



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ  
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗΣ  
ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ**

Ελισσάβετ Χανδόλια

Επιβλέπων: Στεργίου Ελευθέριος

Καθηγητής, Αναπληρωτής

Άρτα, Φεβρουάριος, 2025

**LOAD BALANCING IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS USING  
LOAD EQUALIZATION ALGORITHMS ON LINKS**

**Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Άρτα, 06 Φεβρουαρίου 2025

## **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1. Επιβλέπων καθηγητής

Ελευθέριος Στεργίου,

Καθηγητής, Αναπληρωτής

2. Μέλος επιτροπής

Χρυσόστομος Στύλιος,

Καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Σπυριδούλα Μαργαρίτη,

ΕΔΙΠ

© Χανδόλια, Ελισσάβετ, 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.

Χανδόλια, Ελισσάβετ

Υπογραφή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ελευθέριο Στεργίου και την καθηγήτρια μου Σπυριδούλα Μαργαρίτη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την επιστημονική υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε κάθε βήμα αυτής της διαδικασίας. Οι συμβουλές και οι διορατικές παρατηρήσεις τους ήταν καθοριστικές για την ποιότητα αυτής της δουλειάς. Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη, την αγάπη και την κατανόηση που έδειξαν σε στιγμές έντασης και πίεσης. Χωρίς τη στήριξή τους, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στους συμφοιτητές και φίλους μου, οι οποίοι με ενέπνευσαν και με ενθάρρυναν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρέα, οι συζητήσεις και οι στιγμές συνεργασίας ήταν πολύτιμες. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου σε όλους εκείνους που, άμεσα ή έμμεσα, συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Είμαι ευγνώμων για τη βοήθεια και την υποστήριξή σας.

Με εκτίμηση,

Χανδόλια Ελισσάβετ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη του αλγορίθμου εξισορρόπησης φορτίου Equal-Cost Multi-Path (ECMP) στα δίκτυα Software Defined Networks (SDN) και Data Center Networks (DCN), καθώς και στις παραλλαγές του. Ο βασικός στόχος είναι η κατανόηση της λειτουργίας του ECMP σε περιβάλλοντα SDN-DCN, ο εντοπισμός των αδυναμιών του και ο προσδιορισμός αποτελεσματικών λύσεων που εξασφαλίζουν αποδοτική εξισορρόπηση φορτίου και βελτίωση της απόδοσης των DCN.

Οι παραδοσιακές τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου, που βασίζονται σε στατικές μετρικές, οδηγούν σε μη ομοιόμορφη κατανομή ροών, με αποτέλεσμα τη συμφόρηση σε συγκεκριμένες διαδρομές και την υποχρησιμοποίηση άλλων. Αρχικά, αναλύεται η λειτουργία του ECMP σε περιβάλλοντα SDN-DCN, με έμφαση στις προκλήσεις που προκύπτουν από τις συγκρούσεις κατακερματισμού (hash collisions) και την ασυμμετρία της κίνησης του δικτύου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προτεινόμενες λύσεις για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Στον τομέα της διαχείρισης συγκρούσεων κατακερματισμού, προσεγγίσεις όπως ο αλγόριθμος HEDERA, η παραγωγή πολλαπλών συναρτήσεων κατακερματισμού και η αξιοποίηση της γραμμικότητας μέσω του Relative Path Control (RePaC) εξετάζονται διεξοδικά. Για την αντιμετώπιση της ασυμμετρίας, αξιολογούνται οι αλγόριθμοι CONGA, HULA, MP-HULA, W-ECMP και P-ECMP, οι οποίοι εισάγουν νέες στρατηγικές διαχείρισης του φορτίου του δικτύου. Οι προτεινόμενες λύσεις περιλαμβάνουν την αξιοποίηση υποροών μέσω διαφορετικών διαδρομών, τη δυναμική προσαρμογή διαδρομών, την καθολική επίγνωση της συμφόρησης στις συνδέσεις και τη χρήση εναλλακτικών προσεγγίσεων, όπως η χρήση πρώτων αριθμών.

Μέσω ανάλυσης και πειραματικής αξιολόγησης, αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί αυτών των μεθόδων. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι οι προτεινόμενες λύσεις μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της εξισορρόπησης φορτίου, μειώνοντας καθυστερήσεις και βελτιστοποιώντας τη χρήση των πόρων του δικτύου. Η εργασία καταλήγει με συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω βελτιώσεις, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών και προσαρμόσιμων δικτύων SDN-DCN.

**Λέξεις-κλειδιά:** DCN, SDN, ECMP, εξισορρόπηση φορτίου

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on the study of the Equal-Cost Multi-Path (ECMP) load balancing algorithm in Software Defined Networks (SDN) and Data Center Networks (DCN) and its variants. The main objective is to understand the operation of ECMP in SDN-DCN environments, identify its weaknesses and identify effective solutions that ensure efficient load balancing and improve the performance of DCNs.

Traditional load balancing techniques, based on static metrics, lead to non-uniform flow distribution, resulting in congestion on certain paths and underutilization of others. First, we analyse the operation of ECMP in SDN-DCN environments, focusing on the challenges arising from hash collisions and network traffic asymmetry.

Then, proposed solutions to address these challenges are presented. In the area of hash collisions management, approaches such as the HEDERA algorithm, multiple hash function generation and exploiting linearity through Relative Path Control (RePaC) are thoroughly discussed. To deal with asymmetry, the CONGA, HULA, MP-HULA, W-ECMP and P-ECMP algorithms are evaluated, which introduce new network load management strategies. Proposed solutions include the use of underflows through different routes, dynamic route adaptation, global awareness of congestion at links and the use of alternative approaches such as the use of prime numbers.

Through analysis and experimental evaluation, the advantages and limitations of these methods are highlighted. The findings suggest that the proposed solutions can enhance the efficiency of load balancing by reducing delays and optimizing the use of network resources. The paper concludes with conclusions and suggestions for further improvements, contributing to the development of more efficient and adaptable SDN-DCN networks.

**Keywords:** DCN, SDN, ECMP, Load Balancing



## Περιεχόμενα

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....                                                                       | vi   |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                                                          | vii  |
| ABSTRACT .....                                                                          | viii |
| Κατάλογος Πινάκων .....                                                                 | xi   |
| Κατάλογος Εικόνων .....                                                                 | xii  |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                                       | 1    |
| 1.1 Γενικά (τα δίκτυα Software Defined Networks) .....                                  | 1    |
| 1.2 Κίνητρο και αντικείμενο (ορισμός προβλήματος) .....                                 | 2    |
| 1.3 Δομή εργασίας .....                                                                 | 4    |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....                                                             | 5    |
| 2.1 Τα προγραμματιζόμενα δίκτυα .....                                                   | 5    |
| 2.1.1 Software Defined Networking –SDN .....                                            | 5    |
| 2.1.2 OpenFlow (OF) .....                                                               | 7    |
| 2.1.3 Η γλώσσα P4 και το περιβάλλον εκτέλεσης .....                                     | 9    |
| 2.2 Τα δίκτυα κέντρων δεδομένων .....                                                   | 11   |
| 2.3 Εξισορρόπηση φορτίου στο SDN .....                                                  | 13   |
| 2.4 Κατάταξη αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου .....                                     | 16   |
| 2.5 Στατικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου (Static Load Balancing Algorithms) .....  | 18   |
| Random .....                                                                            | 19   |
| Round Robin .....                                                                       | 19   |
| Weighted Round Robin .....                                                              | 19   |
| 2.6 Δυναμικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου (Dynamic Load Balancing Algorithms) .... | 20   |
| ECMP .....                                                                              | 20   |
| Weighted ECMP .....                                                                     | 20   |
| HULA .....                                                                              | 21   |
| MP-HULA .....                                                                           | 21   |
| 2.7 Παράμετροι αξιολόγησης των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου στα δίκτυα SDN .....    | 21   |

|       |                                                                       |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.    | Διερεύνηση δυναμικών αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου .....           | 26 |
| 3.1   | ECMP .....                                                            | 26 |
| 3.1.1 | Λειτουργία ECMP .....                                                 | 26 |
| 3.2   | Τα προβλήματα του ECMP .....                                          | 29 |
| 3.2.1 | Οι συγκρούσεις των συναρτήσεων κατακερματισμού (Hash Collisions)..... | 29 |
| 3.2.2 | Ασυμμετρία (Asymmetry) .....                                          | 32 |
| 3.3   | Προτεινόμενες λύσεις .....                                            | 34 |
| 3.3.1 | Διαχείριση συγκρούσεων κατακερματισμού .....                          | 34 |
| 3.3.2 | Επίλυση της Ασυμμετρίας .....                                         | 38 |
| 3.4   | Άλλες προσεγγίσεις.....                                               | 50 |
| 3.5   | Συζήτηση .....                                                        | 61 |
| 3.5.1 | Διαπιστώσεις - Ευρήματα .....                                         | 61 |
| 3.5.2 | Αξιολόγηση επιδόσεων .....                                            | 67 |
| 3.5.3 | Στρατηγικές σχεδιασμού LB .....                                       | 68 |
| 3.5.4 | Περιορισμοί- Εφαρμογές- Επιπτώσεις της έρευνας.....                   | 71 |
| 3.5.5 | Πρωτοτυπία –Αξία .....                                                | 72 |
| 4.    | Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία .....                             | 72 |
|       | Βιβλιογραφία .....                                                    | 75 |

## Κατάλογος Πινάκων

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1- Άρθρα για δυναμικούς αλγόριθμους εξισορρόπησης φορτίου ..... | 56 |
| Πίνακας 2- Μετρικές ανά άρθρο.....                                      | 60 |
| Πίνακας 3 Αξιολόγηση επιδόσεων.....                                     | 68 |

## Κατάλογος Εικόνων

|                                                                                                        |                     |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------|
| Εικόνα 1- α) Παραδοσιακό δίκτυο SDN                                                                    | β) Δίκτυο SDN ..... | 5            |
| Εικόνα 2-Αρχιτεκτονική δικτύου SDN .....                                                               |                     | 7            |
| Εικόνα 3-Λειτουργία OpenFlow .....                                                                     |                     | 8            |
| Εικόνα 4: α) Fat Tree                                                                                  | β) VL2              | γ)           |
| Jellyfish [25] .....                                                                                   |                     | 12           |
| Εικόνα 5: α) DCell n=4                                                                                 | β) BCube n=4        | [25]..... 13 |
| Εικόνα 6- Ιστορία εξισορρόπησης φορτίου .....                                                          |                     | 14           |
| Εικόνα 7- Αναπαράσταση των SDN Load Balancing Techniques [41][43] .....                                |                     | 16           |
| Εικόνα 8- Ταξινόμηση τεχνικών SDN Load Balancing [32].....                                             |                     | 17           |
| Εικόνα 9- Λειτουργία ροών στον ECMP .....                                                              |                     | 27           |
| Εικόνα 10- Λειτουργία ECMP (shortest path) .....                                                       |                     | 27           |
| Εικόνα 11- Hash Function ECMP (Συνάρτηση κατακερματισμού ECMP).....                                    |                     | 28           |
| Εικόνα 12- ECMP με δύο συναρτήσεις κατακερματισμού .....                                               |                     | 28           |
| Εικόνα 13-1 <sup>ο</sup> παράδειγμα ECMP με σύγκρουση συνάρτησης κατακερματισμού- Hash Collision ..... |                     | 31           |
| Εικόνα 14- 2ο Παράδειγμα ECMP σύγκρουσης συναρτήσεων κατακερματισμού [64].....                         |                     | 31           |
| Εικόνα 15- Δίκτυο με ασυμμετρία .....                                                                  |                     | 32           |
| Εικόνα 16-Παράδειγμα συμμετρικού και ασύμμετρου δικτύου .....                                          |                     | 32           |
| Εικόνα 17- Εφαρμογή ECMP σε ασύμμετρο δίκτυο.....                                                      |                     | 33           |
| Εικόνα 18 Λειτουργία Relative Path Control [57] .....                                                  |                     | 38           |
| Εικόνα 19 Λειτουργία CONGA [66] .....                                                                  |                     | 42           |
| Εικόνα 20- Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου [66].....                                  |                     | 42           |
| Εικόνα 21: Συχνότητα εμφάνισης μετρικών .....                                                          |                     | 61           |
| Εικόνα 22: Χρονολόγιο εμφάνισης βελτιώσεων LB για τον ECMP .....                                       |                     | 61           |

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά (τα δίκτυα Software Defined Networks)

Τα δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό (Software-Defined Networks, SDN) αποτελούν μια σύγχρονη προσέγγιση στη δικτύωση, η οποία αποσκοπεί στην ευέλικτη και αποδοτική διαχείριση των δικτύων. Η βασική ιδέα πίσω από τα SDN είναι ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου (control plane) από το επίπεδο δεδομένων (data plane). Αυτό επιτρέπει τον κεντρικό έλεγχο του δικτύου μέσω ενός λογισμικού ελεγκτή, ο οποίος μπορεί να προγραμματίζει και να διαχειρίζεται τις ροές δεδομένων σε όλο το δίκτυο και απλοποιεί τη διαχείριση του δικτύου [1],[2],[3]. Η δυνατότητα προγραμματισμού του δικτύου μέσω λογισμικού επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή στις απαιτήσεις της επιχείρησης, την ταχεία ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και την εύκολη διαχείριση των αλλαγών στο δίκτυο [4]. Η χρήση τυποποιημένου εξοπλισμού (commodity hardware) σε συνδυασμό με τη δυνατότητα κεντρικής διαχείρισης οδηγεί σε μείωση του κόστους, τόσο σε επίπεδο εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο λειτουργίας [5]. Τα δίκτυα SDN έχουν πολλά πλεονεκτήματα μερικά από αυτά είναι:

- *Απλοποίηση της Διαχείρισης:* Η κεντρική διαχείριση του δικτύου διευκολύνει τη διαχείριση και την παρακολούθηση, μειώνοντας τον χρόνο και τον κόπο που απαιτείται για την αντιμετώπιση προβλημάτων και την υλοποίηση αλλαγών [6].
- *Βελτιωμένη Απόδοση:* Οι ελεγκτές SDN μπορούν να βελτιστοποιούν τις διαδρομές δεδομένων και να προσαρμόζονται στις συνθήκες του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, οδηγώντας σε καλύτερη απόδοση [7].
- *Καλύτερη Ασφάλεια:* Ο κεντρικός έλεγχος επιτρέπει την ταχεία υλοποίηση πολιτικών ασφαλείας και την άμεση απόκριση σε απειλές, βελτιώνοντας τη συνολική ασφάλεια του δικτύου [8].

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα δίκτυα SDN αντιμετωπίζουν και ορισμένες προκλήσεις:

- *Ασφάλεια:* Ενώ τα SDN μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια, η κεντρικοποίηση των ελέγχων δημιουργεί έναν μοναδικό σημείο αποτυχίας, το οποίο μπορεί να αποτελέσει στόχο για επιθέσεις [1].
- *Επεκτασιμότητα:* Η διαχείριση μεγάλων δικτύων μπορεί να είναι προκλητική λόγω των απαιτήσεων σε επεξεργαστική ισχύ και χωρητικότητα του ελεγκτή **Error! Reference source not found..**

- *Υιοθέτηση και Διαλειτουργικότητα*: Η μετάβαση από παραδοσιακά δίκτυα σε SDN μπορεί να είναι δύσκολη και απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και διασφάλιση της διαλειτουργικότητας με υπάρχοντα συστήματα και πρωτόκολλα [2].

Τα δίκτυα SDN αποτελούν μια καινοτόμο και ευέλικτη προσέγγιση στη δικτύωση, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευελιξία, την αποδοτικότητα και την κεντρική διαχείριση. Ωστόσο, απαιτείται προσεκτική αντιμετώπιση των προκλήσεων που παρουσιάζουν, προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητές τους.

## 1.2 Κίνητρο και αντικείμενο (ορισμός προβλήματος)

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, τα δίκτυα άλλαξαν σύμφωνα με την ταχεία μεταβολή των απαιτήσεων που θέτουν οι νέες τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing), τα μεγάλα δεδομένα (Big Data) και η τεχνητή νοημοσύνη (AI). Οι αυξημένες ανάγκες σε υπολογιστική ισχύ και χώρους αποθήκευσης υπόκεινται σε περιορισμούς από τα παραδοσιακά δίκτυα. Σε αυτή τη νέα πραγματικότητα τα δίκτυα κέντρων δεδομένων (Data Center Network-DCN) αποτελούν κρίσιμη υποδομή πληροφοριών που παρέχει υπηρεσίες υπολογισμού ή μαζικής ανταλλαγής και αποθήκευσης δεδομένων [10]. Τα σημερινά DCN έχουν μεγάλο αριθμό εξυπηρετητών (δεκάδες ή χιλιάδες) με ιδιαίτερες ανάγκες εύρους ζώνης, καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για υπολογιστικό νέφος και η υπολογιστική περιεχομένου πολυμέσων. Τα συμβατικά DCN έχουν αυξημένο αριθμό χρηστών και πολλούς περιορισμούς στην υλοποίηση. Οι σημερινές συσκευές δικτύωσης με τα αλληλοεξαρτώμενα επίπεδα ελέγχου και προώθησης οδηγούν σε αρχιτεκτονικές δικτύων που δεν είναι κατάλληλες για τις δυναμικές ανάγκες υπολογισμού και αποθήκευσης. Λύση αποτελούν τα SDN που φέρνουν επανάσταση στον τρόπο διαχείρισης και λειτουργίας των δικτύων, προσφέροντας ευελιξία, κεντρική διαχείριση και δυνατότητα προγραμματισμού των δικτυακών ροών. Προσφέρουν ένα συγκεντρωτικό, προγραμματιζόμενο περιβάλλον που μπορεί να παρέχει δυναμικές ώστε να ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των δικτύων [11].

Λόγω της ραγδαίας αύξησης του αριθμού των εφαρμογών, των δικτυακών τόπων, της ζήτησης χώρου αποθήκευσης ορισμένοι πόροι των δικτύων δεν αξιοποιούνται επαρκώς λόγω των στατικών μηχανισμών δρομολόγησης. Επιπλέον τα σημερινά DCN παρέχουν πολλές διαφορετικές διαδρομές μεταξύ των κόμβων του δικτύου και παρουσιάζουν ειδικά χαρακτηριστικά κίνησης αντιμετωπίζοντας συχνά ανισορροπία στην κίνηση του φορτίου, καθώς κάποιες συνδέσεις υφίστανται συμφόρηση, ενώ άλλες υπολειτουργούν. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί απαιτείται ένας κατάλληλος μηχανισμός εξισορρόπησης

φορτίου στις συνδέσεις για τη βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών και της χρήσης του δικτύου. Η εξισορρόπηση φορτίου επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης μεταξύ πολλαπλών συνδέσεων και, ως εκ τούτου, επιτρέπει στο δίκτυο να επεξεργάζεται περισσότερες ροές δεδομένων σε λιγότερο χρόνο [12],[13].

Ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού εξισορρόπησης φορτίου αντιμετωπίζει αρκετές απαιτήσεις στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Η πρώτη απαίτηση είναι ο τρόπος έγκαιρης και ακριβούς ανίχνευσης της συμφόρησης και η μέτρηση του εύρους ζώνης της διαδρομής που προκαλεί συμφόρηση. Δεδομένου ότι η κίνηση του κέντρου δεδομένων είναι πολύ μεγάλη και ο χρόνος RTT (Round-Trip-Time) του δικτύου είναι σε επίπεδο μικροδευτερολέπτων, η εξισορρόπηση φορτίου πρέπει να αντιδράσει στη συμφόρηση σε χρονικές κλίμακες RTT ( $\sim 100 \mu s$ ). Δεύτερον, η εξισορρόπηση φορτίου εφαρμόζει αδιακρίτως τους ίδιους αλγορίθμους σε μικρές και μεγάλες ροές. Ωστόσο, οι μικρές ροές είναι πιο ευαίσθητες στην καθυστέρηση από τις μεγάλες, επομένως οι δύο τύποι ροών πρέπει να αντιμετωπίζονται πολύ διαφορετικά. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι οι αστοχίες στους συνδέσμους είναι συχνές και ανασταλτικές στα κέντρα δεδομένων, επομένως η εξισορρόπηση φορτίου πρέπει να χειρίζεται αποτελεσματικά την ασυμμετρία που προκαλείται από αστοχίες στους συνδέσμους [13].

Με τη χρήση του SDN, η ροή εργασιών μπορεί να αλλάξει δυναμικά στα κέντρα δεδομένων για να εξυπηρετεί αποτελεσματικότερα τον εκάστοτε φόρτο εργασίας. Οι τεχνικές διαχείρισης της κυκλοφορίας με βάση το SDN-DCN χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους βελτιστοποίησης διαδρομής στον ελεγκτή SDN. Αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των διαδρομών της εισερχόμενης ροής και τη βελτιστοποίηση της διαδρομής της ροής κατά τη διάρκεια της μετάδοσής τους. Οι περισσότεροι από αυτούς ανακατευθύνουν τις ροές ανάλογα με το φορτίο κάθε ζεύξης, ανακτώντας στατιστικά στοιχεία φορτίου είτε από τον ελεγκτή είτε από κάθε μεταγωγή. επιτυγχάνοντας εξισορρόπηση φορτίου στις συνδέσεις ενώ επιλύουν προβλήματα συμφόρησης [12]. Ως εκ τούτου η εύρεση αποδοτικών μηχανισμών εξισορρόπησης του φορτίου σε επίπεδο συνδέσεων σε SDN δίκτυα κέντρων δεδομένων είναι κρίσιμη για την αποδοτική χρήση των πόρων, την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Με τη χρήση αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου μπορεί να επιτευχθεί μια πιο ορθολογική και αποδοτική διανομή του φορτίου, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τις αυξομειώσεις στη ζήτηση και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη [14].

Στα DCN ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος μηχανισμός εξισορρόπησης φορτίου στους συνδέσμους είναι ο Equal Cost Multi Path (ECMP) [13], [15],[16]. Ως εκ τούτου η παρούσα εργασία στοχεύει στη διερεύνηση του αλγορίθμου εξισορρόπησης φορτίου ECMP στα δίκτυα

SDN-DCN και τις παραλλαγές του. Συγκεκριμένα σκοπός είναι η κατανόηση της λειτουργίας αυτών των αλγορίθμων σε περιβάλλοντα SDN, ο εντοπισμός των αδυναμιών και των περιορισμών τους και ο προσδιορισμός των μηχανισμών εκείνων που εξασφαλίζουν ικανοποιητική εξισορρόπηση φορτίου και βελτιώνουν την απόδοση των DCN.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων θα συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της απόδοσης των δικτύων SDN, ενώ ταυτόχρονα θα προσφέρει νέα γνώση και τεχνικές για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που παρουσιάζονται στην εξισορρόπηση του φορτίου δικτύου σε περιβάλλοντα δικτύων κέντρων δεδομένων.

