-Figueiredo, F. (2019). A Dynamic Load Balancing Algorithm for Data Plane Traffic. In *LANOMS*.
- [31] Zeng, X., Wang, D., Han, S., Yao, W., Wang, Z., & Chen, R. (2019). An effective load balance using link bandwidth for sdn-based data centers. In *Artificial Intelligence and Security: 5th International Conference, ICAIS 2019, New York, NY, USA, July 26–28, 2019, Proceedings, Part IV* 5 (pp. 256-265). Springer International Publishing.
- [32] Katta, N. P. K., Hira, M. M., Kim, C., Sivaraman, A., & Rexford, J. (2016). HULA: Scalable Load Balancing Using Programmable Data Planes. *Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Symposium on SDN Research (SOSR)*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/2890955.2890968>
- [33] Maymounkov, P., & Mazieres, D. (2002, March). Kademlia: A peer-to-peer information system based on the xor metric. In *International workshop on peer-to-peer systems* (pp. 53-65). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [34] Alssaheli, O. M., Abidin, Z. Z., Zakaria, N. A., & Abas, Z. A. (2022). Software defined network based load balancing for network performance evaluation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(4).
- [35] Alhilali, A. H., & Montazerolghaem, A. (2023). Artificial intelligence based load balancing in SDN: A comprehensive survey. *Internet of Things*, 22, 100814.
- [36] Baihaqi, M.R., Negara, R.M. and Tulloh, R., 2022, December. Analysis of Load Balancing Performance using Round Robin and IP Hash Algorithm on P4. In 2022 5th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI) (pp. 93-98). IEEE.
- [37] Belgaum, M. R., Musa, S., Alam, M. M., & Su'ud, M. M. (2020). A systematic review of load balancing techniques in software-defined networking. *IEEE Access*, 8, 98612-98636.
- [38] Shafiq, D. A., Jhanjhi, N. Z., & Abdullah, A. (2022). Load balancing techniques in cloud computing environment: A review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(7), 3910-3933.
- [39] Kumar, P., & Kumar, R. (2019). Issues and challenges of load balancing techniques in cloud computing: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 51(6), 1-35.
- [40] Ghomi, E. J., Rahmani, A. M., & Qader, N. N. (2017). Load-balancing algorithms in cloud computing: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 88, 50-71.
- [41] Kitchenham, B., Brereton, O. P., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review. *Information and software technology*, 51(1), 7-15.
- [42] Vyakaranal, S. B., & Naragund, J. G. (2019). Weighted round-robin load balancing algorithm for software-defined network. In *Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology: Proceedings of International Conference, ICERECT 2018* (pp. 375-387). Springer Singapore.
- [43] Fancy, C., & Pushpalatha, M. (2021). Traffic-aware adaptive server load balancing for software defined networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(3), 2211.

- [44] Katangur, A., Akkaladevi, S., & Vivekanandhan, S. (2022, October). Priority weighted round robin algorithm for load balancing in the cloud. In *2022 IEEE 7th international conference on smart cloud (SmartCloud)* (pp. 230-235). IEEE.
- [45] Devi, D. C., & Uthariaraj, V. R. (2016). Load balancing in cloud computing environment using improved weighted round robin algorithm for nonpreemptive dependent tasks. *The scientific world journal*, 2016(1), 3896065.
- [46] Zhou, Y., & Liu, C. (2024, March). Server Load Balancing Scheme Based on Weighted-Round Robin Combined with Least Connections Algorithm in SDN. In *2024 7th International Conference on Advanced Algorithms and Control Engineering (ICAACE)* (pp. 1008-1012). IEEE.
- [47] Noman, H. M., & Jasim, M. N. (2021). A Proposed Dynamic Hybrid-Based Load Balancing Algorithm to Improve Resources Utilization in SDN Environment. In *New Trends in Information and Communications Technology Applications: 5th International Conference, NTICT 2021, Baghdad, Iraq, November 17–18, 2021, Proceedings 5* (pp. 147-162). Springer International Publishing.
- [48] Sroya, M., & Singh, V. (2017). LDDWRR: least delay dynamic weighted round-robin load balancing in software defined networking. *Int J Adv Res Comput Sci*, 8(8), 5.
- [49] Begam, G. S., Sangeetha, M., & Shanker, N. R. (2022). Load balancing in DCN servers through SDN machine learning algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(2), 1423-1434.
- [50] Babbar, H., Rani, S., Bashir, A. K., & Nawaz, R. (2022). LBSMT: Load balancing switch migration algorithm for cooperative communication intelligent transportation systems. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 6(3), 1386-1395.
- [51] Surabhi, R., & Mukhopadhyay, A. (2023, October). Load Balancing in Software Defined Network Using Multiple Controllers. In *2023 International Conference on Computer Science and Emerging Technologies (CSET)* (pp. 1-7). IEEE.
- [52] Gasmelseed, H., & Ramar, R. (2019). Traffic pattern-based load-balancing algorithm in software-defined network using distributed controllers. *International journal of communication systems*, 32(17), e3841.
- [53] Chen, S. L., Chen, Y. Y., & Kuo, S. H. (2017). CLB: A novel load balancing architecture and algorithm for cloud services. *Computers & Electrical Engineering*, 58, 154-160.
- [54] Babbar, H., Parthiban, S., Radhakrishnan, G., & Rani, S. (2022). A genetic load balancing algorithm to improve the QoS metrics for software defined networking for multimedia applications. *Multimedia Tools and Applications*, 81(7), 9111-9129.

[Ο κατάλογος των έργων (έντυπων, ψηφιακών) που αναφέρθηκαν εντός του κυρίως κειμένου παρατίθενται σε αλφαβητική λίστα η οποία συντάσσεται με βάση κάποιο γνωστό πρότυπο όπως Harvard, MLA, APA, κ.ά.]

[Οπισθόφυλλο. Κενή σελίδα]