### 1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια που καλύπτουν διαφορετικές πτυχές των προγραμματιζόμενων δικτύων και της εξισορρόπησης φορτίου σε αυτά. Ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή της δομής της εργασίας. Στην εισαγωγή παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση των δικτύων SDN και της ανάγκης για εξισορρόπηση φορτίου σε αυτά. Επίσης, ορίζεται το κεντρικό πρόβλημα της εργασίας και περιγράφεται η δομή της.

Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας παρουσιάζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας SDN και του πρωτοκόλλου OpenFlow, της γλώσσας προγραμματισμού P4 και του περιβάλλοντος εκτέλεσης της και των κέντρων δικτύων δεδομένων. Ακολούθως εξετάζεται η σημασία της εξισορρόπησης φορτίου σε δίκτυα SDN και παρουσιάζονται διάφοροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό, όπως οι ECMP, Weighted ECMP, HULA, MP-HULA και στατικοί αλγόριθμοι όπως Random, Round Robin, Weighted Round Robin. Στο τρίτο κεφάλαιο διερευνάται ο αλγόριθμος ECMP. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η λειτουργία του αλγόριθμου ECMP και των παραλλαγών του, αναλύονται τα προβλήματά του και παρουσιάζονται οι λύσεις που έχουν προταθεί για την αντιμετώπισή τους. Ακολούθως γίνεται μια συζήτηση για τις λύσεις και καταγράφονται οι βασικότεροι περιορισμοί της έρευνας. Στη συνέχεια στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της εξισορρόπησης φορτίου σε προγραμματιζόμενα δίκτυα. Τέλος η εργασία ολοκληρώνεται με τη συλλογή αναφορών σε βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνησή της.

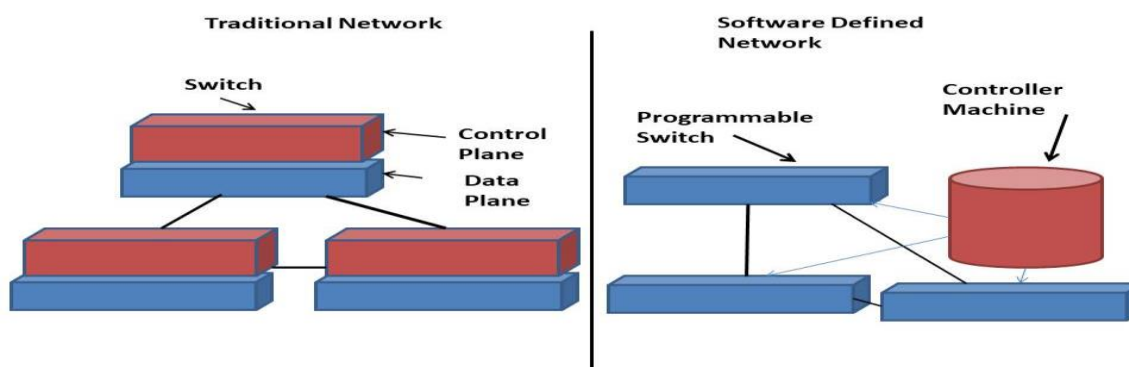


## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Τα προγραμματιζόμενα δίκτυα

#### 2.1.1 Software Defined Networking –SDN

Το SDN συνιστά μια πραγματική επανάσταση στον κόσμο του δικτύου. Οι συσκευές του παραδοσιακού δικτύου περιέχουν τόσο το επίπεδο ελέγχου όσο και το επίπεδο δεδομένων (Εικόνα 1- α) Παραδοσιακό δίκτυο SDN) όμως, το SDN αναφέρεται σε μια αρχιτεκτονική δικτύου που εισάγει έναν σαφή διαχωρισμό μεταξύ του επιπέδου δεδομένων (επίπεδο προώθησης) και του επιπέδου ελέγχου [9].



Εικόνα 1- α) Παραδοσιακό δίκτυο SDN

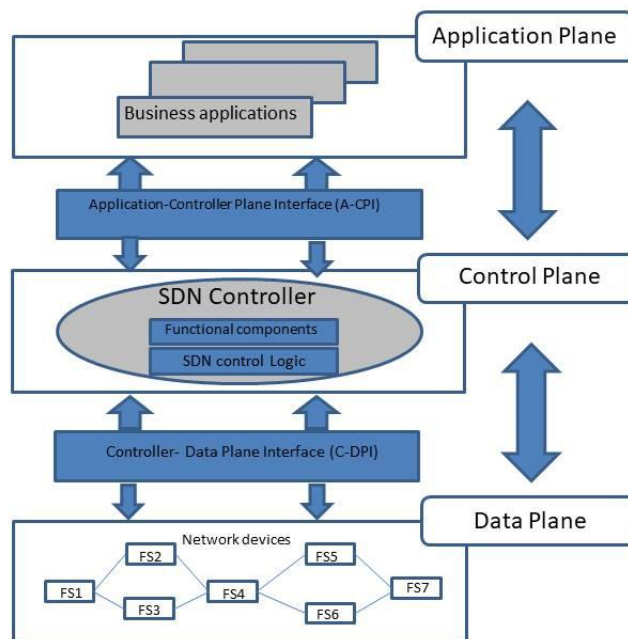
β) Δίκτυο SDN

Τα δίκτυα SDN έχουν γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη σε διάφορους τύπους δικτύων τον τελευταίο καιρό. Χρησιμοποιούνται ενεργά σε δίκτυα κέντρων δεδομένων, ασύρματα δίκτυα και δίκτυα Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), καθώς και σε δίκτυα ευρείας περιοχής [13]. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά δίκτυα, αποσυνδέουν τη λογική ελέγχου από τις συσκευές του επιπέδου δικτύου και τη συγκεντρώνουν για την αποτελεσματική προώθηση της κυκλοφορίας και τη διαχείριση της ροής σε ολόκληρο τον τομέα. Αυτή η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-Αρχιτεκτονική δικτύου SDN, έχει συσκευές προώθησης δεδομένων στο κάτω μέρος στο επίπεδο δεδομένων, το οποίο προγραμματίζεται από ελεγκτές στο επίπεδο ελέγχου. Το υψηλού επιπέδου επίπεδο εφαρμογής ή το επίπεδο διαχείρισης αλληλεπιδρά με ένα επίπεδο ελέγχου για τον προγραμματισμό ολόκληρου του δικτύου και

την επιβολή διαφορετικών πολιτικών. Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των επιπέδων λειτουργεί ως πρωτόκολλα εικονικότητας/προγραμματισμού.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-Αρχιτεκτονική δικτύου SDN η αρχιτεκτονική των SDN χωρίζεται σε τρία επίπεδα:

- *Επίπεδο εφαρμογής –Application Layer:* Περιέχει μία ή περισσότερες εφαρμογές δικτύου οι οποίες καταγράφουν το δίκτυο. Το επίπεδο εφαρμογών περιλαμβάνει δηλαδή τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες του δικτύου. Χρησιμοποιείται από τους προγραμματιστές για την υλοποίηση των εφαρμογών και για την υποστήριξη των διαδικασιών δρομολόγησης στο πλαίσιο του επιπέδου ελέγχου [17].
- *Επίπεδο ελέγχου- Control Layer:* Το επίπεδο ελέγχου απαρτίζεται από τον ελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των συσκευών του δικτύου, όπως τους μεταγωγείς και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις οδηγίες δρομολόγησης των μεταδιδόμενων πακέτων. Ο ελεγκτής μπορεί να ελέγχει έναν μεταγωγέα μέσω του OpenFlow πρωτόκολλου. Οι μεταγωγείς διατηρούν πίνακες ροών που χρησιμοποιούνται κατά την προώθηση των πακέτων. Ο πίνακας ροών περιέχει ένα σύνολο ροών (flow-entries). Κάθε flow-entry περιέχει κανόνες, ενέργειες και στατιστικά και εξαρτάται από την εκάστοτε έκδοση OpenFlow. Το επίπεδο ελέγχου εξυπηρετεί επίσης το επίπεδο εφαρμογής δημιουργώντας μια συγκεντρωτική άποψη του δικτύου για την τρέχουσα κατάστασή του και τις δυνατότητές του. Οι λειτουργίες του περιλαμβάνουν επίσης μηχανισμούς εναλλαγής αποτυχίας, ανακάλυψη τοπολογίας και συντήρησης [18], [19].
- *Επίπεδο δεδομένων –Data Layer:* Το χαμηλότερο επίπεδο αρχιτεκτονικής ονομάζεται επίπεδο υποδομής. Αυτό το επίπεδο αντιπροσωπεύει το επίπεδο δεδομένων του δικτύου και αποτελείται από φυσικές ή/και εικονικές συσκευές, όπως οι μεταγωγείς. Η σημαντικότερη λειτουργία που πρέπει να εκτελεί ένας μεταγωγέας είναι η προώθηση πακέτων σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο σύνολο κανόνων που καθορίζονται από τον ελεγκτή SDN. Ο ελεγκτής SDN είναι υπεύθυνος για τον ορισμό και την εγκατάσταση αυτών των κανόνων στον πίνακα ροής των μεταγωγέων [20], [21].



Εικόνα 2-Αρχιτεκτονική δικτύου SDN

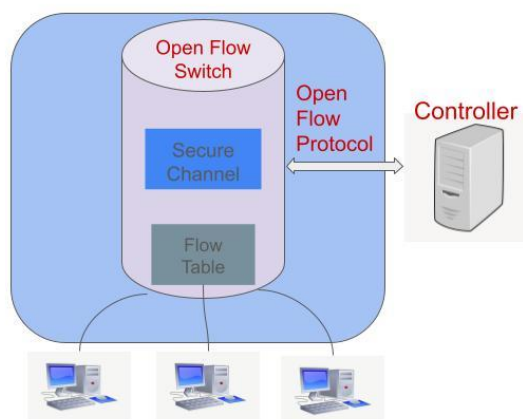
### 2.1.2 OpenFlow (OF)

Το πρωτόκολλο OpenFlow σχεδιάστηκε για να επιτρέψει την καινοτομία σε δίκτυα, κυρίως σε πανεπιστημιακά ή ερευνητικά περιβάλλοντα, δίνοντας τη δυνατότητα στους διαχειριστές να πειραματιστούν με διαφορετικά πρωτόκολλα δικτύωσης και να εξετάσουν νέες ιδέες χωρίς να χρειάζονται ακριβό εξοπλισμό ή χωρίς να επηρεάζουν το τρέχον δίκτυο παραγωγής. Το OpenFlow χωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο προώθησης (forwarding) των δικτυακών συσκευών. Συγκεκριμένα, οι δικτυακές συσκευές, μεταγωγείς και δρομολογητές, αναλαμβάνουν μόνο το κομμάτι της προώθησης πακέτων, ενώ το επίπεδο ελέγχου των ροών δεδομένων (flows) περνά σε έναν κεντρικό ελεγκτή, που έχει συνολική εικόνα του δικτύου.

Το πρωτόκολλο OpenFlow αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά των SDNs και θεωρείται ως ο πρώτος πρότυπος τρόπος για την εφαρμογή τους [22]. Το OpenFlow επιτρέπει στους ελεγκτές SDN να επικοινωνούν άμεσα με τα επίπεδα δεδομένων των δικτυακών συσκευών, όπως οι δρομολογητές και οι μεταγωγείς, παρέχοντας έτσι έναν μηχανισμό για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω λογισμικού (Εικόνα 3-Λειτουργία OpenFlow).

Κάθε μεταγωγέας που υποστηρίζει το OpenFlow διατηρεί έναν *πίνακα ροών* (flow table) που περιέχει κανόνες προώθησης [1], [22]. Όταν ο μεταγωγέας λαμβάνει ένα πακέτο, ψάχνει στον

πίνακα ροών για να δει αν υπάρχει κανόνας που να ταιριάζει με το πακέτο. Αν βρεθεί αντιστοιχία, το πακέτο προωθείται σύμφωνα με τις οδηγίες του κανόνα. Αν δεν βρεθεί κανόνας, ο μεταγωγέας στέλνει το πακέτο στον ελεγκτή OpenFlow, ο οποίος αποφασίζει πώς να χειριστεί το πακέτο και μπορεί να προσθέσει έναν νέο κανόνα στον μεταγωγέα. Ο ελεγκτής έχει πρόσβαση σε όλους τους μεταγωγείς και μπορεί να καθορίζει δυναμικά τις ροές δεδομένων σε ολόκληρο το δίκτυο, δίνοντας πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στους διαχειριστές δικτύων [2],[5]. Στο SDN με OpenFlow, ένας κεντρικός ελεγκτής μπορεί να διαχειρίζεται δυναμικά τη δρομολόγηση της κίνησης με βάση το φορτίο στους διακομιστές ή στα μονοπάτια. Ο ελεγκτής συλλέγει στατιστικά (όπως ρυθμό κίνησης, καθυστέρηση) και κατόπιν χρησιμοποιεί κανόνες OpenFlow για να καθορίσει πού θα στείλει την κίνηση. Με τη χρήση OpenFlow rules, η δρομολόγηση μπορεί να γίνει σε επίπεδο: Πακέτων (packet-level load balancing) ή Ροών (flows) (flow-level load balancing).



Εικόνα 3-Λειτουργία OpenFlow

Πλεονεκτήματα του OpenFlow:

- *Κεντρική Διαχείριση και Έλεγχος:* Μέσω του OpenFlow, ο ελεγκτής SDN μπορεί να έχει κεντρικό έλεγχο του δικτύου, παρέχοντας ευελιξία στη διαχείριση και τη διαμόρφωση του δικτύου, να αλλάξει δυναμικά το μονοπάτι της κίνησης και να αξιοποιήσει σύνθετες τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου [4].
- *Δυνατότητα Καινοτομίας:* Το OpenFlow επιτρέπει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών δικτύου χωρίς την ανάγκη αλλαγής του φυσικού εξοπλισμού, διευκολύνοντας την καινοτομία [18] .

- *Βελτιωμένη Απόδοση και Ασφάλεια:* Με την κεντρική διαχείριση των ροών δεδομένων, το OpenFlow μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου και να ενισχύσει την ασφάλεια μέσω ταχείας εφαρμογής πολιτικών ασφαλείας [8].

Το OpenFlow θεωρείται θεμελιώδες για την ανάπτυξη των SDNs, καθώς επιτρέπει στους διαχειριστές να ελέγχουν τις ροές δεδομένων μέσω λογισμικού, χωρίς να χρειάζεται να εξαρτώνται από τα κλειστά πρωτόκολλα των παραδοσιακών δικτυακών συσκευών.

### 2.1.3 Η γλώσσα P4 και το περιβάλλον εκτέλεσης

Η γλώσσα προγραμματισμού P4 (Programming Protocol-Independent Packet Processors) είναι μια πρωτοποριακή γλώσσα που επιτρέπει τον προγραμματισμό των δικτυακών συσκευών με τρόπο ανεξάρτητο από τα πρωτόκολλα. Η γλώσσα P4 επιτρέπει στους προγραμματιστές να καθορίσουν πώς τα πακέτα δεδομένων θα επεξεργάζονται από το δίκτυο, προσφέροντας μεγάλη ευελιξία και αυξημένη αποδοτικότητα. Παρουσιάστηκε το 2014 από μια ομάδα ερευνητών και μηχανικών από την κοινότητα δικτύωσης, συμπεριλαμβανομένων των Bosshart, McKeown και Rexford, με σκοπό να αντιμετωπίσουν την αδυναμία του OpenFlow να αναλύσει και να επεξεργαστεί οποιοδήποτε πεδίο στην επικεφαλίδα του πακέτου [23], [24]. Σχεδιάστηκε για να δώσει στους διαχειριστές δικτύων τον έλεγχο των διαδικασιών επεξεργασίας πακέτων, προσπερνώντας τους περιορισμούς των παραδοσιακών πρωτοκόλλων και συσκευών. Οι μεταγωγείς P4 μπορούν να προωθήσουν πακέτα σύμφωνα με οποιοδήποτε πρωτόκολλο, επειδή μπορούν να αναδιαμορφωθούν ευέλικτα από έναν αναλυτή. Με το P4 ο προγραμματισμός γίνεται στο data plane ώστε να ενσωματώνονται αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου απευθείας στους δρομολογητές και στους μεταγωγείς. Το P4 επιτρέπει την παρακολούθηση μεταβλητών (π.χ., μέτρηση εύρους ζώνης) και τη δυναμική λήψη αποφάσεων για το πού θα κατευθυνθεί η κίνηση. Η γλώσσα P4 σχεδιάστηκε για να προσφέρει τρία πλεονεκτήματα έναντι του OpenFlow: δυνατότητα αναδιαμόρφωσης στο πεδίο, ανεξαρτησία πρωτοκόλλου και ανεξαρτησία στόχου [24].

Βασικά χαρακτηριστικά της γλώσσας P4 [23], [24] είναι τα εξής:

- *Ανεξαρτησία πρωτοκόλλου:* Δεν δεσμεύεται από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δικτύωσης, επιτρέποντας στους προγραμματιστές να καθορίζουν πώς θα αναλύονται, θα επεξεργάζονται και θα δρομολογούνται τα πακέτα.
- *Ευελιξία:* Είναι δυνατό να δημιουργηθούν νέες λειτουργίες και πρωτόκολλα χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στο hardware των δικτυακών συσκευών.

- *Διαχωρισμός Λογικού και Φυσικού Επίπεδου*: Διαχωρίζει τη λογική επεξεργασία των πακέτων από το φυσικό επίπεδο των συσκευών, διευκολύνοντας τη δυναμική προσαρμογή και την ανάπτυξη.

Η γλώσσα P4 χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια [23], [24]:

- *Parser*: Ορίζει πώς τα πακέτα αναλύονται σε πεδία δεδομένων. Το parser της γλώσσας P4 είναι υπεύθυνο για την εξαγωγή των σχετικών πληροφοριών από τα πακέτα που εισέρχονται στο δίκτυο.
- *Match-Action Tables*: Αυτοί οι πίνακες καθορίζουν τις ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν βάσει των πεδίων που αναλύθηκαν από το parser. Οι πίνακες match-action είναι το κεντρικό σημείο της P4, επιτρέποντας την ευέλικτη και δυναμική επεξεργασία πακέτων.
- *Deparser*: Συνθέτει εκ νέου τα πακέτα μετά την επεξεργασία τους και τα προετοιμάζει για αποστολή στον επόμενο προορισμό τους. Το deparser εξασφαλίζει ότι τα πακέτα εξέρχονται από τη συσκευή στην κατάλληλη μορφή.

Σημαντικά πλεονεκτήματα της P4 είναι:

- *Αυξημένη Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα*

Προσφέρει στους διαχειριστές δικτύων τη δυνατότητα να δημιουργούν και να προσαρμόζουν νέες λειτουργίες και πρωτόκολλα, χωρίς να απαιτείται αλλαγή στον εξοπλισμό hardware. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιβάλλοντα όπου οι απαιτήσεις αλλάζουν συχνά και οι νέες τεχνολογίες πρέπει να ενσωματωθούν γρήγορα [24].

- *Βελτιωμένη Απόδοση*

Με την προσαρμογή της επεξεργασίας πακέτων σύμφωνα με τις συγκεκριμένες ανάγκες του δικτύου, η γλώσσα P4 μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την απόδοση των δικτυακών συσκευών. Επιτρέπει επίσης την εύκολη εφαρμογή βελτιστοποιήσεων που μπορούν να μειώσουν τη συμφόρηση και να βελτιώσουν τη διαχείριση του εύρους ζώνης.

Προκλήσεις της P4 [24]:

- Η υιοθέτησή της προϋποθέτει την εκμάθηση νέων εννοιών και εργαλείων, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στην αρχική υλοποίηση. Ωστόσο, η εκπαίδευση και η εξοικείωση με τη γλώσσα μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη σε μακροπρόθεσμη βάση.
- Η ενσωμάτωση της σε υπάρχοντα δίκτυα μπορεί να είναι προκλητική λόγω ζητημάτων συμβατότητας με το υπάρχον hardware και software. Ωστόσο, η συνεχής

ανάπτυξη και υποστήριξη της κοινότητας P4 βοηθά στην αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων.

Η γλώσσα P4 χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της δικτύωσης, όπως [23],[24]:

- *Κέντρα Δεδομένων*: Επιτρέπει την ανάπτυξη προσαρμοσμένων λύσεων δρομολόγησης και ασφάλειας, βελτιώνοντας την απόδοση και την ασφάλεια των κέντρων δεδομένων.
- *Δίκτυα Επικοινωνιών*: Χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων και τη βελτίωση της διαχείρισης του εύρους ζώνης σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών.
- *Έρευνα και Ανάπτυξη*: Η γλώσσα P4 αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την έρευνα και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών δικτύωσης, επιτρέποντας την ταχεία δοκιμή και εφαρμογή καινοτόμων ιδεών.

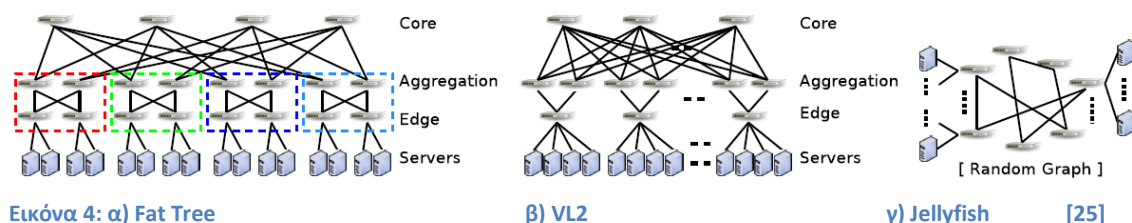
Η γλώσσα προγραμματισμού P4 προσφέρει μια ισχυρή και ευέλικτη πλατφόρμα για τον προγραμματισμό δικτυακών συσκευών, επιτρέποντας την ανάπτυξη προσαρμοσμένων και αποδοτικών λύσεων για τη διαχείριση δικτύων. Παρά τις προκλήσεις που σχετίζονται με την εκμάθηση και την ενσωμάτωσή της, η P4 αναδεικνύεται ως μια βασική τεχνολογία για τη μελλοντική ανάπτυξη των δικτύων, προσφέροντας νέες δυνατότητες και ευκαιρίες για βελτίωση της απόδοσης και της ευελιξίας.

## 2.2 Τα δίκτυα κέντρων δεδομένων

Τα δίκτυα κέντρων δεδομένων έχουν αναδειχθεί σε αναντικατάστατο και κρίσιμο εργαλείο υποδομής για την υποστήριξη των διαρκώς αυξανόμενων υπηρεσιών και εφαρμογών του Διαδικτύου [13]. Ένα δίκτυο κέντρου δεδομένων διασυνδέει συσκευές (π.χ. εξυπηρετητές) μέσα στο κέντρο δεδομένων και μεταξύ διαφόρων κέντρων δεδομένων και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση δύο κατηγορίες, την τεχνολογία μετάδοσης (ενσύρματη, ασύρματη και οπτική) και την έκταση (δηλ. εντός του κέντρου δεδομένων-ενδοκεντρικά-intra data center και μεταξύ κέντρων δεδομένων -inter data center). Όσον αφορά στην τεχνολογία μετάδοσης τα ηλεκτρικά καλώδια χρησιμοποιούνται παραδοσιακά σε μεγάλο βαθμό στα δίκτυα κέντρων δεδομένων, ενώ οι οπτικές ίνες κερδίζουν τη δυναμική με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, χαμηλές απώλειες μετάδοσης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Σήμερα, τα ασύρματα δίκτυα προσελκύουν την προσοχή ως επιλογή διασύνδεσης με μεγαλύτερη ευελιξία [25].

Όσον αφορά στα ενδοκεντρικά DCN μια σημαντική κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση την τοπολογία σύμφωνα με την οποία διακρίνονται οι τοπολογίες που βασίζονται στους μεταγωγείς (switch centric topologies) και οι τοπολογίες που βασίζονται στους εξυπηρετητές (server centric topologies). Στην πρώτη κατηγορία οι μεταγωγείς είναι οι βασικοί υπεύθυνοι

για τη μετάδοση των δεδομένων. Η τοπολογία Fat-tree είναι η πιο συνηθισμένη τοπολογία στην οποία οι μεταγωγείς συνδέονται σε τρία επίπεδα: core (πυρήνα), aggregation (συσσώρευσης) και edge (άκρων). Το πλεονέκτημα της τοπολογίας Fat-Tree (Εικόνα 4) είναι ότι όλοι οι μεταγωγείς είναι πανομοιότυποι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν φθηνά υλικά κατασκευής για όλους τους μεταγωγείς. Επιπλέον, υπάρχουν πολλαπλά μονοπάτια ίσου κόστους μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κεντρικών υπολογιστών και μπορεί θεωρητικά να επιτευχθεί πλήρες εύρος ζώνης διάσχισης. Ένα μειονέκτημα του Fat-Tree είναι η υψηλή πολυπλοκότητα της καλωδίωσης. Μια άλλη τοπολογία είναι το VL2 (Εικόνα 4) που επίσης χρησιμοποιεί μεταγωγείς χαμηλού επιπέδου για να σχηματίσει μια τοπολογία τριών επιπέδων με βάση το δέντρο. Η διαφορά με το Fat-Tree είναι ότι η τοπολογία μεταξύ των μεταγωγέων πυρήνα και των μεταγωγέων συσσώρευσης σχηματίζει ένα πλήρες διμερές γράφημα και κάθε ακραίος μεταγωγέας συνδέεται με δύο μεταγωγείς συσσώρευσης. Η τοπολογία VL2 μειώνει τον αριθμό των καλωδίων αξιοποιώντας συνδέσεις υψηλότερης ταχύτητας μεταξύ των μεταγωγέων. Μια άλλη τοπολογία switch centric είναι το Aspen Tree που προτείνεται για να βελτιώσει περαιτέρω την ανοχή σε σφάλματα ενσωματώνοντας περισσότερες συνδέσεις από το Fat-Tree. Το Aspen tree είναι μια τροποποίηση του παραδοσιακού Fat-Tree που αποσυνδέει συνδέσμους σε ένα δεδομένο επίπεδο και τους επαναχρησιμοποιεί σε περίπτωση σφάλματος στο ίδιο επίπεδο. Ως αποτέλεσμα, το aspen tree βελτιώνει την ανοχή σφαλμάτων που οφείλεται στον μειωμένο αριθμό των εξυπηρετητών. Το Jellyfish (Εικόνα 4) μια νέα μορφή τοπολογίας δημιουργεί ένα τυχαίο κανονικό γράφημα περιορισμένου βαθμού στο επίπεδο ακμών. Συγκεκριμένα, τμήματα των θυρών των ακραίων μεταγωγέων χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση εξυπηρετητών και όλες οι υπόλοιπες θύρες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός τυχαίου γράφου των μεταγωγέων [25].



Στην κατηγορία των τοπολογιών server centric οι εξυπηρετητές είναι υπεύθυνοι για την μετάδοση των δεδομένων με σημαντικότερες το DCell και το BCube (Εικόνα 5). Στην τοπολογία DCell στο επίπεδο 0 ένας συγκεκριμένος αριθμός από εξυπηρετητές συνδέεται σε έναν μεταγωγέα. Στη συνέχεια καθένας από αυτούς τους εξυπηρετητές συνδέεται με έναν



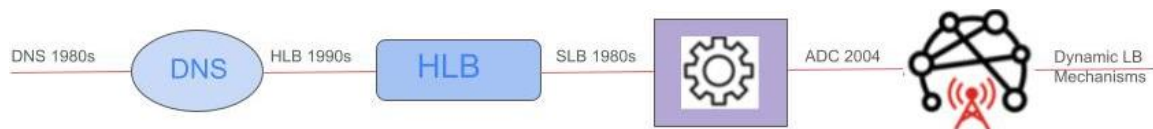
β) BCube n=4 [25]

## 2.3 Εξισορρόπηση φορτίου στο SDN

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και κυρίως στη δεκαετία του 1990, η ανάπτυξη των επιχειρηματικών δικτύων και του Διαδικτύου αύξησε τη ζήτηση για αποδοτικούς τρόπους

διαχείρισης του φορτίου. Εμφανίστηκαν τα πρώτα συστήματα εξισορρόπησης φορτίου σε επίπεδο υλικού (HLB - Hardware Load Balancers), τα οποία ήταν εξειδικευμένες συσκευές που χρησιμοποιούνταν για τη διανομή της κίνησης σε διάφορους διακομιστές με βάση το φορτίο τους **Error! Reference source not found.** Τα συστήματα HLB είχαν τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται τον όγκο της κυκλοφορίας και τον φόρτο των επιμέρους διακομιστών, προσφέροντας έτσι αποδοτικότερη χρήση των πόρων και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών. Αυτή η τεχνολογία ήταν ένα βήμα προς την εξολοκλήρου ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων για απόδοση και διαθεσιμότητα των υπηρεσιών σε μεγάλες κλίμακες (Εικόνα 6).

Ακολούθως αξιοποιήθηκαν τα λειτουργικά συστήματα διακομιστών (Server OS) για την επίτευξη εξισορρόπησης φορτίου (SLB). Το SLB είναι προσαρμόσιμο σε περιβάλλοντα απεικόνισης νέφους όπου οι διακομιστές έχουν τα δικά τους λειτουργικά συστήματα ή μοιράζονται ένα. Το SLB παρέχει κλιμάκωση των υπηρεσιών δικτύου με τη δυναμική προσθήκη περισσότερων διακομιστών και κατανέμει το φορτίο στους διακομιστές με ανοχή στην αποτυχία. Το HLB εξελίσσεται σε ελεγκτή παράδοσης εφαρμογών (Application Delivery Controller-ADC). Το ADC είναι μια συσκευή του κέντρου δεδομένων που βρίσκεται μεταξύ του τείχους προστασίας και ενός web farm και εκτελεί μια σειρά εργασιών. Υπάρχουν πολλές τεχνικές και προσεγγίσεις εξισορρόπησης φορτίου σήμερα για το ADC, όπως Round robin, Weighted round robin, IP-based hashing. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε πώς αυτές οι προσπάθειες για εξισορρόπηση φορτίου έχουν εξελιχθεί περαιτέρω με την εισαγωγή των λογισμικών εξισορροπητών φορτίου και την εμφάνιση των προγραμματιζόμενων δικτύων SDN, παρέχοντας περισσότερη ευελιξία και διαχείριση [26].



Εικόνα 6- Ιστορία εξισορρόπησης φορτίου

Την τελευταία δεκαετία η είσοδος των SDN δικτύων έρχεται να καλύψει την αδυναμία των παραδοσιακών δικτύων να προσαρμοστούν σε δυναμικές καταστάσεις. Η τεχνολογία SDN αναπτύσσεται πλέον σε πολλών ειδών δίκτυα **Error! Reference source not found.**, όπως δίκτυα οργανισμών, πανεπιστημίων, κέντρα δεδομένων και Internet Exchange Points (δίκτυα ανταλλαγής διαδικτυακής κίνησης). Τα δίκτυα αυτά πρέπει να εξυπηρετήσουν περισσότερα αιτήματα αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα να υπερφορτωθούν [28], [29]. Ως εκ τούτου η

εξισορρόπηση φορτίου κρίνεται απαραίτητη [30]. Η αρχιτεκτονική SDN ενσωματώνει τη λειτουργία ελέγχου και προώθησης του δικτύου επιτρέποντας μια πιο δυναμική και προγραμματιζόμενη διαχείρισή του [30], [31],[32]. Για τη βελτίωση της επίδοσης του δικτύου, η τεχνολογία SDN προσφέρει μια πλατφόρμα προσομοίωσης για καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με την παλαιότερη διαχείριση δικτύου [1]**Error! Reference source not found.**, [2]**Error! Reference source not found.**. Επίσης με την εξισορρόπηση φορτίου στα δίκτυα SDN γίνεται λιγότερη χρήση της CPU, υπάρχει μεγαλύτερη σταθερότητα και αξιοπιστία κατά τη μετάδοση και λήψη δεδομένων από έναν διακομιστή σε έναν άλλο [33] μειώνεται η συμφόρηση και αυξάνεται η ταχύτητα στη μετάδοση των δεδομένων. Η εξισορρόπηση φορτίου αποτελεί ένα πρωτόκολλο ‘συνειδητής δρομολόγησης’ που βοηθά στην ταχύτερη διεκπεραίωση των απαιτήσεων των χρηστών του δικτύου και βελτιώνει την αποδοτικότητα του δικτύου [31].

Πιο συγκεκριμένα, η εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα SDN επιφέρει οφέλη όσον αφορά στη:

#### *A. Βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας δικτύου από άκρο σε άκρο (QoS)*

Η εξισορρόπηση φορτίου SDN ενισχύει την αποδοτικότητα και το QoS του συνολικού συστήματος δικτύωσης [34], [35]. Η καθυστέρηση μειώνεται και η απόδοση του δικτύου βελτιώνεται προσφέροντας στον χρήστη καλύτερες υπηρεσίες.

#### *B. Βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων*

Η χρήση των πόρων, όπως εύρος ζώνης, επεξεργαστής, μνήμη, είναι σημαντική και πρέπει να βελτιστοποιείται για μέγιστη αποδοτικότητα [36].

#### *C. Μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης*

Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι μια μετρική που δείχνει τη συμφόρηση της σύνδεσης και την κατάσταση του φορτίου του μεταγωγέα. Ως αποτέλεσμα, ο ελεγκτής SDN πρέπει να παρακολουθεί τόσο την ποσότητα των bytes που αποστέλλονται όσο και τον ρυθμό με τον οποίο αυτά αποστέλλονται. Η καθυστέρηση είναι ένα χαρακτηριστικό απόδοσης του δικτύου που πρέπει να είναι από 100-300ms προκειμένου να διατηρηθεί μια ικανοποιητική μεταφορά δεδομένων [37].

#### *D. Ελαχιστοποίηση του χρόνου απόκρισης*

Ως χρόνος απόκρισης νοείται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των απαιτήσεων ενός διακομιστή και της μετάδοσης πληροφοριών [38]. Έτσι, ο αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου που χρησιμοποιεί ένα κατανεμημένο δίκτυο SDN μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο απόκρισης.

#### *E. Αποφυγή σημείων συμφόρησης*

Η συμφόρηση του δικτύου δημιουργεί συμφόρηση και στον εξισορροπιστή φορτίου [39]. Για να αποφευχθεί η συμφόρηση, η εξισορρόπηση φορτίου SDN ρυθμίζεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτωση του μεταγωγέα ή του ελεγκτή. Οι επιλογές διαμόρφωσης βελτιστοποιούνται και μειώνουν τη χρήση πόρων, ενώ αυξάνουν την αποδοτικότητα, την επεκτασιμότητα και τον χρόνο απόκρισης. Ως αποτέλεσμα οι επιδόσεις του δικτύου είναι πιο αποτελεσματικές, υπάρχει πρόληψη αποτυχίας και μείωση των σημείων συμφόρησης.

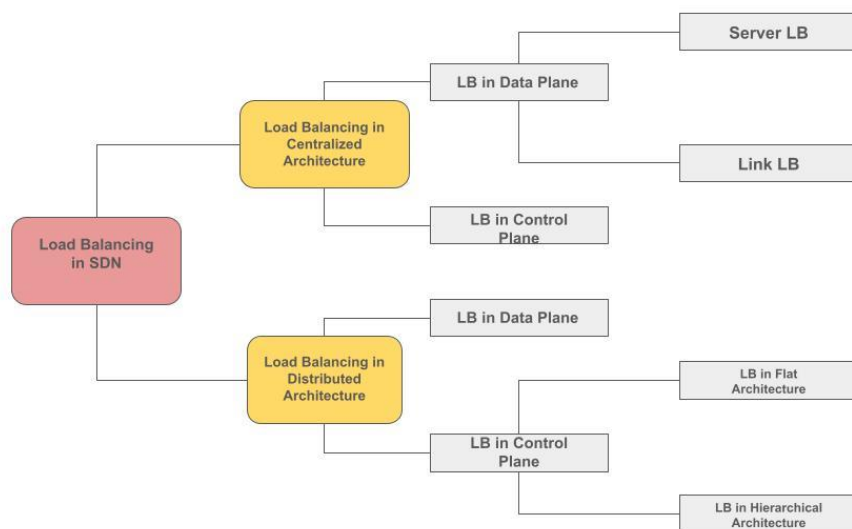
#### *F. Μεγιστοποίηση της απόδοσης*

Μια υψηλή απόδοση μετάδοσης είναι ζωτικής σημασίας για μια καλή απόδοση του δικτύου και μπορεί να επιτευχθεί με τον ισότιμο διαμοιρασμό του φόρτου εργασίας και των διαθέσιμων πόρων του δικτύου σε όλους τους κόμβους. Η εξισορρόπηση φορτίου SDN μπορεί να μεγιστοποιήσει την απόδοση [40] κατά τη μετάδοση δεδομένων.

Εν κατακλείδι η εξισορρόπηση φορτίου στοχεύει στη μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων, στην επίτευξη τη συντομότερης απόκρισης χρόνου και στη μείωση όσο το δυνατόν περισσότερο των υπερφορτώσεων στο δίκτυο με την βέλτιστη κατανομή του φόρτου εργασίας [41], [42].

## **2.4 Κατάταξη αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου**

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου. Μια βασική ταξινόμηση αυτών απεικονίζεται στην Εικόνα 7- Αναπαράσταση των SDN Load Balancing Techniques[41],[43]:

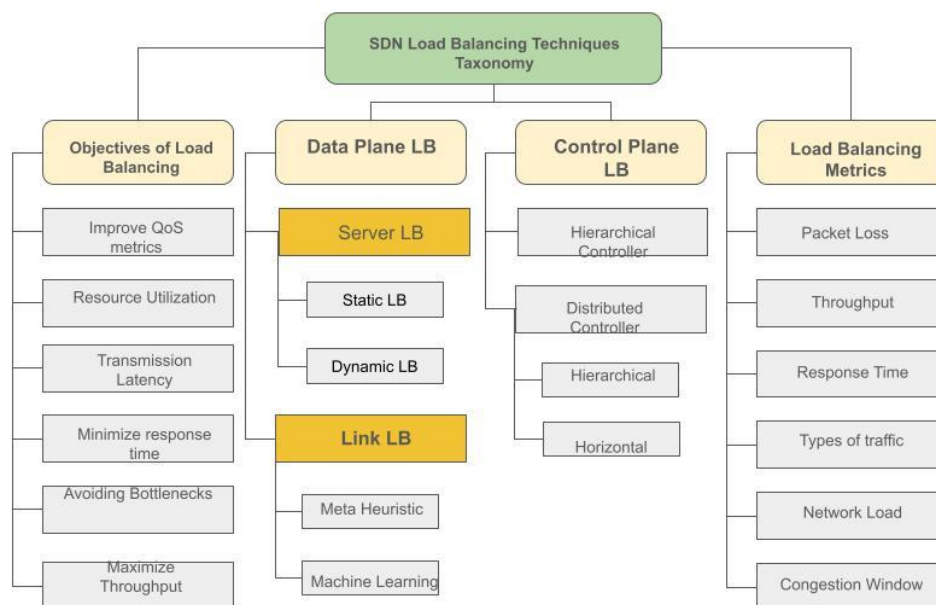


**Εικόνα 7- Αναπαράσταση των SDN Load Balancing Techniques [41][43]**

Στόχος ενός εξισορροπιστή φορτίου είναι να διαχειρίζεται σωστά την αυξημένη κυκλοφορία δεδομένων σε ένα δίκτυο ώστε να μην υπερφορτώνεται το δίκτυο. Σύμφωνα με την Εικόνα 8

οι αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου μπορούν να διακριθούν σε centralized (συγκεντρωτικοί) [41] και distributed (καταναμημένοι) [43]. Οι δύο αυτές κατηγορίες διαχωρίζονται περαιτέρω σε τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στο Data Plane (Επίπεδο δεδομένων) και στο Control Plane (Επίπεδο ελέγχου). Οι τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στο Data Plane κατηγοριοποιούνται σε τεχνικές εξισορρόπησης που αφορούν τον server από τη μία και τους συνδέσμους από την άλλη. Αντίστοιχα οι τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στο Control Plane χωρίζονται σε τεχνικές επίπεδης αρχιτεκτονικής και σε τεχνικές ιεραρχικής αρχιτεκτονικής [32].

Οι τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στο Data Plane στοχεύουν στην επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης του δικτύου μέσω της μείωσης του χρόνου καθυστέρησης. Διακρίνονται σε τεχνικές που αφορούν την εξισορρόπηση φορτίου στον server και σε τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στις συνδέσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8- Ταξινόμηση τεχνικών SDN Load Balancing[32].



Εικόνα 8- Ταξινόμηση τεχνικών SDN Load Balancing [32]

### ✓ Server Load Balancing- Εξισορρόπηση Φορτίου στον server

Στην κατηγορία του Server Load Balancing γίνεται διάκριση σε:

- στατικούς αλγόριθμους (Static Load Balancing Algorithms)
- δυναμικούς αλγόριθμους (Dynamic Load Balancing Algorithms)

*Στατικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου:* Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι κατάλληλοι για δίκτυα με χαμηλό φορτίο και απαιτούν λεπτομερή γνώση των πόρων του δικτύου. Δεν έχουν δικαίωμα προεπιλογής και χρησιμοποιούνται για τη μείωση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης

ταυτόχρονων προγραμμάτων, μειώνοντας παράλληλα τις καθυστερήσεις επικοινωνίας μεταξύ των επεξεργασιών. Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι:

- Απαιτούν λιγότερη επικοινωνία για να μειώσουν τις καθυστερήσεις στον χρόνο εκτέλεσης των αιτημάτων.
- Μπορούν να χρησιμοποιούν σταθμισμένα βάρη για ταχύτερη απόκριση και λιγότερο χρόνο επεξεργασίας.
- Κατανέμουν το φορτίο με βάση τον χρόνο επιλογής του κόμβου.
- Είναι εύκολοι στην υλοποίηση.
- Η συμπεριφορά τους είναι προβλέψιμη.

*Δυναμικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου:* Θεωρούνται πιο επιτυχημένες τεχνικές από τις στατικές λόγω της δυναμικής κατανομής του φορτίου [32]. Οι δυναμικές μέθοδοι εξισορρόπησης φορτίου έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Επιλέγουν τον κατάλληλο κόμβο για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων χρησιμοποιώντας δεδομένα του δικτύου που έχουν ληφθεί σε πραγματικό χρόνο.
- Υπερτερούν των στατικών μεθόδων.
- Είναι δύσκολο να εφαρμοστούν.
- Είναι κατάλληλες για εφαρμογές το φορτίο των οποίων είναι απρόβλεπτο ή αλλάζει κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.
- Χρησιμοποιούνται σε ετερογενή και κατανεμημένα συστήματα.
- Εξασφαλίζουν ότι κάθε κόμβος του δικτύου γνωρίζει την κατάσταση των γειτονικών του κόμβων.
- Οι διεργασίες μπορούν να αλλάζουν κόμβους κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ώστε να διασφαλίζεται η ισοκατανομή του φορτίου.

#### ✓ **Link Load Balancing-Εξισορρόπηση Φορτίου στις συνδέσεις**

Η πλειοψηφία αυτών των τεχνικών στοχεύουν στη μείωση του φορτίου των μονοπατιών επιλέγοντας για τα νέα αιτήματα το μονοπάτι με το λιγότερο φορτίο εμποδίζοντας την υπερφόρτωση του δικτύου. Διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες : μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης κ.α.

## 2.5 Στατικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου (Static Load Balancing Algorithms)

Σε έναν αλγόριθμο στατικής εξισορρόπησης φορτίου, οι διαδρομές μεταξύ των μεταγωγέων έχουν ήδη κατανεμηθεί πριν από την αποστολή των πακέτων και οι διαδρομές δεν μπορούν να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της μεταφοράς δεδομένων [44]. Ο αλγόριθμος πρέπει να γνωρίζει εκ των προτέρων το σύστημα, όπως τον επεξεργαστή, τη μνήμη, την απόδοση και την ισχύ και δεν χρειάζεται πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση του κόμβου [45]. Οι στατικοί αλγόριθμοι απαιτούν προηγούμενη γνώση του δικτύου και των απαιτήσεων των εφαρμογών. Ωστόσο, από τη στιγμή που οι εφαρμογές αρχίζουν να εκτελούνται, αυτά τα μοντέλα δεν έχουν τρόπο να προσαρμόζονται στις αλλαγές του δικτύου ή των απαιτήσεων. Συνεπώς οι στατικοί αλγόριθμοι είναι λιγότερο πολύπλοκοι και λειτουργούν καλύτερα, όταν η διακύμανση του φορτίου είναι χαμηλή. Το κύριο μειονέκτημα των στατικών αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου είναι ότι η τρέχουσα κατάσταση του δικτύου δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη των αποφάσεων και, ως εκ τούτου, δεν αποτελεί κατάλληλη προσέγγιση σε συστήματα όπως τα κατανεμημένα συστήματα στα οποία οι περισσότερες καταστάσεις του δικτύου αλλάζουν δυναμικά [46].

Οι πιο ευρέως γνωστοί στατικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου είναι:

### Random

Ο αλγόριθμος Random είναι μια από τις πιο απλές και διαδεδομένες μεθόδους εξισορρόπησης φορτίου σε δίκτυα. Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, ο αλγόριθμος αυτός κατευθύνει την κυκλοφορία σε τυχαίες διαδρομές ή διακομιστές, χωρίς να λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα αξιοποίηση ή άλλες μετρικές του δικτύου. Ο αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου Random κατανέμει το φορτίο στα διαθέσιμα μονοπάτια τυχαία [47]. Συνήθως χρησιμοποιούνται συναρτήσεις κατακερματισμού για να κατευθύνουν τα αιτήματα στα διαθέσιμα μονοπάτια.

### Round Robin

Ο αλγόριθμος Round Robin είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος εξισορρόπησης φορτίου [48]. Η βασική αρχή του είναι η κυκλική κατανομή των αιτημάτων ή των πακέτων δεδομένων στους διαθέσιμους διακομιστές ή διαδρομές, διασφαλίζοντας ότι όλα τα διαθέσιμα στοιχεία χρησιμοποιούνται ισομερώς [49]. Στον αλγόριθμο Round Robin η κατανομή του



φορτίου γίνεται κυκλικά σε όλους τους κόμβους μέσω των μονοπατιών ξεκινώντας από το πρώτο και προχωρώντας διαδοχικά μέχρι τον τελευταίο [50].

### Weighted Round Robin

Ο αλγόριθμος Weighted Round Robin αποτελεί μια παραλλαγή του παραδοσιακού Round Robin, εισάγοντας βάρη (weights) για να ληφθούν υπόψη οι διαφορές στις ικανότητες ή τις δυνατότητες των διακομιστών ή διαδρομών [48], **Error! Reference source not found.**. Αυτό επιτρέπει μια πιο αποδοτική κατανομή του φορτίου, ανάλογα με την απόδοση κάθε πόρου. Σε αυτή την προσέγγιση σε κάθε μονοπάτι ανατίθεται ένα βάρος και τα αιτήματα κατανέμονται διαδοχικά σε όλους τους κόμβους με βάση αυτό το βάρος [17].

## 2.6 Δυναμικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου (Dynamic Load Balancing Algorithms)

Στη δυναμική εξισορρόπηση φορτίου, η απόφαση για την εξισορρόπηση φορτίου λαμβάνεται στην τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Η προηγούμενη κατάσταση και η συμπεριφορά των κόμβων ελέγχεται πριν από την ανάθεση εργασιών στους κόμβους [52]. Επιπλέον στους αλγόριθμους δυναμικής εξισορρόπησης φορτίου, οι διαδρομές μπορούν να αλλάξουν στιγμιαία με βάση την παρατήρηση του δικτύου λόγω της εξισορρόπησης φορτίου του δικτύου [44]. Οι αλγόριθμοι δυναμικής εξισορρόπησης φορτίου εφαρμόζουν διάφορες πολιτικές, όπως πολιτική μεταφοράς, πολιτική θέσης, πολιτική επιλογής και πολιτική πληροφοριών. Αυτές οι πολιτικές χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση του φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές στην κατάσταση των κόμβων. Το φορτίο του βαριά φορτωμένου κόμβου μεταφέρεται στον ελαφρώς φορτωμένο κόμβο [52].

Ενδεικτικοί δυναμικοί αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου είναι:

### ECMP

Ο αλγόριθμος ECMP αποτελεί μια τεχνική δρομολόγησης που χρησιμοποιείται ευρέως σε δικτυακές υποδομές για την εξισορρόπηση του φορτίου και τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας του δικτύου. Ο ECMP επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών διαδρομών με ίσο κόστος μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού για τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων, εκμεταλλευόμενος τη φυσική πλεονάζουσα χωρητικότητα του δικτύου. Θέτει ένα όριο χρήσης εύρους ζώνης για όλες τις συνδέσεις και όταν αυτό το όριο ξεπεραστεί για κάποια σύνδεση ο ελεγκτής προωθεί την κυκλοφορία σε κάποια λιγότερο χρησιμοποιούμενη σύνδεση [24].



### Weighted ECMP

Ο αλγόριθμος Weighted Equal-Cost Multi-Path (Weighted ECMP) αποτελεί επέκταση του παραδοσιακού ECMP και χρησιμοποιείται για την πιο αποδοτική κατανομή του δικτυακού φορτίου σε πολλαπλές διαδρομές με ίσο κόστος. Σε αντίθεση με τον ECMP που κατανέμει το φορτίο ισομερώς, ο Weighted ECMP λαμβάνει υπόψη τα βάρη των διαδρομών για να επιτύχει μια πιο ισορροπημένη και αποδοτική διανομή της κυκλοφορίας [53].

### HULA

Ο αλγόριθμος HULA (Hop-by-hop Utilization-aware Load balancing Architecture) είναι μια σύγχρονη προσέγγιση για την εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα SDN. Ο HULA στοχεύει στη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου μέσω της χρήσης πληροφοριών για την αξιοποίηση των διαδρομών σε κάθε κόμβο του δικτύου, επιτρέποντας τη δυναμική και αποδοτική κατανομή της κυκλοφορίας. Ο HULA χρησιμοποιεί επαναλαμβανόμενους ανιχνευτές για να παρέχει πληροφορίες δικτύου στους μεταγωγείς. Οι μεταγωγείς παρακολουθούν το επόμενο άλμα για το καλύτερο μονοπάτι και την αντίστοιχη χρήση του για ένα δεδομένο προορισμό αντί να διατηρούν πληροφορίες για τη συμφόρηση ανά διαδρομή [54].

### MP-HULA

Ο αλγόριθμος MP-HULA (Multipath HULA) αποτελεί μια βελτίωση του αλγορίθμου HULA, εισάγοντας υποστήριξη για πολλαπλές διαδρομές. Ο MP-HULA αποσκοπεί στη βελτίωση της εξισορρόπησης φορτίου σε δίκτυα SDN μέσω της ταυτόχρονης αξιοποίησης πολλαπλών διαδρομών και της δυναμικής προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου [55].

## 2.7 Παράμετροι αξιολόγησης των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου στα δίκτυα SDN

Για την αξιολόγηση ενός αλγορίθμου εξισορρόπησης φορτίου και τη σύγκριση του με προηγούμενες μεθόδους με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό του καλύτερου αλγορίθμου είναι απαραίτητες ορισμένες παράμετροι [9]. Οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει ένα μεγάλο εύρος μετρικών για να επισημάνουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαθέσιμων τεχνικών εξισορρόπησης φορτίου. Στη συνέχεια αναλύονται οι πιο σημαντικές [37].

- *Response time (RT)*: Ο χρόνος απόκρισης είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τις μεθόδους εξισορρόπησης φορτίου και αφορά τον χρόνο που απαιτείται για να πάρει ο χρήστης την πληροφορία που ζήτησε. Επηρεάζεται από διάφορες μεταβλητές όπως τον αριθμό χρηστών, τη ζήτηση, το εύρος ζώνης και τον χρόνο επεξεργασίας. Ο τύπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος :

$$RT = \Delta(t_1 - t_2)$$

Όπου  $t_1$  είναι η χρονική στιγμή της υποβολής του αιτήματος και  $t_2$  η χρονική στιγμή που ξεκινά η επεξεργασία του αιτήματος. Η εκτέλεση μεγάλου αριθμού αιτημάτων σε μικρό χρονικό διάστημα μπορεί να βελτιώσει τον χρόνο ανταπόκρισης.

- *Throughput (T) (ρυθμοαπόδοση)*: Αφορά στο ποσοστό των αιτημάτων που προγραμματίστηκαν εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και εκτελέστηκαν με επιτυχία σε σχέση με τον συνολικό αριθμό των ολοκληρωμένων αιτημάτων. Υψηλές τιμές στην απόδοση σημαίνει ότι ο μηχανισμός εξισορρόπησης δουλεύει σωστά. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίζεται η απόδοση είναι ο εξής :

$$T = \sum_{requests\ i}^n (time\ t)$$

- *Resource Utilization (RU) (Χρήση πόρων)*: Εκφράζει την αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου (π.χ. μνήμη, CPU κ.α.) κατά την επεξεργασία του αιτήματος και είναι πολύ σημαντική για την αξιολόγηση των μεθόδων εξισορρόπησης φορτίου. Υψηλή τιμή σε αυτή την παράμετρο ισοδυναμεί με καλή απόδοση του αλγορίθμου. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίζεται είναι ο ακόλουθος:

$$RU = \frac{\sum_{request\ i}^n ET}{Maxrequest\ ET}$$

Όπου ET είναι ο χρόνος εκτέλεσης.

- *End to End Delay ή Latency (καθυστέρηση)*: Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο υπολογίζει τον χρόνο που απαιτείται για να μετακινηθεί ένα πακέτο δεδομένων μέσα στο δίκτυο, είναι δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται το πακέτο για να περάσει από την πηγή στον προορισμό σε ένα δίκτυο. Περιλαμβάνει την καθυστέρηση μετάδοσης, την καθυστέρηση διάδοσης και την καθυστέρηση μεταγωγής που προκαλεί ο μεταγωγέας κατά την προώθηση του πακέτου. Υπολογίζεται από τον τύπο [37]:

$$L = S_{td} + D_{td} + S_d + P_d$$

Όπου L είναι η καθυστέρηση,  $S_{td}$  και  $D_{td}$  είναι η καθυστέρηση μετάδοσης της πηγής και του δέκτη, ενώ αντίστοιχα  $S_d$  είναι η καθυστέρηση μεταγωγής και  $P_d$  η καθυστέρηση διάδοσης.

- *Work load degree (βαθμός φόρτου εργασίας)*: χρησιμεύει για την αξιολόγηση της κατανομής του φορτίου σε όλα τα στοιχεία δικτύωσης. Είναι δυνατόν να υπολογιστεί με τη χρήση διαφόρων δεικτών, όπως ο ρυθμός ισορροπίας φορτίου.
- *Deployment cost (κόστος ανάπτυξης-υλοποίησης)*: Αυτή η παράμετρος είναι -- ουσιαστική για την ελαχιστοποίηση του κόστους υλοποίησης του SDN με τον

υπολογισμό του βέλτιστου αριθμού των απαιτούμενων ελεγκτών για τη δημιουργία ενός αποδοτικού δικτύου.

- *Jitter (διακύμανση χρόνου μετάδοσης)*: χρησιμεύει για να περιγράψει τη διακύμανση του χρόνου μετάδοσης των πακέτων μεταξύ των στοιχείων δικτύωσης- όταν υπάρχει συμφόρηση του δικτύου, το jitter θα αυξηθεί. Προκύπτει όταν τα πακέτα δεδομένων δεν φθάνουν στον κόμβο προορισμού με την ίδια διάταξη που στάλθηκαν. Υπολογίζεται από τον τύπο:

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

- *Packet loss (απώλεια πακέτων)*: Ο συνολικός αριθμός των πακέτων που δεν φτάνουν τον αριθμό των πακέτων που αποστέλλονται στον προορισμό ονομάζεται απώλεια πακέτων. Υπολογίζεται με την αφαίρεση του αριθμού των μεταδιδόμενων και λαμβανόμενων πακέτων μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Οι αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου αποσκοπούν πάντα σε χαμηλό ποσοστό απώλειας πακέτων για να εξασφαλίσουν την αποδοτικότητα.
- *Delay (καθυστέρηση)*: Εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο για να φτάσει από τον ένα κόμβο στον άλλο και περιλαμβάνει την καθυστέρηση επικοινωνίας, καθυστέρηση δρομολόγησης και καθυστέρηση επεξεργασίας.
- *Round Trip Time (RTT)*: είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μεταβεί ένα μήνυμα ή ένα πακέτο δεδομένων από την πηγή στον προορισμό, να φτάσει στον κόμβο προορισμού και να επιστρέψει στην πηγή του προορισμού [37]. Είναι ένα απαραίτητο στοιχείο μέτρησης της απόδοσης επειδή είναι ο χρόνος αναμονής μέχρι να μεταδοθεί ένα ACK πριν από την επαναμετάδοση ενός τμήματος του μηνύματος. Εάν ο εκτιμώμενος χρόνος του RTT είναι μικρότερος από τον πραγματικό χρόνο του RTT, τα τμήματα μεταδίδονται νωρίτερα από την αυθεντική φάση ή εάν το αντίστοιχο ACK έχει διαδοθεί στο δίκτυο. Εάν η διάρκεια του RTT είναι πολύ υψηλή, οι χρονοδιακοπές είναι μεγαλύτερες από τις απαραίτητες και συνεπώς είναι λιγότερο επιτυχείς.
- *Bandwidth utilization (BU) (Χρήση εύρους ζώνης)* : Η μετρική αυτή ελέγχει το φορτίο που εφαρμόζεται στις συνδέσεις εκτιμώντας τις δυνατότητες μετάδοσης του δικτύου. Η αναλογία εύρους ζώνης του συνδέσμου υπολογίζεται από τον ελεγκτή SDN με βάση τον συνολικό αριθμό των bytes που αποστέλλονται στις σχετικές θύρες μεταγωγής κατά τη διάρκεια δύο διαδοχικών χρονικών περιόδων.

- *Migration delay (Καθυστέρηση μετακίνησης)*: Ορίζεται ως ο χρόνος που πρέπει να περάσει από τη στιγμή που ένα πακέτο μετακινείται από έναν μεταγωγέα σε έναν άλλο μέχρι να φτάσει στον τελικό προορισμό του. Ο αριθμός των μετακινήσεων πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο για την αποτελεσματική επικοινωνία.
- *Link Utilization (χρήση συνδέσμων)*: Αντιστοιχεί στην ταχύτητα μετάδοσης πακέτων σε όλη την επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων δικτύωσης και περιλαμβάνει τον ρυθμό ανοδικής/καθοδικής ζεύξης. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο :

$$Lu = \left[ (Lu)_{ij} = \frac{u_{ij}^t}{b_{ij}} \right]_{N \times N}$$

Όπου  $Lu_{ij}$  είναι η τιμή χρησιμοποίησης της σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων  $i$  και  $j$ . Ενώ το  $b_{ij}$  είναι το εύρος ζώνης της σύνδεσης και  $u_{ij}$  είναι το ποσό του εύρους ζώνης που αξιοποιείται κατά τη διάρκεια του χρονικού πλαισίου  $t$  μεταξύ των κόμβων  $i$  και  $j$ .

- *Flow Completion Time (Χρόνος ολοκλήρωσης ροής)*: Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας της ροής σε δίκτυα κέντρων δεδομένων. Αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μεταφοράς ενός αρχείου εντός μιας ροής. Οι μέθοδοι εξισορρόπησης φορτίου στοχεύουν στο να διατηρήσουν τον χρόνο ολοκλήρωσης της ροής όσο το δυνατόν μικρότερο.
- *Migration cost (κόστος μετάβασης)*: Το κόστος μετάβασης περιλαμβάνει την ανταλλαγή κόστους μηνυμάτων και κόστους φορτίου μεταξύ των στοιχείων δικτύωσης. Για την παράδοση του πακέτου στον προορισμό, κάποιος μεταγωγέας πρέπει να επικοινωνήσει με τον άλλο μεταγωγέα, το οποίο ονομάζεται κόστος μηνύματος και για να υπάρχει ισορροπημένο φορτίο μεταξύ μεταγωγέων ή ελεγκτών, το κόστος που προκύπτει για τη μεταφορά φορτίου μεταξύ μεταγωγέων ή ελεγκτών ονομάζεται κόστος φορτίου.
- *Overhead (επιβάρυνση)*: Συνιστά το συνολικό άθροισμα όλων των επιπλέον χρόνων, του χώρου, της μεταφοράς δεδομένων και της επεξεργαστικής ισχύος που απαιτεί η δραστηριότητα. Τα γενικά έξοδα περιλαμβάνουν τα έξοδα επικοινωνίας, κλοπής ροής, συγχρονισμού και συλλογής στατιστικών στοιχείων ροής.
- *Packet Load Ratio (Αναλογία φορτίου πακέτου)* : Αυτή η μετρική εφαρμόζεται για τη μέτρηση της απόδοσης της διαδρομής και τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου κίνησης σε κάθε σύνδεσμο.

- *Power Consumption (Κατανάλωση ενέργειας)*: Εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιεί κάθε κόμβος του δικτύου για την επεξεργασία ενός αιτήματος, είτε αυτό το αίτημα είναι επιτυχές είτε όχι. Η αποτελεσματική εξισορρόπηση φορτίου μειώνει τη χρήση ενέργειας.
- *Consumer satisfaction (Ικανοποίηση καταναλωτή)*: Πρόκειται για τη συνολική στάση ή συμπεριφορά των πελατών, η οποία αφορά τη διαφορά μεταξύ των προσδοκιών των πελατών και αυτών που λαμβάνουν.

Η διαδικασία για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός αλγορίθμου εξισορρόπησης φορτίου σε εφαρμογές που βασίζονται στο SDN εξαρτάται κυρίως από αυτές τις μετρήσεις. Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές, όπως ο χρόνος απόκρισης, η ρυθμοαπόδοση, η χρήση πόρων, η καθυστέρηση, η διακύμανση χρόνου μετάδοσης, ο βαθμός φόρτου εργασίας, το κόστος ανάπτυξης, ο λόγος απώλειας πακέτων, η χρήση συνδέσμου και η επιβάρυνση.

Στη δυναμική εξισορρόπηση φορτίου, η απόφαση για την εξισορρόπηση φορτίου λαμβάνεται στην τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Η προηγούμενη κατάσταση και η συμπεριφορά των κόμβων ελέγχεται πριν από την ανάθεση εργασιών στους κόμβους. Στον αλγόριθμο δυναμικής εξισορρόπησης φορτίου, οι διαδρομές μπορούν να αλλάξουν στιγμιαία με βάση την παρατήρηση του δικτύου λόγω της εξισορρόπησης φορτίου του δικτύου [52].

### 3. Διερεύνηση δυναμικών αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου

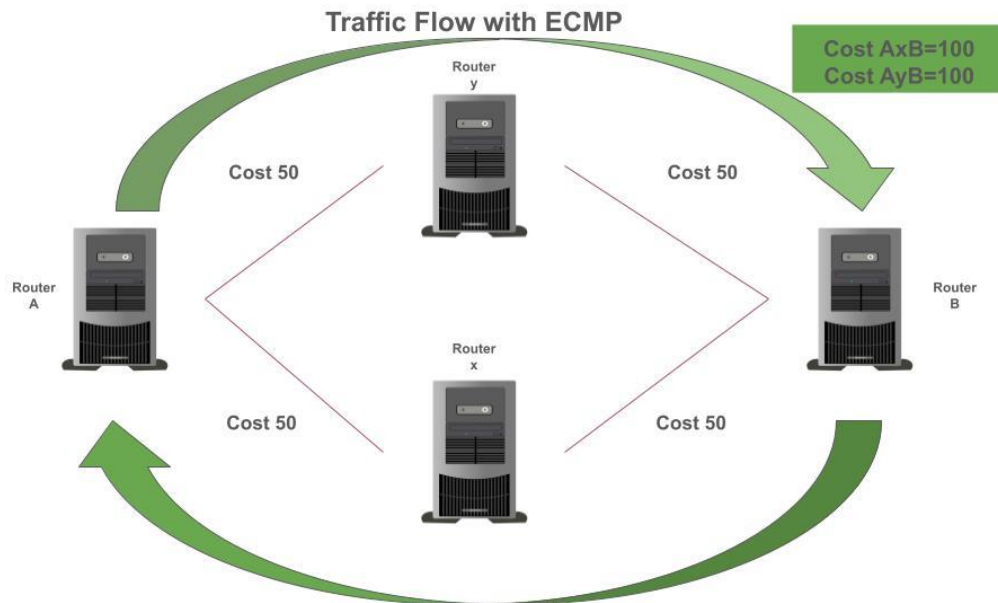
Για την υποστήριξη των απαιτήσεων υψηλού εύρους ζώνης και υψηλής διαθεσιμότητας των εφαρμογών νέφους και μεγάλων δεδομένων, τα δίκτυα κέντρων δεδομένων συχνά σχεδιάζονται με πλούσια ποικιλομορφία διαδρομών. Οι τυπικές τοπολογίες δικτύων κέντρων δεδομένων, όπως το FatTree, Leaf-spine, VL2 [25], [56] προσφέρουν εκατοντάδες μονοπάτια σε πολλαπλά επίπεδα μεταγωγέων μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους εξυπηρετητών [13]. Σε ένα τέτοιο δίκτυο πολλαπλών μονοπατιών, η διαχείριση ενός μεγάλου αριθμού μονοπατιών μεταξύ όλων των ζευγών τελικών σημείων αποτελεί πρόκληση. Ο μηχανισμός επιλογής μονοπατιών είναι πάντα ένα βασικό μέρος του σχεδιασμού του δικτύου κέντρου δεδομένων για την πλήρη αξιοποίηση του υψηλού εύρους ζώνης από αυτά τα μονοπάτια και την επίτευξη καλής κίνησης [57].

#### 3.1 ECMP

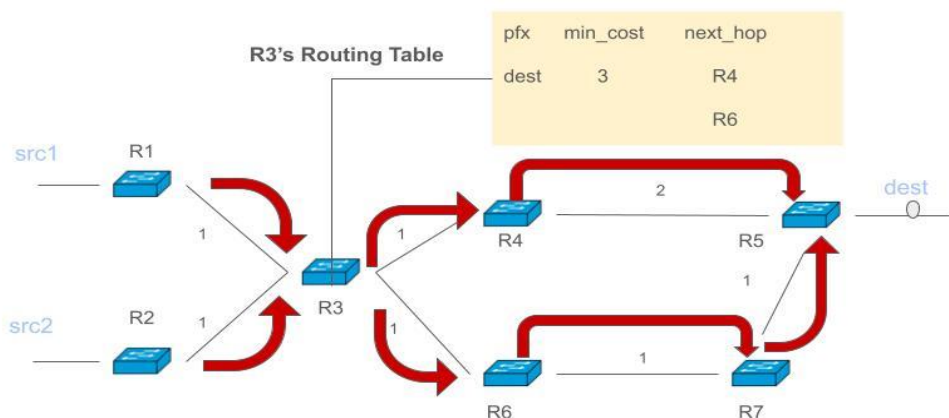
##### 3.1.1 Λειτουργία ECMP

Μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα κέντρων δεδομένων είναι η δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών ίσου κόστους ECMP, όπου οι κόμβοι διανέμουν την κίνηση ανάμεσα σε όλες τις βέλτιστες διαδρομές, δηλαδή στις πιο σύντομες [59]. Ο ECMP αποτελεί μία στρατηγική δρομολόγησης και εξισορρόπησης φορτίου που επιτρέπει τη διανομή της κίνησης από έναν κόμβο πηγής σε έναν κόμβο προορισμού μέσω πολλών διαδρομών με ίσο κόστος [58][58]. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, η επικοινωνία μεταξύ των Router A, B μέσω του ECMP μπορεί να γίνει με ίσο κόστος από δύο διαδρομές AxB, AyB. Αντίστοιχα στην Εικόνα 10 η επιλογή επόμενου μεταγωγέα δρομολόγησης για τον R3 μπορεί να είναι είτε το R4 είτε το R6 αφού έχουν το ίδιο κόστος με βάση τον ECMP.

Τα πακέτα που αποστέλλονται προς έναν προορισμό κατανέμονται σε πολλές διαδρομές με βάση τον κατακερματισμό των επικεφαλίδων των πακέτων, ο οποίος πραγματοποιείται στο υλικό του μεταγωγέα. Ο κατακερματισμός αυτός επιτρέπει στα πακέτα της ίδιας ροής να ακολουθούν την ίδια διαδρομή, αποφεύγοντας την ανάγκη αναδιάταξης. Ο ECMP, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως λειτουργία χωρίς κατάσταση και αποφυγή αναδιάταξης, έχει καθιερωθεί ως το πρότυπο για την εξισορρόπηση της κυκλοφορίας σε μεγάλα δίκτυα.



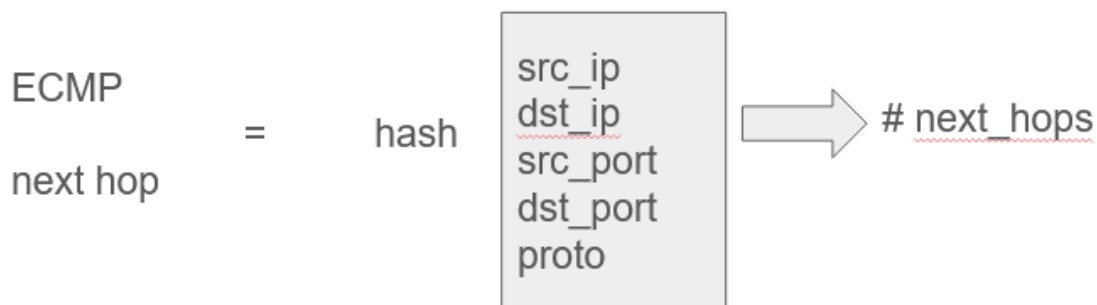
Εικόνα 9- Λειτουργία ροών στον ECMP



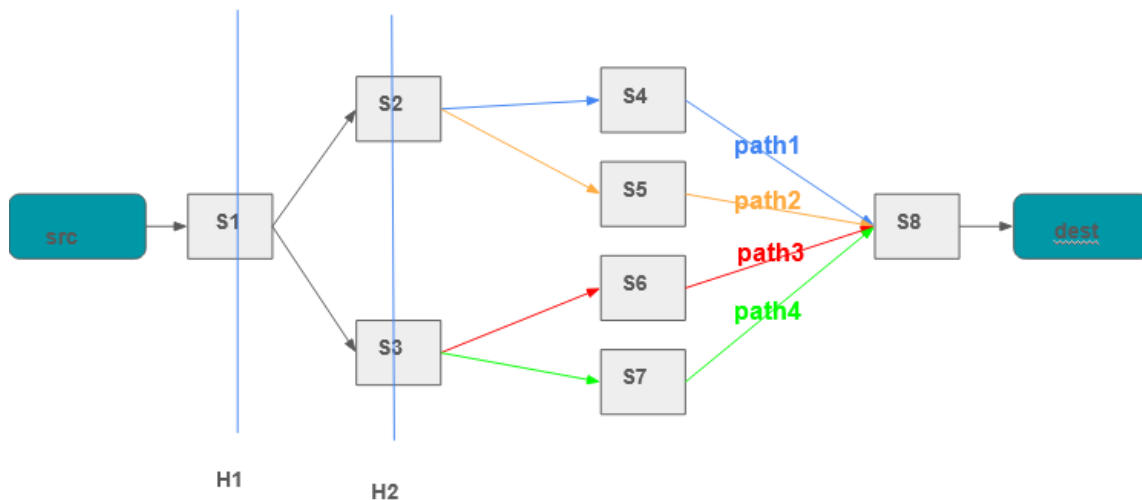
Εικόνα 10- Λειτουργία ECMP (shortest path)

Κατά την προώθηση ενός πακέτου, η στρατηγική δρομολόγησης ECMP επιλέγει την επόμενη διαδρομή (nexthop) που θα χρησιμοποιηθεί, βασισόμενη σε έναν αλγόριθμο κατακερματισμού [53]. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες συναρτήσεις κατακερματισμού για τον ECMP με πιο συνήθεις τους CRC και XOR [58]. Τα συνήθη πεδία της επικεφαλίδας των πακέτων που χρησιμοποιούνται ως είσοδος για τον κατακερματισμό περιλαμβάνουν την IP διεύθυνση της πηγής (src\_IP), την IP διεύθυνση του προορισμού

(dst\_IP), το πρωτόκολλο μεταφοράς (proto), τη θύρα πηγής (src\_port) και τη θύρα προορισμού (dst\_port) (Εικόνα 11- Hash Function ECMP (Συνάρτηση κατακερματισμού ECMP)). Κάθε διαδρομή σε μια ομάδα ECMP έχει ίση πιθανότητα να επιλεγεί για την προώθηση της κίνησης. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, η κίνηση από μια πηγή προς έναν προορισμό δρομολογείται μέσω τεσσάρων ισοδύναμων διαδρομών, οι οποίες είναι χρωματικά διακριτές, ενώ οι συναρτήσεις κατακερματισμού H1 και H2 είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.



Εικόνα 11- Hash Function ECMP (Συνάρτηση κατακερματισμού ECMP)



Εικόνα 12- ECMP με δύο συναρτήσεις κατακερματισμού

Βασικά πλεονεκτήματα του ECMP [53], [59] είναι :

- *Αυξημένη Απόδοση:* Η κατανομή του φορτίου σε πολλαπλές διαδρομές βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου.



- *Ευκολία Υλοποίησης:* Ο ECMP μπορεί να υλοποιηθεί με υπάρχουσες τεχνολογίες δρομολόγησης χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις στον εξοπλισμό του δικτύου.

Ο ECMP χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα περιβάλλοντα [53], [59], [60] όπως:

- *Κέντρα Δεδομένων:* Βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των κέντρων δεδομένων μέσω της εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των διασυνδέσεων.
- *Διαδικτυακοί Πάροχοι:* Χρήση του ECMP για τη διαχείριση της κίνησης μεταξύ των δικτύων και τη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών.
- *Επιχειρησιακά Δίκτυα:* Αύξηση της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας των δικτύων μεγάλων επιχειρήσεων μέσω της κατανομής φορτίου.

Εν κατακλείδι ο ECMP είναι ένας ισχυρός αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην απόδοση και την αξιοπιστία των δικτύων.

## 3.2 Τα προβλήματα του ECMP

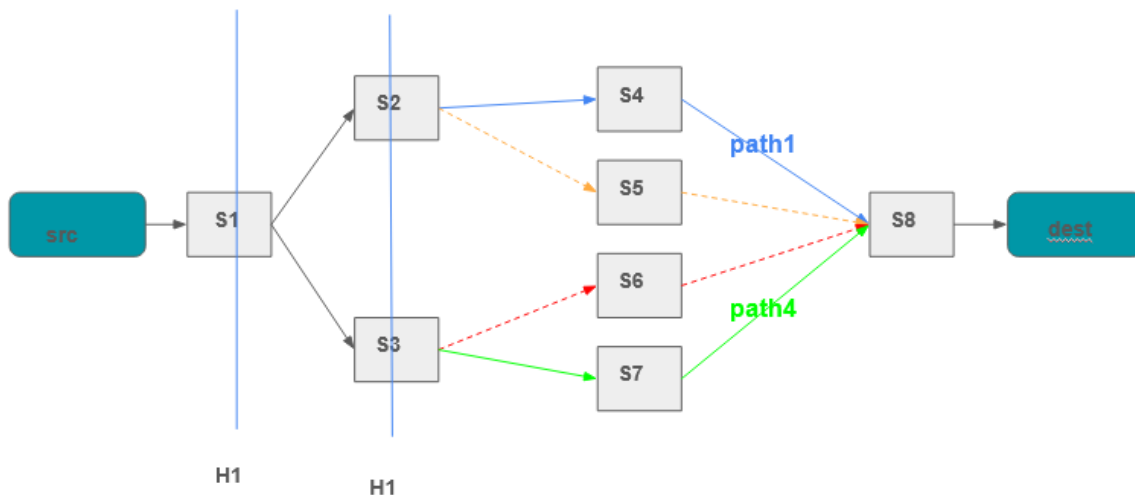
### 3.2.1 Οι συγκρούσεις των συναρτήσεων κατακερματισμού (Hash Collisions)

Ο κατακερματισμός είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στα σύγχρονα δίκτυα. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτό. Πρώτος λόγος είναι ότι τόσο τα δίκτυα κέντρων δεδομένων όσο και τα δίκτυα ευρείας περιοχής γίνονται μεγαλύτερα με περισσότερους μεταγωγείς. Δεύτερον τα σύγχρονα δίκτυα είναι πολύ πυκνά και έχουν μεγάλο αριθμό μονοπατιών μεταξύ δύο κόμβων. Τρίτον η τοπολογία και η δρομολόγηση γίνονται πιο ευέλικτες προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα και η διαθεσιμότητα του δικτύου, π.χ., η μετάβαση από απλές τοπολογίες DCN όπως Fat-Tree σε πιο πολύπλοκες όπως Jellyfish καθώς και η χρήση δρομολόγησης μη συντομότερης διαδρομής για τη βελτίωση της διαθεσιμότητας και της απόδοσης. Τέταρτον οι αναδυόμενες εφαρμογές, όπως η κατανεμημένη μηχανική μάθηση, απαιτούν μεγαλύτερη απόδοση και αυστηρότερες εγγυήσεις δικτύου. Αυτές οι νέες τάσεις θέτουν προκλήσεις στη δυνατότητα κατακερματισμού των μεταγωγέων κοινής χρήσης, η οποία αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της εξισορρόπησης φορτίου κίνησης [58].

Ο ECMP χρησιμοποιείται ευρέως στα σύγχρονα δίκτυα κέντρων δεδομένων DCN, τα οποία διαθέτουν μεγάλη ποικιλία διαδρομών για τη βελτίωση της εξισορρόπησης φορτίου και τη μείωση της συμφόρησης [59]. Οι μεταγωγείς ρυθμίζονται ώστε να χρησιμοποιούν συναρτήσεις κατακερματισμού που υπολογίζουν τιμές με βάση τις επικεφαλίδες των πακέτων και στη συνέχεια προωθούν τα πακέτα επιλέγοντας μία από τις διαθέσιμες διαδρομές,

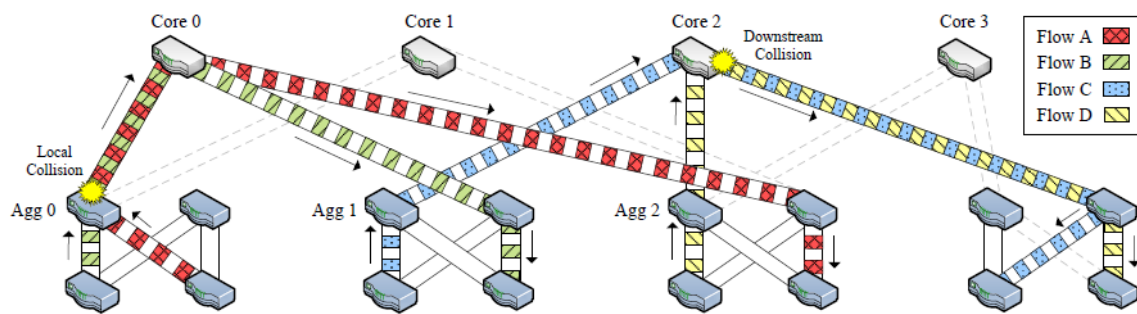
ανάλογα με την τιμή κατακερματισμού και το μέγεθος της ομάδας ECMP. Ωστόσο, τα σύγχρονα τσιπ μεταγωγής σχεδιάστηκαν για μικρότερης κλίμακας DCN ή μεγάλα αλλά αραιά δίκτυα ISP, και ως εκ τούτου υποστηρίζουν μόνο έναν περιορισμένο αριθμό ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού [58]. Για παράδειγμα, το kit ανάπτυξης λογισμικού της Broadcom για μεταγωγείς υποστηρίζει το RTAG7 [61], ένα σχήμα κατακερματισμού με επτά συναρτήσεις κατακερματισμού, ενώ η σειρά Nexus 5500 της Cisco προσφέρει οκτώ παραλλαγές του CRC8 [62].

Ο αριθμός των απαραίτητων ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού είναι σημαντικά μεγαλύτερος από ότι προσφέρεται σήμερα, ιδιαίτερα σε δίκτυα DCN. Στην πράξη, η υλοποίηση ενός μεγάλου αριθμού ασυσχέτιστων συναρτήσεων κατακερματισμού είναι δύσκολη, καθώς οι πιο περίπλοκες συναρτήσεις μπορούν να γίνουν σημείο συμφόρησης σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης [16], [63]. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς στο [64] βρήκαν ότι η δημιουργία CRC (κυκλικών κωδικών ελέγχου) αποτελεί σημαντική συμφόρηση στην επεξεργασία του πρωτοκόλλου iSCSI. Οι σχεδιαστές τσιπ μεταγωγής συχνά πρέπει να κάνουν συμβιβασμούς ανάμεσα στην ταχύτητα μετάδοσης και στην πολυπλοκότητα της συνάρτησης κατακερματισμού. Λόγω του περιορισμένου αριθμού συναρτήσεων κατακερματισμού, αυτές συχνά επαναχρησιμοποιούνται, με αποτέλεσμα να δημιουργείται το πρόβλημα της σύγκρουσης των συναρτήσεων κατακερματισμού (hash collision). Αυτό οδηγεί στο φαινόμενο όπου ένα σύνολο πακέτων επιλέγει την ίδια διαδρομή, ενώ οι υπόλοιπες διαδρομές παραμένουν αχρησιμοποίητες [65]. Επομένως η πόλωση της κίνησης περιορίζει την ποικιλία των διαδρομών, προκαλώντας μη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων διαδρομών και δημιουργώντας ανισορροπία φορτίου και συμφόρηση στο δίκτυο. Για παράδειγμα όπως προκύπτει και από την Εικόνα 12 οι μεταγωγείς s1, s2 και s3, χρησιμοποιούν την ίδια συνάρτηση κατακερματισμού (H1). Η σύγκρουση των συναρτήσεων κατακερματισμού μεταξύ των μεταγωγέων s2 (s3) και s1 προκαλεί πόλωση της κυκλοφορίας. Η Εικόνα 13-1ο παράδειγμα ECMP με σύγκρουση συνάρτησης κατακερματισμού- Hash Collision εξηγεί το πρόβλημα: η τιμή κατακερματισμού στον s2 (s3) είναι ίδια με αυτή του s1 και έτσι οι ροές προωθούνται μόνο στον s4 από τον s2 και στον s7 από τον s3. Ως αποτέλεσμα, η κυκλοφορία από την πηγή στον προορισμό χρησιμοποιεί μόνο δύο μονοπάτια δρομολόγησης αντί για τέσσερα όπως στην Εικόνα 12- ECMP με δύο συναρτήσεις κατακερματισμού. Η σύγκρουση των συναρτήσεων κατακερματισμού δημιουργεί πόλωση της κίνησης, θέτει σε κίνδυνο την αξιοπιστία, σπαταλά τη χωρητικότητα του δικτύου και οδηγεί σε θερμές συνδέσεις και συμφόρηση του δικτύου υπό υψηλά φορτία κίνησης [58].



Εικόνα 13-1<sup>ο</sup> παράδειγμα ECMP με σύγκρουση συνάρτησης κατακερματισμού- Hash Collision

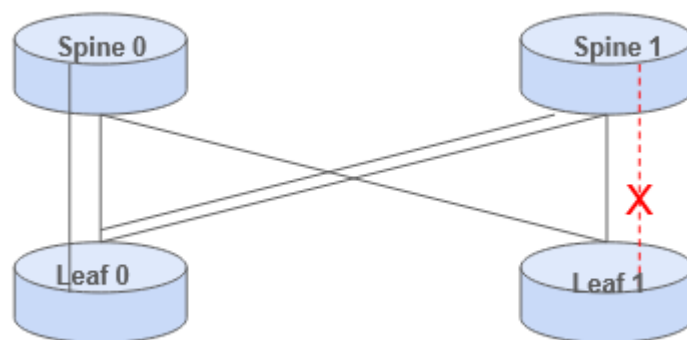
Επομένως ένας βασικός περιορισμός του ECMP είναι ότι δύο ή περισσότερες μεγάλες ροές μπορούν να παρουσιάσουν σύγκρουση λόγω του ίδιου αποτελέσματος της συνάρτησης κατακερματισμού και να καταλήξουν στην ίδια θύρα εξόδου, δημιουργώντας μια αναπόφευκτη συμφόρηση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 14. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εντοπίζονται δύο τύποι συγκρούσεων που προκαλούνται από τον κατακερματισμό. Πρώτον, οι ροές A και B παρεμβάλλονται τοπικά στο μεταγωγέα Agg0 λόγω σύγκρουσης κατακερματισμού και περιορίζονται από τη χωρητικότητα του εξερχόμενου συνδέσμου προς τον Core0. Δεύτερον οι Agg1 και Agg2 προωθούν πακέτα ανεξάρτητα και δεν μπορούν να προβλέψουν τη σύγκρουση στον Core2 για τις ροές C και D. Σε αυτό το παράδειγμα, και οι τέσσερις ροές TCP θα μπορούσαν να έχουν επιτύχει μέγιστη χωρητικότητα με βελτιωμένη προώθηση- η ροή A θα μπορούσε να προωθηθεί στον Core1 και η ροή D θα μπορούσε να προωθηθεί στον Core3. Όμως, λόγω αυτών των συγκρούσεων, και οι τέσσερις ροές συμπιέζονται και το δίκτυο υφίσταται απώλεια εύρους ζώνης κατά 50% στη διάσχιση [64]**Error! Reference source not found..**



Εικόνα 14- 2ο Παράδειγμα ECMP σύγκρουσης συναρτήσεων κατακερματισμού [64]

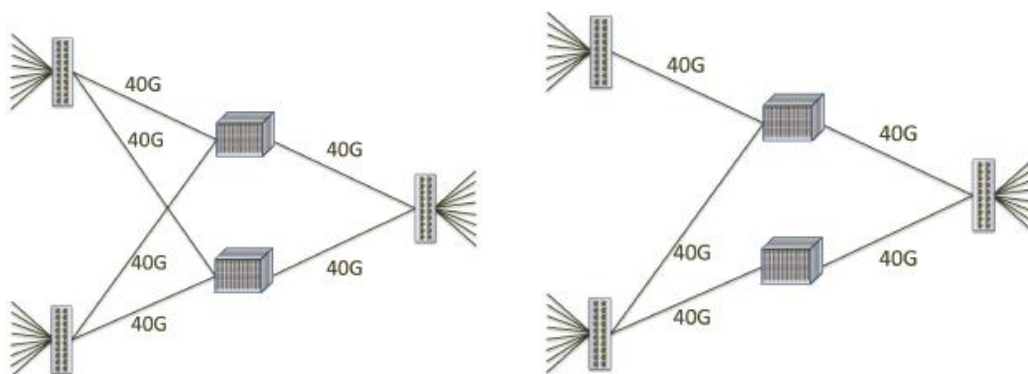
### 3.2.2 Ασυμμετρία (Asymmetry)

Η ασυμμετρία του δικτύου είναι κοινή για τα σύγχρονα δίκτυα κέντρων δεδομένων, όπου διαφορετικές διαδρομές μεταξύ ενός ή περισσότερων ζευγών πηγής/προορισμού έχουν διαφορετικό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον οι αστοχίες συνδέσεων, προβλήματα στους μεταγωγείς και ο ετερογενής εξοπλισμός δικτύου (π.χ. διαφορετικές ταχύτητες συνδέσεων και διαφορετικός αριθμός θυρών προώθησης) μπορεί να είναι συνηθισμένες και να προκαλούν ασυμμετρία [66]. Η ασυμμετρία μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του δικτύου και να δημιουργήσει προβλήματα, όπως συμφόρηση, καθυστερήσεις και κακή κατανομή του φορτίου [60]. Στην Εικόνα 15- Δίκτυο με ασυμμετρία παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ασύμμετρης τοπολογίας που προκαλείται από αστοχία συνδέσμου, όπου η χωρητικότητα του συνδέσμου μεταξύ του Spine 1 και του Leaf 1 είναι μειωμένη. Η συμφόρηση των συνδέσεων μπορεί να εμφανιστεί γρήγορα λόγω της μεγάλης κυκλοφορίας και να μειωθεί καθώς ορισμένες ροές ολοκληρώνονται.



Εικόνα 15- Δίκτυο με ασυμμετρία

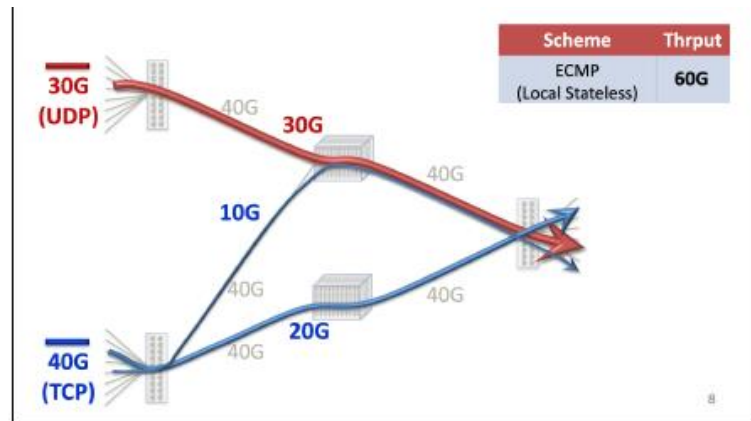
Ένα άλλο παράδειγμα συμμετρικής και ασύμμετρης τοπολογίας δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 16, όπου όλες οι συνδέσεις έχουν εύρος ζώνης 40G.



Εικόνα 16-Παράδειγμα συμμετρικού και ασύμμετρου δικτύου [66]

Η ασυμμετρία στον ECMP εμφανίζεται όταν η κυκλοφορία δεν κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των διαθέσιμων μονοπατιών, ακόμη κι αν θεωρητικά όλα τα μονοπάτια έχουν ίσο κόστος. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως οι αλγόριθμοι κατανομής των ροών, η φύση των δικτύων και οι δυναμικές συνθήκες της κυκλοφορίας. Όπως προαναφέρθηκε ο ECMP χρησιμοποιεί μια καθαρά τοπική απόφαση για τον καταμερισμό της κυκλοφορίας μεταξύ μονοπατιών ίσου κόστους, χωρίς να γνωρίζει την πιθανή συμφόρηση σε κάθε μονοπάτι [66]. Αν η συνάρτηση κατακερματισμού δεν κατανέμει ισόποσα τα πακέτα τότε δημιουργείται ασύμμετρη κατανομή, με ορισμένα μονοπάτια να είναι υπερφορτωμένα και άλλα να χρησιμοποιούνται ελάχιστα [67]. Επιπλέον αν κάποιες ροές είναι πολύ μεγαλύτερες από άλλες, η συνάρτηση κατακερματισμού δεν μπορεί να αντισταθμίσει τη διαφορά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση σε ένα μονοπάτι και υποχρησιμοποίηση σε άλλα, δημιουργώντας ασυμμετρία στη χρήση των πόρων [68].

Επιπρόσθετα ECMP δεν τα καταφέρνει καλά με την ασυμμετρία που προκαλείται από αστοχίες συνδέσμων, οι οποίες συμβαίνουν συχνά και είναι αποδιοργανωτικές στα κέντρα δεδομένων [66]. Για παράδειγμα, στην πρόσφατη μελέτη των Gill κ.ά, [69] φαίνεται ότι οι αστοχίες στους συνδέσμους μπορούν να μειώσουν την παρεχόμενη κίνηση έως και 40%. Όπως προκύπτει και από το άρθρο [66] των Alizadeh κ.ά. η εφαρμογή του ECMP σε ασύμμετρο δίκτυο όταν αυξάνουν οι ροές οδηγούν σε υπερφόρτωση συγκεκριμένων συνδέσμων και το δίκτυο γίνεται ασταθές. Επίσης όταν το δίκτυο είναι ασύμμετρο η εφαρμογή του ECMP οδηγεί σε μη πλήρη αξιοποίηση του bandwidth των συνδέσμων (Εικόνα 17)



Εικόνα 17- Εφαρμογή ECMP σε ασύμμετρο δίκτυο [66]

### 3.3 Προτεινόμενες λύσεις

#### 3.3.1 Διαχείριση συγκρούσεων κατακερματισμού

Λόγω του περιορισμένου αριθμού συναρτήσεων κατακερματισμού που παρέχονται στα τσιπ των μεταγωγέων, μια πρόκληση στο σχεδιασμό του δικτύου είναι η ανάγκη επαναχρησιμοποίησης συναρτήσεων κατακερματισμού. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση, είτε πρόκειται για συσχετισμένες είτε για πανομοιότυπες συναρτήσεις κατακερματισμού σε διαφορετικούς μεταγωγείς κατά μήκος της ίδιας διαδρομής από άκρο σε άκρο για μια ροή, προκαλεί πόλωση της κυκλοφορίας και ανισορροπία φορτίου [58]. Πολλές λύσεις έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Το σημαντικότερο εύρημα όλων είναι ότι, στην επιδίωξη της αποδοτικής χρήσης των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, ο δυναμικός προγραμματισμός ροών έχει τη δυνατότητα να προσφέρει σημαντικά κέρδη εύρους ζώνης με μέτριο πρόσθετο κόστος και μπορεί να ξεπεράσει το πρόβλημα της σύγκρουσης συναρτήσεων του ECMP [64].

Οι παραδοσιακές τεχνικές κατακερματισμού εκχωρούν τις ροές σε διαδρομές με βάση συναρτήσεις hash που χρησιμοποιούν στατικές μετρικές. Το ECMP διαλέγει τυχαία ένα μονοπάτι για κάθε ροή, με αποτέλεσμα: Οι ροές μπορεί να μην κατανέμονται ομοιόμορφα στα μονοπάτια του δικτύου, οδηγώντας σε συμφόρηση σε ορισμένα μονοπάτια και χαμηλή αξιοποίηση των υπολοίπων. Οι στατικές τεχνικές δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις αλλαγές του φορτίου ή του εύρους ζώνης των ροών, με αποτέλεσμα χαμηλή αποδοτικότητα. Οι συγγραφείς Al-Fares κ.ά [64] προτείνουν ένα σύστημα για τον δυναμικό προγραμματισμό των ροών (dynamic flow scheduling), το οποίο ονομάζουν HEDERA, το οποίο επιδιώκει να βελτιώσει την αποδοτικότητα των DCNs. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι :

**1. Κεντριοποιημένος έλεγχος των μεγάλων ροών:**

- ο Ανιχνεύει και παρακολουθεί τις μεγάλες ροές (large flows) που δημιουργούν υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και προσπαθεί να τις κατανείμει σε μονοπάτια που έχουν το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος. Ο κεντρικός ελεγκτής συλλέγει πληροφορίες για τη χρήση των διαδρομών και εκτελεί δυναμικό προγραμματισμό.

**2. Αποφυγή συμφόρησης:**

- ο Το σύστημα παρακολουθεί τα μονοπάτια στο δίκτυο και επιλέγει εκείνα που έχουν το λιγότερο φορτίο για τη μεταφορά μεγάλων ροών. Αυτό αποφεύγει τη συμφόρηση που παρατηρείται συχνά σε μονοπάτια που επιλέγονται στατικά από τεχνικές όπως το ECMP.

**3. Δυναμική επανεκχώρηση ροών (dynamic flow reallocation):**

- ο Όταν το δίκτυο ανιχνεύει μια μεγάλη ροή σε ένα ήδη συμφορημένο μονοπάτι, μπορεί να επανεκχωρήσει αυτή τη ροή σε άλλο μονοπάτι που έχει λιγότερη κίνηση, προσφέροντας δυναμική προσαρμογή στις συνθήκες του δικτύου.

**4. Μη παρεμβατική παρακολούθηση μικρών ροών:**

- ο Για τις μικρές ροές (mice flows), που καταλαμβάνουν μικρό εύρος ζώνης, ο μηχανισμός αφήνει το ECMP να τις διαχειριστεί. Οι μικρές ροές δεν επιβαρύνουν σημαντικά το δίκτυο, οπότε δεν είναι αναγκαίο να προγραμματιστούν κεντρικά.

**5. Μέτρηση εύρους ζώνης και προσαρμοστικότητα:**

- ο Χρησιμοποιεί πληροφορίες για το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κάθε μονοπάτι και αναθέτει τις ροές δυναμικά, με στόχο τη μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων και την αποφυγή bottlenecks.

Τον μηχανισμό HEDERA αξιοποίησαν και οι συγγραφείς Sun κ.ά. του άρθρου [70] σε SDN κέντρο δεδομένων τοπολογίας Fat-tree διαπιστώνοντας την αποτελεσματικότητα της δυναμικής εξισορρόπησης φορτίου του HEDERA σε μεγάλες ροές έναντι του ECMP. Συγκεκριμένα όσο η κίνηση του φορτίου αυξανόταν τόσο βελτιωνόταν η απόδοση του δικτύου με τον HEDERA. Επομένως ο μηχανισμός HEDERA βελτιώνει τα προβλήματα που δημιουργούνται από τον στατικό κατακερματισμό μέσω της δυναμικής παρακολούθησης και κατανομής των μεγάλων ροών. Με τον κεντριοποιημένο έλεγχο των μεγάλων ροών και τη δυνατότητα δυναμικής ανακατεύθυνσης τους, βελτιώνει την απόδοση των DCNs και εξασφαλίζει πιο ισορροπημένη χρήση των δικτυακών πόρων.

Βασικό μειονέκτημα του Hedera είναι ότι επειδή χρησιμοποιεί έναν κεντρικό χρονοπρογραμματιστή, είναι απαραίτητο να εκτελείται συχνά για τη μετεγκατάσταση των μεγάλων ροών, γεγονός που τον καθιστά αργό στην αντίδραση στη δυναμικά μεταβαλλόμενη κυκλοφορία σε ένα DCN σε σύγκριση με τα κατανεμημένα σχήματα προώθησης πολλαπλών διαδρομών [66].

Δεδομένου ότι η έλλειψη ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού που είναι διαθέσιμες στους μεταγωγείς εμποδίζει την απλή ανάθεση ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού σε διαφορετικούς μεταγωγείς, οι προμηθευτές μεταγωγέων προτείνουν την παραγωγή πολλαπλών συναρτήσεων κατακερματισμού από μία μέσω της χρήσης μιας αρχικής τιμής που είναι συγκεκριμένη για τον μεταγωγέα. Επειδή ο αριθμός των θυρών του μεταγωγέα είναι δυνάμεις του 2 και οι θύρες χωρίζονται συνήθως σε δύο κατευθύνσεις ίσου μεγέθους (π.χ. προς τα πάνω και προς τα κάτω) στα σύγχρονα δίκτυα, οι ομάδες ECMP με ζυγό αριθμό θυρών είναι επικρατέστεροι. Ωστόσο σύμφωνα με τους Xu κ.ά [58], οι αρχικές αυτές τιμές δεν λειτουργούν για μια ομάδα ECMP με ζυγό αριθμό θυρών, διότι η επιλογή δύο τυχαίων αρχικών τιμών δεν δημιουργεί δύο ανεξάρτητες συναρτήσεις κατακερματισμού από ένα πολώνυμο CRC. Τα πολώνυμα CRC είναι οι πιο ευρέως υλοποιημένες συναρτήσεις κατακερματισμού στο υλικό των μεταγωγέων. Η εφαρμογή μιας τυχαίας τιμής είναι μια γραμμική λειτουργία και δεν μπορεί να βελτιώσει αποτελεσματικά την έξοδο μιας συνάρτησης κατακερματισμού. Για αυτό προτείνουν δύο νέες προσεγγίσεις για τον μετριάσμό της συσχέτισης κατακερματισμού. Πρώτον μια τεχνική ανασυνδυασμού χρωμάτων που εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά της τοπολογίας των δικτύων Clos για να επιτρέψει την επαναχρησιμοποίηση της συνάρτησης κατακερματισμού και να μειώσει τον αριθμό των απαιτούμενων ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού σε DCN. Δεύτερον μια γενική τεχνική βασισμένη σε πρώτους αριθμούς για τον μετριάσμό της συσχέτισης κατακερματισμού για δίκτυα DCN και WAN. Τα αποτελέσματα των αξιολογήσεων που βασίζονται σε πραγματικά ίχνη κυκλοφορίας και τοπολογίες δείχνουν ότι οι προτεινόμενες τεχνικές μπορούν να μειώσουν την έκταση της ανισορροπίας φορτίου, ποσοτικά προσδιοριζόμενη με τον συντελεστή διακύμανσης (CV), κατά μία τάξη μεγέθους.

Μια άλλη προσέγγιση των Hendel κ.ά [71] προτείνει τον τυχαίο καθορισμό του ID των μεταγωγέων. Ωστόσο, η τυχαία ρύθμιση του ID αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης του δικτύου. Η εργασία τους επιλέγει μια διαφορετική συνάρτηση κατακερματισμού για μια διαφορετική τιμή του TTL. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση εξακολουθεί να περιορίζεται από τον περιορισμένο αριθμό συναρτήσεων κατακερματισμού και απαιτεί επίσης την τροποποίηση του υλικού του μεταγωγέα. Οι ερευνητές έχουν ήδη βασιστεί σε πρώτους αριθμούς για να

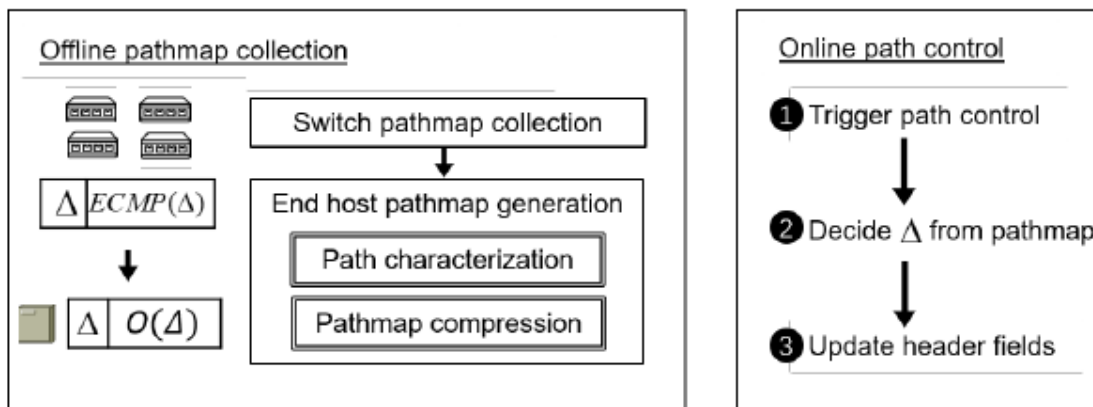


σχεδιάσουν ανεξάρτητες συναρτήσεις κατακερματισμού. Για παράδειγμα, οι καθολικές συναρτήσεις κατακερματισμού χρησιμοποιούν τον πρώτο αριθμό ως διαιρέτη. Η πατέντα του A. Meyer όπως αναφέρεται στο άρθρο [72] χρησιμοποιεί πρώτους αριθμούς για την επίλυση της σύγκρουσης αποθήκευσης για τους πίνακες κατακερματισμού, δηλαδή πώς να εισαχθεί ένα στοιχείο στον πίνακα κατακερματισμού όταν συμβεί σύγκρουση ωστόσο, η μέθοδός τους είναι παρόμοια με την επιλογή μιας τυχαίας αρχικής τιμής για τη συνάρτηση κατακερματισμού που δεν λειτουργούν για μια ομάδα ECMP ζυγού μεγέθους.

Οι Zhang κ.ά [57] θεωρούν ότι η ανάλυση του αλγορίθμου επιλογής διαδρομής ECMP δίνει πληροφορίες σχετικά με το πώς κατανέμονται οι ροές. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες τοπολογίας δικτύου σε πραγματικό χρόνο, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων θα μπορούσαν να δημιουργήσουν μια προσομοίωση δικτύου με το μοντέλο των συμπεριφορών κατακερματισμού ECMP. Το δίκτυο προσομοίωσης μπορεί να απαντήσει σε πολλά ερωτήματα σχετικά με την απόδοση του δικτύου και τις κατανομές ροών, όπως πόσες ροές θα επηρεαστούν από ορισμένα συμβάντα αποτυχίας. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος κατακερματισμού θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική απόδοση της δικτύωσης, μια προγραμματιζόμενη διεπαφή που θα επιτρέπει στους χρήστες να επανασχεδιάζουν τους αλγορίθμους κατακερματισμού θα μπορούσε να οδηγήσει σε περισσότερες καινοτομίες στον τομέα αυτό.

Οι συγγραφείς προτείνουν μία προσέγγιση που βασίζεται στη γραμμικότητα των πιο χρησιμοποιούμενων συναρτήσεων κατακερματισμού, XOR, CRC ή των παραλλαγών τους για κατακερματισμό ECMP, ώστε να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση τεχνικών κατακερματισμού στα κέντρα δεδομένων, ειδικά σε σχέση με την τυχαία κατανομή ροών και την αναποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Προτείνουν την αξιοποίηση της *γραμμικότητας των συναρτήσεων κατακερματισμού* για να δώσουν μεγαλύτερο έλεγχο στις διαδρομές που ακολουθούν οι ροές και εισάγουν τον αλγόριθμο Relative Path Control (RePaC). Ο RePaC αποτελείται από δύο μέρη: τη συλλογή χαρτών διαδρομής εκτός σύνδεσης και τον έλεγχο διαδρομής σε σύνδεση. Η συλλογή χαρτών διαδρομής χωρίς σύνδεση αποκτά την αντιστοίχιση από τη σχετική αλλαγή κεφαλίδας στη σχετική αλλαγή διαδρομής με βάση τη στατική διαμόρφωση του δικτύου (Εικόνα 18). Η διαδικτυακή μονάδα αποφασίζει ανάλογα την αλλαγή κεφαλίδας και τροποποιεί τα πακέτα για την προώθηση ορισμένων ροών σε διαφορετικό μονοπάτι με ντετερμινιστική μετατόπιση. Η ιδέα είναι να επιτρέψουν στους διαχειριστές του δικτύου να ασκήσουν σχετικό έλεγχο πάνω στα μονοπάτια που θα επιλεγούν από τον αλγόριθμο κατακερματισμού, χωρίς να χρειάζεται να αλλάξουν πλήρως τις αρχές κατακερματισμού που χρησιμοποιούνται για την

κατανομή των ροών. Η γραμμικότητα του κατακερματισμού επιτρέπει την επανακατεύθυνση των ροών σε εναλλακτικά μονοπάτια με μεγαλύτερη ευελιξία, χωρίς να απαιτούνται μεγάλες αλλαγές στις υποδομές. Μπορούν να βελτιώσουν την ισοκατανομή των ροών ανάμεσα στα μονοπάτια, αποφεύγοντας τη συμφόρηση σε συγκεκριμένες συνδέσεις. Το RePaC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη ταχύτερης εναλλαγής αποτυχίας και καλύτερου σχεδιασμού διαδρομής με έως και 3 φορές μεγαλύτερη αξιοποίηση της σύνδεσης σε κέντρα δεδομένων. Η πρόταση επιτυγχάνει τα παραπάνω με απλές επεκτάσεις στις υπάρχουσες τεχνικές, χωρίς να χρειάζονται πολύπλοκα και κοστοβόρα πρωτόκολλα. Συνοπτικά, οι συγγραφείς επιδιώκουν να προσφέρουν έναν ενδιάμεσο έλεγχο πάνω στα μονοπάτια των ροών, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του δικτύου αξιοποιώντας τη γραμμικότητα των πιο χρησιμοποιούμενων συναρτήσεων κατακερματισμού στον ECMP [57].



Εικόνα 18 Λειτουργία Relative Path Control [57]

### 3.3.2 Επίλυση της Ασυμμετρίας

Οι αποφάσεις για την εξισορρόπηση του φορτίου βασίζονται στον βαθμό ανάλυσης (granularity) της δρομολόγησης των δεδομένων και στην επίγνωση της συμφόρησης του δικτύου (congestion awareness). Υπάρχουν τριών ειδών επίπεδα ανάλυσης στη δρομολόγηση των δεδομένων στα δίκτυα: packet (πακέτο), flow (ροή) και flowlet (υποροές). Η διαφορά μεταξύ αυτών των τριών εννοιών σχετίζεται με το πόσο λεπτομερώς αντιμετωπίζεται η κίνηση και πώς μπορεί να κατανεμηθεί στο δίκτυο [73].

Το packet είναι η μικρότερη μονάδα δεδομένων που διακινείται σε ένα δίκτυο. Σε επίπεδο packet, η δρομολόγηση είναι εξαιρετικά λεπτομερής, καθώς κάθε μεμονωμένο πακέτο μπορεί θεωρητικά να κατευθυνθεί μέσω διαφορετικής διαδρομής. Αυτός ο βαθμός granularity μπορεί να προσφέρει υψηλή προσαρμοστικότητα, αλλά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, όπως η αναδιάταξη των πακέτων, όπου τα πακέτα μπορεί να φτάσουν εκτός σειράς στον προορισμό τους.

Από την άλλη ένα flowlet είναι μια μικρή υπομονάδα μιας ροής, η οποία περιέχει ένα σύνολο πακέτων που στέλνονται κοντά χρονικά μεταξύ τους αλλά διαχωρίζονται από κενά (gaps) μεταξύ των πακέτων. Αυτά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των πακέτων επιτρέπουν στα flowlets να δρομολογούνται μέσω διαφορετικών διαδρομών χωρίς να προκαλούν επαναταξινόμηση πακέτων.

Ένα flow είναι μια ακολουθία πακέτων που προέρχονται από την ίδια πηγή και κατευθύνονται στον ίδιο προορισμό με βάση συγκεκριμένα κριτήρια (όπως IP διευθύνσεις, θύρες και πρωτόκολλο). Όλα τα πακέτα μέσα σε ένα flow τυπικά ακολουθούν την ίδια διαδρομή στο δίκτυο. Η δρομολόγηση σε επίπεδο flow είναι πιο στατική και δεν παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς κατανομής των πακέτων ανάλογα με τη συμφόρηση. Όλο το flow ακολουθεί την ίδια διαδρομή, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ανισοκατανομή του φορτίου όταν υπάρχουν διαδρομές με συμφόρηση.

Όσον αφορά στην επίγνωση συμφόρησης του δικτύου υπάρχουν τρεις κατηγορίες: άγνωστη (agnostic), τοπική (local) και καθολική (global). Στην πρώτη περίπτωση η δρομολόγηση γίνεται με βάση στατικούς κανόνες, χωρίς αναπροσαρμογή λόγω συμφόρησης. Στη δεύτερη περίπτωση η επίγνωση της συμφόρησης περιορίζεται στον ίδιο τον κόμβο και τους γειτονικούς κόμβους. Η κατανομή φορτίου προσαρμόζεται μόνο σε τοπική κλίμακα. Στη τρίτη περίπτωση η επίγνωση της συμφόρησης περιλαμβάνει ολόκληρο το δίκτυο. Η δρομολόγηση προσαρμόζεται με βάση την κατάσταση συμφόρησης σε πολλούς κόμβους, εξασφαλίζοντας καλύτερη κατανομή φορτίου σε καθολικό επίπεδο [66].

Στην περίπτωση του ECMP οι αποφάσεις εξισορρόπησης φορτίου βασίζονται στην κατανομή των ροών σε μονοπάτια ίσου κόστους χωρίς καμία επίγνωση της συνολικής εικόνας συμφόρησης του δικτύου, που μπορούν να οδηγήσουν σε άνιση κατανομή του φορτίου σε περιπτώσεις ασυμμετρίας του δικτύου. Σε γενικές γραμμές, οι προσπάθειες για την αντιμετώπιση αυτών των μειονεκτημάτων του ECMP μπορούν να ταξινομηθούν σε κεντρικού προγραμματισμού μηχανισμούς (π.χ. Hedera) και σε μηχανισμούς κατανεμημένης δρομολόγησης [66]. Οι προσεγγίσεις αυτές έχουν σημαντικά μειονεκτήματα. Τα συγκεντρωτικά σχήματα είναι πολύ αργά σε περίπτωση αστάθειας της κίνησης στα κέντρα δεδομένων καθώς χρειάζονται χρόνο για να συγκεντρώσουν στοιχεία για τη συνολική κυκλοφορία του δικτύου και την κατάσταση των κόμβων, ενώ οι μηχανισμοί κατανεμημένης δρομολόγησης υιοθετούν μικρό βαθμό ανάλυσης της δρομολόγησης των δεδομένων [56]. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πολλοί μηχανισμοί που αποσκοπούν στη βελτίωση των προβλημάτων της ασυμμετρίας στην περίπτωση του ECMP που συνδυάζουν στοιχεία και από

τους δύο προαναφερθέντες μηχανισμούς και βασίζονται στη συνεργασία μεταξύ όλων των μελών του δικτύου.

Μία από τις πρώτες προσπάθειες που είχε σκοπό την επίλυση της άνισης κατανομής φορτίου στους συνδέσμους λόγω της ασυμμετρίας σε δίκτυα κέντρων δεδομένων έγινε το 2014 από τους συγγραφείς Alizadeh κ.ά του άρθρου [66] οι οποίοι πρότειναν έναν αλγόριθμο κατανομής φορτίου, τον *CONGA* (*CONGestion Awareness*), ο οποίος χρησιμοποιεί τα flowlets και το global congestion awareness (καθολική επίγνωση της συμφόρησης). Στο πείραμα που έκαναν με πραγματικά φορτία σε ένα DCN με τοπολογία Leaf-spine και μια αποτυχία στους συνδέσμους (ασυμμετρία) διαπίστωσαν ότι ο CONGA έχει 5 φορές καλύτερο χρόνο ολοκλήρωσης των ροών από τον ECMP και ότι μπορεί να αντιδράσει σε μικροδευτερόλεπτα σε περίπτωση ασυμμετρίας του δικτύου. Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν είναι ότι τα παραδοσιακά συστήματα κατανομής φορτίου δεν λαμβάνουν υπόψη τη συμφόρηση και την ασυμμετρία που μπορεί να προκύψει μεταξύ των διαδρομών. Για να επιλύσουν αυτό το ζήτημα, οι συγγραφείς προτείνουν τα εξής: *Συμφόρηση και Κατανομή Φορτίου*: Χρησιμοποιούν κατανεμημένα πρωτόκολλα που λαμβάνουν υπόψη τη συμφόρηση σε πολλαπλές διαδρομές μεταξύ δύο κόμβων μέσα στο δίκτυο του κέντρου δεδομένων. Η λύση τους είναι προσαρμοστική και επιτρέπει στους μεταγωγείς να κατανέμουν δυναμικά την κίνηση ανάλογα με τη συμφόρηση που παρατηρείται σε κάθε διαδρομή. *Κατανομή της Πληροφορίας για τη Συμφόρηση*: Κάθε μεταγωγέας που συμμετέχει στο δίκτυο μαθαίνει την κατάσταση της συμφόρησης στις διάφορες διαδρομές από την ανατροφοδότηση που λαμβάνει κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πακέτων. Αυτή η κατανομή πληροφορίας επιτρέπει στους μεταγωγείς να κατευθύνουν τη ροή της κίνησης προς τις διαδρομές με τη λιγότερη συμφόρηση. *Επιμερισμένη Αρχιτεκτονική*: Λειτουργούν σε μια αρχιτεκτονική που επιτρέπει την αποκέντρωση της λήψης αποφάσεων, κάτι που καθιστά τον αλγόριθμο πολύ πιο κλιμακούμενο και αποδοτικό σε μεγάλα κέντρα δεδομένων. *Γρήγορη Προσαρμοστικότητα*: Σχεδιάζονται έτσι ώστε να προσαρμόζονται γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου και στις αλλαγές στη συμφόρηση, χωρίς την ανάγκη κεντρικής διαχείρισης ή μεγάλων χρονικών καθυστερήσεων.

Για να επιτύχουν τα παραπάνω χρησιμοποιούν τα *flowlets*, που είναι μικρές υποροές δεδομένων και μπορούν να κατευθυνθούν μέσω διαφορετικών διαδρομών. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση της κίνησης, καθώς το κάθε flowlet μπορεί να κατευθυνθεί προς την πιο αποδοτική διαδρομή τη δεδομένη στιγμή, ανάλογα με τη συμφόρηση που παρατηρείται. Όταν το σύστημα ανιχνεύει συμφόρηση σε μία διαδρομή, μπορεί να ανακατευθύνει τα επόμενα flowlets μέσω μιας λιγότερο συνωστισμένης

διαδρομής, χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η ομαλότητα της ροής. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια δυναμική και κατανεμημένη ισορροπία φορτίου, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και βελτιστοποιώντας την απόδοση. Τα flowlets έχουν ένα χαρακτηριστικό διάκενο (inter-packet gap) που τα διαχωρίζει, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων επαναταξινόμησης πακέτων (packet reordering). Αυτό εξασφαλίζει ότι τα πακέτα φτάνουν με τη σωστή σειρά στον προορισμό τους, ακόμα κι αν τα flowlets χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδρομές. Λαμβάνονται αποφάσεις δρομολόγησης ανεξάρτητα για κάθε flowlet, αντί να δεσμεύει ένα ολόκληρο flow σε μια συγκεκριμένη διαδρομή. Αυτό προσφέρει καλύτερη ευελιξία στο δίκτυο, επιτρέποντας την κατανομή της κίνησης με βάση την τρέχουσα κατάσταση της συμφόρησης.

Επίσης χρησιμοποιείται η έννοια του *global congestion awareness* (καθολική επίγνωση της συμφόρησης) για να επιτευχθεί αποδοτική και προσαρμοστική κατανομή φορτίου σε δίκτυα κέντρων δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τη συμφόρηση σε ολόκληρο το δίκτυο αντί για τοπική συμφόρηση σε μία μόνο διαδρομή (Εικόνα 19). Αυτό επιτυγχάνεται με τα εξής βήματα:

- **Τοπική παρακολούθηση της συμφόρησης:** Κάθε μεταγωγέας στο δίκτυο του κέντρου δεδομένων παρακολουθεί την κατάσταση της συμφόρησης στις τοπικές διαδρομές του. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει μετρήσεις όπως ο ρυθμός μετάδοσης, ο όγκος των πακέτων, οι καθυστερήσεις, και η συμφόρηση που παρατηρείται στις εξόδους του μεταγωγέα. Αυτή η παρακολούθηση είναι συνεχής και γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

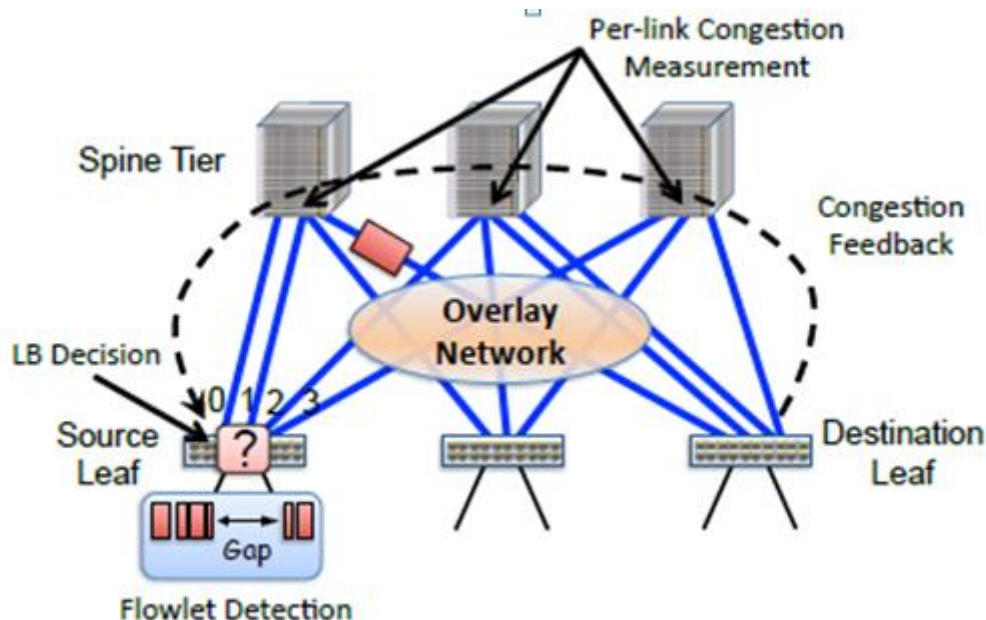
- **Ανταλλαγή πληροφορίας συμφόρησης:** Το CONGA επεκτείνει τη γνώση του κάθε μεταγωγέα από το τοπικό επίπεδο στο παγκόσμιο επίπεδο, μέσω της ανταλλαγής πληροφορίας για τη συμφόρηση μεταξύ των μεταγωγέων. Κάθε μεταγωγέας λαμβάνει ανατροφοδότηση για τη συμφόρηση από τους υπόλοιπους μεταγωγείς κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των πακέτων, επιτρέποντάς του να έχει μια συνολική εικόνα της κατάστασης του δικτύου. Αυτό γίνεται με ελαφριά πρόσθετα δεδομένα (overhead) στα πακέτα που περνούν από το δίκτυο, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες συμφόρησης από τους ενδιάμεσους μεταγωγείς.

- **Κατανεμημένη λήψη αποφάσεων:** Χρησιμοποιώντας την πληροφορία που συλλέγεται από άλλους μεταγωγείς, ο κάθε μεταγωγέας μπορεί να λάβει πιο έξυπνες και καθολικά βελτιστοποιημένες αποφάσεις για τη δρομολόγηση της κίνησης. Αν, για παράδειγμα, ένας μεταγωγέας γνωρίζει ότι μια διαδρομή είναι ήδη συμφορημένη σε κάποιο άλλο σημείο του δικτύου, μπορεί να ανακατευθύνει τα flowlets μέσω μιας άλλης διαδρομής που έχει λιγότερη συμφόρηση.

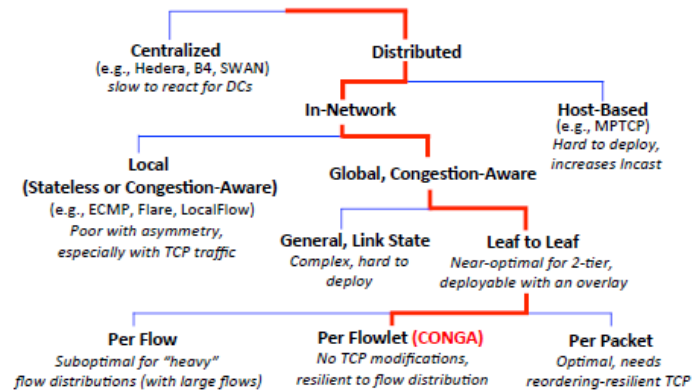
- *Δυναμική προσαρμογή στις αλλαγές:* Το global congestion awareness επιτρέπει στους μεταγωγείς να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβολές της συμφόρησης καθώς αυτή εξελίσσεται. Οι αποφάσεις κατανομής φορτίου μπορούν να αναθεωρούνται σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας έτσι μια εξαιρετικά ευέλικτη και αποδοτική λύση σε περιβάλλοντα όπου το φορτίο και η συμφόρηση μεταβάλλονται διαρκώς.

- *Βελτίωση της κατανομής φορτίου:* Το γεγονός ότι κάθε μεταγωγέας έχει πρόσβαση στην καθολική εικόνα της συμφόρησης το βοηθά να αποφεύγει τη δημιουργία σημείων υψηλής συμφόρησης και να κατανέμει το φορτίο πιο ομοιόμορφα σε όλο το δίκτυο. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων διαδρομών και των πόρων του δικτύου, αυξάνοντας την απόδοση και μειώνοντας τις καθυστερήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, ο CONGA αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ασυμμετρίας στην κίνηση και της συμφόρησης βασιζόμενος στα flowlets και στην καθολική επίγνωση της συμφόρησης του δικτύου, εξασφαλίζοντας καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων και βελτιωμένη απόδοση του δικτύου σε σύγκριση με τον ECMP.

Συνοψίζοντας όπως προκύπτει και από την Εικόνα 20 ο αλγόριθμος CONGA βασίζεται στην κατανεμημένη διαχείριση, έχει καθολική επίγνωση της συμφόρησης του δικτύου και διαχειρίζεται το φορτίο χρησιμοποιώντας υποροές. Συμπερασματικά ο CONGA ανταποκρίνεται καλύτερα από τον ECMP επειδή λειτουργεί στο επίπεδο δεδομένων, λαμβάνοντας αποφάσεις εξισορρόπησης φορτίου κάθε λίγα μικροδευτερόλεπτα.



Εικόνα 19 Λειτουργία CONGA [66]



Εικόνα 20- Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου [66]

## HULA

Ωστόσο, η προσέγγιση του CONGA έχει σημαντικό κόστος υλοποίησης. Πρώτον, υλοποιείται σε προσαρμοσμένο πυρίτιο σε ένα τσιπ μεταγωγής, απαιτώντας αρκετούς μήνες σχεδιασμού υλικού και προσπάθειας επαλήθευσης. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος CONGA, αφού υλοποιηθεί, δεν μπορεί να τροποποιηθεί. Δεύτερον, η μνήμη σε ένα τσιπ μεταγωγής είναι περιορισμένη, γεγονός που σημαίνει ότι η τεχνική CONGA να διατηρεί την κατάσταση συμφόρησης ανά διαδρομή στους μεταγωγείς φύλλων περιορίζει τη χρήση της σε τοπολογίες με μικρό αριθμό διαδρομών. Αυτό εμποδίζει την επεκτασιμότητα της CONGA και ως εκ τούτου, έχει σχεδιαστεί μόνο για τοπολογίες Leaf-Spine δύο επιπέδων [54], [74].

Με αφορμή τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν το ECMP και το CONGA και θέλοντας να δώσουν και αυτοί λύση στα προβλήματα ασυμμετρίας στα DCN, το 2016 οι Katta κ.ά [54] παρουσίασαν το HULA (*Hop-by-hop Utilization-aware Load balancing Architecture*), ένα κλιμακούμενο σύστημα εξισορρόπησης φορτίου σε επίπεδο δεδομένων που προγραμματίσαν στη γλώσσα P4. Το HULA είναι το πρώτο σχήμα εξισορρόπησης φορτίου που σχεδιάστηκε ρητά για ένα προγραμματιζόμενο επίπεδο δεδομένων μεταγωγέα. Ο προγραμματισμός του HULA σε γλώσσα P4 επιτρέπει σε έναν διαχειριστή δικτύου να μεταγλωττίσει το HULA σε οποιονδήποτε υλικό υποστηρίζεται από το P4. Επιπλέον, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων έχουν την ευελιξία να τροποποιούν και να μεταγλωττίζουν εκ νέου το πρόγραμμα HULA P4 όπως επιθυμούν (αλλάζοντας τις παραμέτρους και τη βασική λογική του HULA) χωρίς να χρειάζεται να επενδύσουν σε νέο υλικό. Επίσης, το HULA συνδυάζει τον μηχανισμό εξισορρόπησης φορτίου CONGA και την κατανομημένη δρομολόγηση δικτύου [75].

Οι Katta κ.ά [54] αξιολόγησαν τον μηχανισμό σε ένα δίκτυο κέντρων δεδομένων τοπολογίας Fat-tree και στην περίπτωση ασυμμετρίας του δικτύου διαπίστωσαν ότι προσαρμόζεται γρηγορότερα από το ECMP και το CONGA στην αποτυχία και ανακατανέμει το φορτίο στις συνδέσεις μέσα σε ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου. Η καινοτομία του HULA έγκειται στην ικανότητά του να κάνει κατανομή του φορτίου λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης περιλάμβαναν: *Flow Completion Time (FCT)*, *Link Utilization*. Στη συνέχεια, όταν ο αποτυχημένος σύνδεσμος επανέλθει, το HULA επιστρέφει γρήγορα στις αρχικές τιμές χρησιμοποίησης σε όλους τους συνδέσμους. Αυτό αποδεικνύει ότι το HULA είναι ανθεκτικό σε αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου και δείχνει επίσης ότι το φορτίο κατανέμεται σχεδόν εξίσου σε όλες τις διαθέσιμες διαδρομές σε κάθε δεδομένη στιγμή, ανεξάρτητα από την τοπολογία. Επίσης το HULA έχει την καλύτερη απόδοση λόγω της προληπτικής επιλογής μονοπατιών με επίγνωση της χρήσης, η οποία αποφεύγει την πίεση στη σύνδεση συμφόρησης. Αυτό βοηθά το HULA να επιτύχει 8 φορές καλύτερη απόδοση σε φορτίο δικτύου 60% σε σχέση με τους άλλους δύο μηχανισμούς, ενώ τα οφέλη του HULA είναι πιο εμφανή στον μεγάλο αριθμό μικρών ροών, όπου τα καταφέρνει 10 φορές καλύτερα από το ECMP σε φορτίο 60%. Ακόμη και για τις μεγάλες ροές, το HULA είναι 4 φορές καλύτερο από το ECMP σε φορτίο 60%.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του HULA είναι τα εξής:

1. *Αξιοποίηση Πληροφοριών*: Ο HULA χρησιμοποιεί πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα αξιοποίηση των διαδρομών σε κάθε κόμβο για να κατευθύνει την κυκλοφορία προς τις λιγότερο επιβαρυνμένες διαδρομές. Αυτό επιτρέπει την αποφυγή της συμφόρησης και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου.
2. *Αρχιτεκτονική Hop-by-hop*: Ο HULA λειτουργεί σε επίπεδο hop-by-hop, όπου κάθε κόμβος λαμβάνει αποφάσεις δρομολόγησης με βάση τις τοπικές πληροφορίες αξιοποίησης και τις πληροφορίες που λαμβάνει από τους γειτονικούς κόμβους. Αυτή η προσέγγιση βελτιώνει την ευελιξία και την ανθεκτικότητα του αλγορίθμου.

Ο HULA βασίζεται σε δύο κύριες διαδικασίες για την εξισορρόπηση του φορτίου [54], [74]:

- *Συλλογή Πληροφοριών Αξιοποίησης*: Κάθε κόμβος του δικτύου συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα αξιοποίηση των διαδρομών του και μοιράζεται αυτές τις πληροφορίες με τους γειτονικούς κόμβους μέσω μηνυμάτων ενημέρωσης.
- *Δρομολόγηση με Βάση την Αξιοποίηση*: Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων, χρησιμοποιεί τις πληροφορίες αξιοποίησης για να επιλέξει την επόμενη



διαδρομή που είναι η λιγότερο επιβαρυνόμενη. Αυτό επιτρέπει την αποδοτική κατανομή της κυκλοφορίας και τη μείωση της καθυστέρησης.

Με τον μηχανισμό HULA ασχολήθηκαν και οι Kulkarni κ.ά [75] εφαρμόζοντας τον σε SDN δίκτυο κέντρων δεδομένων τοπολογίας Fat-tree με 1000 κόμβους και τον ελεγκτή ONOS. Το σενάριο εξισορρόπησης φορτίου HULA, γραμμένο στο P4, βρίσκεται μεταξύ των hosts και του ελεγκτή για να διασφαλίσει την ομαλή εκτέλεση. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι το HULA ξεπερνά τους δύο περιορισμούς που αντιμετωπίζουν οι ECMP και CONGA, υποστηρίζοντας ότι αποτελεί μια λύση για την ενίσχυση της επεκτασιμότητας των κέντρων δεδομένων. Οι μεταγωγείς φύλλων στο HULA παρακολουθούν τη συμφόρηση σε όλες τις διαδρομές μέχρι να επιτευχθεί ο προορισμός μέσω του γειτονικού μεταγωγέα. Το HULA έχει την υψηλότερη απόδοση κατά μέσο όρο και τη χαμηλότερη απώλεια πακέτων 4% σε σύγκριση με άλλους μηχανισμούς.

Συμπερασματικά στα βασικά πλεονεκτήματα του HULA συγκαταλέγονται η μείωση της συμφόρησης με τη δυναμική κατανομή της κυκλοφορίας στις λιγότερο επιβαρυνόμενες διαδρομές, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και η μεγαλύτερη ευελιξία και ανθεκτικότητα, που επιτρέπουν στο δίκτυο να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Επομένως ο αλγόριθμος HULA προσφέρει μια καινοτόμο προσέγγιση για την εξισορρόπηση του φορτίου σε δίκτυα κέντρων δεδομένων με έμφαση στα προβλήματα συμμετρίας, βελτιώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία μέσω της χρήσης πληροφοριών αξιοποίησης και της αρχιτεκτονικής hop-by-hop.

#### *MP-HULA*

Τα συστήματα εξισορρόπησης φορτίου, CONGA και HULA, προτείνουν κατανεμημένες λύσεις που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν την αργή λήψη αποφάσεων των κεντρικών λύσεων για μεγάλο όγκο δεδομένων. Το HULA εκτελεί δρομολόγηση flowlet κατά μήκος διαδρομών με τη μικρότερη συμφόρηση, οι οποίες ενημερώνονται με βάση κατανεμημένη διερεύνηση, εκμεταλλευόμενο τις αναδύομενες δυνατότητες που παρέχει η προγραμματιστικότητα του επιπέδου δεδομένων P4. Επειδή το CONGA και το HULA δεν έχουν σχεδιαστεί για μεταφορά πολλαπλών διαδρομών, δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν αποτελεσματικά τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς πολλαπλών διαδρομών με αποτέλεσμα να έχουν χαμηλή απόδοση. Για τον λόγο αυτό οι Bennet κ.ά [76], το 2018, πρότειναν το *MP-HULA*, μια προσέγγιση εξισορρόπησης φορτίου στο επίπεδο δεδομένων που λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά πολλαπλών διαδρομών. Με τη χρήση του P4, οι μεταγωγείς MP-HULA αναλύουν τα πεδία επικεφαλίδας MPTCP και μπορούν έτσι να συσχετίζουν υποροές MPTCP με μια σύνδεση MPTCP. Αντί να παρακολουθεί μόνο τη λιγότερο χρησιμοποιούμενη

διαδρομή προς κάθε μεταγωγέα Top-of-Rack (ToR), ο προσαρμοστικός μηχανισμός ανίχνευσης MP-HULA διατηρεί κατάσταση συμφόρησης για τα καλύτερα  $k$  επόμενα άλματα ανά προορισμό. Στη συνέχεια, οι υποροές MPTCP χωρίζονται σε flowlets, που είναι μια αρκετά μεγάλη ομάδα πακέτων μιας υποροής MPTCP ώστε να αποφεύγεται η αναδιάταξη. Στη συνέχεια, ο μεταγωγέας MP-HULA χρησιμοποιεί την κατάσταση συμφόρησης για τα καλύτερα- $k$  επόμενα hops μαζί με τις πληροφορίες των υπο-ροών MPTCP για να δρομολογήσει διαφορετικές υπο-ροές MPTCP προς διαφορετικά επόμενα hops λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες συμφόρησης. Η αξιολόγησή κατέδειξε την αποτελεσματικότητα του MP-HULA στη μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης ροής μεταξύ 1,7x και 2,1x σε σύγκριση με το HULA.

Αναλυτικότερα ο κύριος σκοπός του άρθρου [76] ήταν η αξιολόγηση του μηχανισμού MP-HULA, που γνωρίζει και εκμεταλλεύεται την πολλαπλή μεταφορά (multipath transport). Ο MP-HULA σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις της δυναμικής κατανομής φορτίου σε δίκτυα που χρησιμοποιούν πολλαπλά μονοπάτια, εξασφαλίζοντας βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και αποφυγή της συμφόρησης. Οι συγγραφείς μελέτησαν τον τρόπο με τον οποίο η δυναμική χρήση πολλαπλών μονοπατιών σε συνδυασμό με προγραμματιζόμενα επίπεδα δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την κατανομή του φορτίου σε SDN DCN δίκτυα. Συγκεκριμένα, η έρευνα εστίασε στον τρόπο με τον οποίο ο μηχανισμός MP-HULA μπορεί να διαχειριστεί τη ροή των δεδομένων χρησιμοποιώντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από τα επίπεδα μεταφοράς και το δίκτυο, ώστε να λαμβάνονται αποφάσεις δρομολόγησης που αποτρέπουν τη συμφόρηση και βελτιστοποιούν την εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων και τον σύγκριναν με τους αλγόριθμους ECMP και HULA.

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τις εξής βασικές μετρικές για να αξιολογήσουν την απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού MP-HULA: *FCT*, *Link Utilization*. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός MP-HULA βελτιώνει σημαντικά την κατανομή φορτίου σε δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλά μονοπάτια, σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ειδικότερα, ο MP-HULA επιτυγχάνει υψηλότερο throughput και μικρότερη καθυστέρηση (latency), ενώ ταυτόχρονα μειώνει το ποσοστό απώλειας πακέτων και αποτρέπει τη συμφόρηση. Η χρήση προγραμματιζόμενων επιπέδων δεδομένων επιτρέπει τη λήψη πιο ακριβών και προσαρμοσμένων αποφάσεων δρομολόγησης, γεγονός που βελτιστοποιεί την εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου και ενισχύει την ανθεκτικότητα των συστημάτων μεταφοράς δεδομένων σε ασύμμετρες συνθήκες φόρτου.

Ο MP-HULA αποδείχθηκε ότι προσφέρει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους κατανομής φόρτου, όπως ο ECMP και ο CONGA, μειώνοντας

τη συμφόρηση και αυξάνοντας το throughput. Ο MP-HULA διακρίθηκε για την ικανότητά του να προσαρμόζεται στις αλλαγές της κατάστασης του δικτύου, καθώς επίσης και για τη μείωση της καθυστέρησης (latency) και της απώλειας πακέτων (packet loss). Η ενσωμάτωση της επίγνωσης του επιπέδου μεταφοράς (transport layer awareness) επιτρέπει πιο αποδοτική κατανομή της κυκλοφορίας, ιδίως σε περιβάλλοντα με πολλαπλά μονοπάτια, καθιστώντας το MP-HULA πιο αποδοτικό από τους ανταγωνιστικούς αλγορίθμους.

Επομένως τα δύο κύρια χαρακτηριστικά του MP-HULA είναι τα εξής:

1. *Εκμετάλλευση Πολλαπλών Διαδρομών*: Χρησιμοποιεί πληροφορίες αξιοποίησης για πολλαπλές διαδρομές αντί για μια μοναδική διαδρομή, επιτρέποντας τη διασπορά της κίνησης σε πολλές διαδρομές και την αποφυγή σημείων συμφόρησης.
2. *Δυναμική Προσαρμογή*: Συλλέγει πληροφορίες για την αξιοποίηση των διαδρομών και προσαρμόζει δυναμικά τις αποφάσεις δρομολόγησης βάσει των τρεχουσών συνθηκών του δικτύου.

Ο MP-HULA βασίζεται σε δύο βασικές διαδικασίες για τη βελτίωση της εξισορρόπησης φορτίου:

- *Τη συλλογή Πληροφοριών Αξιοποίησης*: Κάθε κόμβος στο δίκτυο συλλέγει πληροφορίες σχετικά με την αξιοποίηση των διαδρομών και διανέμει αυτές τις πληροφορίες στους γειτονικούς κόμβους μέσω μηνυμάτων ενημέρωσης. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν την τρέχουσα κίνηση, τη συμφόρηση και τη διαθεσιμότητα των διαδρομών.
- *Τη δρομολόγηση με Βάση την Αξιοποίηση*: Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων, χρησιμοποιεί τις πληροφορίες αξιοποίησης για να επιλέξει την καλύτερη διαδρομή ή διαδρομές. Οι αποφάσεις δρομολόγησης λαμβάνονται με βάση τις τρέχουσες συνθήκες, επιτρέποντας την αποδοτική κατανομή της κίνησης.

Βασικά πλεονεκτήματα του MP-HULA είναι τα εξής:

- *Βελτιωμένη Αξιοποίηση Πόρων*: Ο MP-HULA επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου μέσω της ταυτόχρονης χρήσης πολλαπλών διαδρομών, μειώνοντας τη συμφόρηση και αυξάνοντας την απόδοση.
- *Αυξημένη Αξιοπιστία*: Η εκμετάλλευση πολλαπλών διαδρομών αυξάνει την ανθεκτικότητα του δικτύου, καθώς η κίνηση μπορεί να ανακατευθυνθεί γρήγορα σε εναλλακτικές διαδρομές σε περίπτωση αποτυχίας.

Υπάρχουν όμως και κάποιες σημαντικές μειονεκτήματα που αφορούν στην :

- *Πολυπλοκότητα Διαχείρισης*: Η συλλογή και διαχείριση πληροφοριών για πολλαπλές διαδρομές αυξάνει την πολυπλοκότητα της υλοποίησης και της διαχείρισης του αλγορίθμου [75].
- *Κλίμακα Δικτύου*: Η αποτελεσματικότητα του MP-HULA μπορεί να επηρεαστεί από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του δικτύου, καθώς οι απαιτήσεις για τη συλλογή και την επεξεργασία πληροφοριών αυξάνονται.

Ο αλγόριθμος MP-HULA προσφέρει μια σημαντική βελτίωση στην εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα κέντρων δεδομένων SDN, επιτρέποντας την αποδοτική κατανομή της κίνησης μέσω της χρήσης πολλαπλών διαδρομών και της δυναμικής προσαρμογής στις συνθήκες του δικτύου.

#### *Weighted-ECMP*

Παρόλο που το HULA λύνει ορισμένα προβλήματα του CONGA με τη χρήση του μεταγωγέα P4, η στρατηγική επιλογής καλύτερης διαδρομής στο HULA επιλέγει και καταγράφει μόνο την καλύτερη διαδρομή, γεγονός που καθιστά εύκολη τη συμφόρησή της και χρησιμοποιεί ανιχνευτές που σπαταλούν εύρος ζώνης και επιδεινώνουν την απόδοση. Για την επίλυση των προβλημάτων του HULA και του κλασικού ECMP, οι Ye κ.ά [77] το 2018 πρότειναν ένα σταθμισμένο σύστημα εξισορρόπησης φορτίου πολλαπλών διαδρομών ίσου κόστους (*Weighted-ECMP*) σε δίκτυα κέντρων δεδομένων, που επιλέγει μια διαδρομή με σταθμισμένη πιθανότητα για να αποφύγει τη γρήγορη συμφόρηση μιας διαδρομής. Χρησιμοποίησαν το P4 για να προγραμματίσουν το *Weighted-ECMP* στο επίπεδο δεδομένων. Το P4 χαρακτηρίζεται από ανεξαρτησία από το πρωτόκολλο, αναδιαμόρφωση και δεν περιορίζεται από κανένα πρωτόκολλο ή υλικό, οπότε είναι κατάλληλο για την εκπλήρωση της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής και προσαρμόζεται γρήγορα στον αλγόριθμο. Στο *Weighted-ECMP*, κάθε μεταγωγέας φύλλου διατηρεί έναν πίνακα για την αποθήκευση της χρήσης όλων των μονοπατιών προς τους άλλους μεταγωγείς φύλλου και η κυκλοφορία αντιμετωπίζεται σε επίπεδο flowlets, τα οποία μπορούν να χωρίσουν μια ροή χωρίς να προκαλέσουν αναδιάταξη πακέτων. Μέσω της μετατροπής της χρησιμοποίησης σε βάρος, το *Weighted-ECMP* επιλέγει μια διαδρομή με σταθμισμένη πιθανότητα για ένα flowlet για να αποφύγει τη γρήγορη συμφόρηση της λιγότερο συμφορημένης διαδρομής. Όταν ο χρόνος μεταξύ των αφίξεων μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων στην ίδια ροή είναι μεγαλύτερος από ένα κατώφλι, τα επόμενα πακέτα μπορούν να θεωρηθούν ως νέα ροή. Επιπλέον, αντί να χρησιμοποιούνται ανιχνευτές ενθουλακώνονται οι πληροφορίες συμφόρησης της διαδρομής σε κανονική κίνηση, η οποία αυξάνει την ταχύτητα ενημέρωσης της κατάστασης καθώς αυξάνεται η φόρτωση του δικτύου.

Οι ερευνητές συνέκριναν την απόδοση των αλγορίθμων Weighted-ECMP, ECMP και HULA ελέγχοντας τον φόρτο εργασίας και τον χρόνο ολοκλήρωσης των ροών και στους τρεις αλγόριθμους για διάφορες συχνότητες δοκιμών. Για μικρές ροές προέκυψε ότι ο Weighted-ECMP έχει τις ίδιες επιδόσεις με τον ECMP, ενώ για μεγαλύτερες ροές ο αλγόριθμος Weighted-ECMP επιφέρει βελτιώσεις στον χρόνο ολοκλήρωσης των ροών.

Κύρια Χαρακτηριστικά του Weighted –ECMP:

1. *Εξισορρόπηση Φορτίου με Βάρη:* Ο Weighted-ECMP χρησιμοποιεί βάρη που σχετίζονται με την ικανότητα των διαδρομών, επιτρέποντας την κατανομή της κίνησης ανάλογα με την πραγματική ικανότητα της κάθε διαδρομής. Αυτό βοηθά στην αποφυγή της συμφόρησης σε διαδρομές με μικρότερη ικανότητα και εξασφαλίζει την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων.
2. *Δυναμική Προσαρμογή:* Τα βάρη των διαδρομών μπορούν να προσαρμοστούν δυναμικά με βάση την τρέχουσα κίνηση και τις συνθήκες του δικτύου. Αυτό επιτρέπει την αποδοτική αντιμετώπιση των μεταβαλλόμενων απαιτήσεων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου

Ο Weighted-ECMP λειτουργεί με την κατανομή του φορτίου στις διαθέσιμες διαδρομές με ίσο κόστος, χρησιμοποιώντας βάρη που αντιπροσωπεύουν την ικανότητα ή την προτεραιότητα της κάθε διαδρομής. Οι βασικές αρχές λειτουργίας [78] περιλαμβάνουν:

- *Υπολογισμό Βαρών:* Τα βάρη των διαδρομών υπολογίζονται με βάση διάφορους παράγοντες όπως η χωρητικότητα, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία. Οι διαδρομές με μεγαλύτερη ικανότητα ή χαμηλότερη καθυστέρηση λαμβάνουν μεγαλύτερα βάρη.
- *Δρομολόγηση με Βάρη:* Τα πακέτα δεδομένων δρομολογούνται στις διαδρομές με βάση τα υπολογισμένα βάρη, διασφαλίζοντας ότι η κίνηση κατανέμεται αναλογικά με την ικανότητα των διαδρομών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συναρτήσεις κατακερματισμού που λαμβάνουν υπόψη τα βάρη.

Βασικά πλεονεκτήματα είναι:

- *Βελτιωμένη Απόδοση:* Η κατανομή της κίνησης με βάση τα βάρη βελτιώνει την απόδοση του δικτύου, εξασφαλίζοντας ότι οι διαδρομές με μεγαλύτερη ικανότητα χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικά.
- *Αποφυγή Συμφόρησης:* Ο Weighted-ECMP βοηθά στην αποφυγή της συμφόρησης σε διαδρομές με μικρότερη ικανότητα, εξισορροπώντας το φορτίο σε όλο το δίκτυο.

Ο Weighted-ECMP αποτελεί έναν σημαντικό αλγόριθμο για την εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα SDN-DCN, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην απόδοση και την αξιοπιστία μέσω της χρήσης βαρών για την κατανομή της κίνησης.

### *P-ECMP (Predictive ECMP)*

Ο *Weighted-ECMP* που χρησιμοποιείται σήμερα στα κέντρα δεδομένων αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η αδυναμία προσαρμογής του στη δυναμική του δικτύου, γεγονός που τον καθιστά ευάλωτο στη συμφόρηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος *W-ECMP* βασίζει τις αποφάσεις προώθησής του σε στατικά εκχωρημένα βάρη συνδέσμων που υπολογίζονται με βάση τη χωρητικότητα εύρους ζώνης των συνδέσμων, χωρίς να λαμβάνει υπόψη πόση από αυτή τη χωρητικότητα χρησιμοποιείται ήδη κατά τη στιγμή της προώθησης. Αυτή η αδυναμία του αλγορίθμου *W-ECMP* μπορεί να υποβαθμίσει την απόδοση του δικτύου και τη συνολική χρήση των πόρων του δικτύου. Για να λύσουν τα παραπάνω προβλήματα οι Nepolo & Zodi [79] το 2021, πρότειναν ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης *Predictive Equal-Cost MultiPath (P-ECMP)* το οποίο βελτιώνει τις λειτουργίες του αλγορίθμου σταθμισμένης εξισορρόπησης φορτίου *W-ECMP*, προωθώντας ροές κυκλοφορίας σε λιγότερο συμφορημένες συνδέσεις με βάση υπολογισμένες προοπτικές συμφόρησης. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τα bytes που χάνονται για να μετρήσει το επίπεδο συμφόρησης στη σύνδεση μεταξύ των κόμβων πηγής και προορισμού. Η απώλεια πακέτων λαμβάνεται ως μέτρο συμφόρησης για την ανάθεση βαρών στους συνδέσμους. Στους συνδέσμους με τον μικρότερο αριθμό bytes που χάνονται αποδίδεται μεγαλύτερο βάρος. Στη συνέχεια, το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί αυτά τα βάρη συνδέσμων για τη δημιουργία πινάκων προώθησης που δίνουν προτεραιότητα στους συνδέσμους με τα μεγαλύτερα βάρη κατά την προώθηση των ροών κυκλοφορίας. Το πρωτόκολλο δοκιμάστηκε σε μια τοπολογία *fat-tree* 3 επιπέδων, η οποία προσφέρει ποικιλομορφία πολλαπλών διαδρομών. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης *P-ECMP* είχε σημαντικά καλύτερες επιδόσεις από το σταθμισμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης *W-ECMP*.

Με το πρόβλημα της ασυμμετρίας στη δρομολόγηση και κατανομή φορτίου σε περιβάλλοντα *SDN* κέντρων δεδομένων ασχολούνται και οι Vannini κ.ά [73], οι οποίοι προτείνουν και αυτοί έναν τρόπο για την επίλυση του προβλήματος της ασυμμετρίας μέσω της τεχνικής του *Flowlet Switching* το *LetFlow*. Το *LetFlow* απλά επιλέγει ένα μονοπάτι ομοιόμορφα τυχαία για κάθε flowlet, αφήνοντας στα flowlets να κάνουν τα υπόλοιπα. Κατανέμει το φορτίο δυναμικά και ισορροπημένα, αποφεύγοντας τα σημεία συμφόρησης. Μειώνει τον κίνδυνο για αναδιάταξη των πακέτων. Εξασφαλίζει ανθεκτικότητα και προσαρμοστικότητα σε αλλαγές και αποτυχίες στο δίκτυο. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη βέλτιστη εκμετάλλευση των διαθέσιμων διαδρομών και την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, ακόμη και όταν οι διαδρομές δεν είναι συμμετρικές.

Συνοψίζοντας τα flowlets είναι μια ισχυρή τεχνική για απλή, ανθεκτική εξισορρόπηση φορτίου παρουσία ασυμμετρίας του δικτύου. Η ικανότητα των flowlets να αλλάζουν αυτόματα μέγεθος με βάση τις συνθήκες κίνησης σε πραγματικό χρόνο στη διαδρομή τους, τους επιτρέπει να αποτελεσματικά να μετατοπίζουν την κυκλοφορία μακριά από τα πολυσύχναστα μονοπάτια, χωρίς να χρειάζονται ρητές πληροφορίες για τη συμφόρηση του μονοπατιού ή πολύπλοκους μηχανισμούς ανατροφοδότησης. Επιπλέον αναγκαία θεωρείται και η καθολική επίγνωση της συμφόρησης του δικτύου για την αντιμετώπιση της ασυμμετρίας.

### 3.4 Άλλες προσεγγίσεις

Η εξισορρόπηση φορτίου σε δίκτυα που καθορίζονται από λογισμικό, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί κρίσιμο πρόβλημα στον τομέα των SDN, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας τους. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί ποικίλοι αλγόριθμοι και προσεγγίσεις για την επίλυση αυτού του προβλήματος και έχουν γραφεί πολλές σχετικές εργασίες. Ο αλγόριθμος ECMP αποτελεί έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο εξισορρόπησης φορτίου, επιτρέποντας την αναδρομή σε πολλαπλούς δρομολογητές με ίσο κόστος μονοπατιού. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά περιβάλλοντα SDN για τη μείωση της συμφόρησης και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων. Διάφορες έρευνες έχουν γίνει για τη βελτίωση της δυναμικότητας του αλγορίθμου εξισορρόπησης φορτίου ECMP. Επίσης πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορους μηχανισμούς εξισορρόπησης φορτίου και τους συγκρίναν με τον ECMP. Η παρούσα ενότητα παρέχει μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας με εστίαση σε μελέτες σχετικές με τον μηχανισμό εξισορρόπησης φορτίου ECMP σε δίκτυα SDN-DCN και βελτιώσεις του ή προτεινόμενους νέους αλγόριθμους που συγκρίνονται με τον ECMP, με απώτερο σκοπό τη βαθύτερη κατανόησή τους.

Το άρθρο [56] των Liu κ.ά. είναι μία μελέτη που αφορά στη χρήση του SDN για τη βελτίωση της κατανομής φόρτου στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Οι συγγραφείς επιδιώκουν να προτείνουν μία υβριδική στρατηγική για την κατανομή φορτίου (BLEND) που να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο των παραδοσιακών όσο και των σύγχρονων προσεγγίσεων, αξιοποιώντας την τεχνολογία SDN. Στόχος τους είναι να βελτιώσουν την αποδοτικότητα, την κλιμάκωση και την αξιοπιστία των δικτύων κέντρων δεδομένων. Οι συγγραφείς επικεντρώθηκαν στη μελέτη της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης υβριδικής στρατηγικής σε σχέση με υπάρχουσες μεθόδους κατανομής φορτίου. Συγκεκριμένα, αξιολόγησαν πώς η στρατηγική αυτή επηρεάζει την απόδοση των DCNs σε διάφορες

συνθήκες φόρτου συγκρίνοντάς την με τον αλγόριθμο ECMP. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης στρατηγικής, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τις εξής κύριες μετρικές: *Throughput, Latency, Flow Completion Time* (Χρόνος Ολοκλήρωσης Ροής). Με την ανάλυση αυτών των μετρικών, οι συγγραφείς απέδειξαν ότι η προτεινόμενη στρατηγική βελτιώνει σημαντικά την απόδοση και την αξιοπιστία των DCNs και μειώνει την καθυστέρηση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους .

Επίσης το άρθρο [80] των Hwang & Tseng επικεντρώνεται σε μηχανισμούς κατανομής φορτίου και δρομολόγησης που βασίζονται σε SDN για την ενίσχυση της απόδοσης των DCNs. Ο κύριος σκοπός του άρθρου είναι η πρόταση και η ανάλυση ενός νέου μηχανισμού κατανομής φόρτου και δρομολόγησης για δίκτυα κέντρων δεδομένων, βασισμένο στην τεχνολογία SDN. Οι συγγραφείς επιδιώκουν να βελτιώσουν την απόδοση και την αποδοτικότητα των DCNs, χρησιμοποιώντας μια ευέλικτη και δυναμική προσέγγιση για τη διαχείριση των δικτυακών ροών. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν και μελέτησαν έναν μηχανισμό που συνδυάζει την κατανομή φορτίου και τη δρομολόγηση ροών δεδομένων, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που προσφέρει το SDN και υπολογίζοντας μια online τιμή δρομολόγησης ως κόστος διαδρομής (On Line Routing). Ειδικότερα, μελέτησαν πώς αυτή η προσέγγιση μπορεί να βελτιώσει την ισορροπία φορτίου και να μειώσει την πιθανότητα συμφόρησης στα δίκτυα των κέντρων δεδομένων. Ακολούθως συνέκριναν τον προτεινόμενο μηχανισμό κατανομής φόρτου με τον ECMP. Για τη δοκιμή και την αξιολόγηση του προτεινόμενου μηχανισμού, χρησιμοποιήθηκε ένα προσομοιωτικό περιβάλλον βασισμένο στο *Mininet με Fat Tree τοπολογία*, ενώ ο *Ryu controller* χρησιμοποιήθηκε για τη διαχείριση του δικτύου. Διάφορα σενάρια κυκλοφορίας φορτίου χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού σε σχέση με τους συγκριτικούς αλγόριθμους. Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μηχανισμού, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τις ακόλουθες μετρικές: *Throughput, Packet Loss Rate, Forwarding Information Base (FIB)*( βάση πληροφοριών προώθησης για την εύρεση του κατάλληλου ελεγκτή διασύνδεσης δικτύου εξόδου στον οποίο η διασύνδεση εισόδου πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο).

Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός, ο οποίος συνδυάζει την κατανομή φορτίου και τη δρομολόγηση με βάση το SDN, βελτιώνει σημαντικά την απόδοση των δικτύων των κέντρων δεδομένων. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνει υψηλότερο throughput και χαμηλότερο ποσοστό απώλειας πακέτων (packet loss), σε σύγκριση με τον ECMP. Επιπλέον, ο μηχανισμός αυτός παρέχει καλύτερη εξισορρόπηση του φορτίου, οδηγώντας σε πιο αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου και βελτιωμένη συνολική απόδοση του συστήματος.



Στην έρευνα [15] των Dewanto κ.ά δημιουργήθηκε μια εφαρμογή ECMP βασισμένη σε SDN που μετράει το διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε σύνδεσης πριν από την επιλογή μιας διαδρομής για τη μετάδοση κάθε κυκλοφορίας, κάνοντας έτσι κάθε κυκλοφορία να ανατίθεται στην λιγότερο απασχολημένη διαδρομή όσο το δυνατόν περισσότερο. Οι ερευνητές επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν ένα δίκτυο DCN με τη μορφή τοπολογίας *fat-tree*, που αποτελούνταν από 20 switches και 16 hosts με εύρος ζώνης σε όλες τις συνδέσεις τα 8 Mbps και τον *ελεγκτή Ryu*. Εκτέλεσαν δύο σενάρια, το πρώτο σενάριο είχε στόχο να δοκιμάσει την ικανότητα του προτεινόμενου σχήματος να επιλέγει την καλύτερη διαδρομή και την επίδρασή του στην ποιότητα των τιμών υπηρεσίας, ενώ το δεύτερο σενάριο στόχευε να μετρήσει την τυπική απόκλιση φορτίου για να δώσει μια ποσοτική μέτρηση της διαδικασίας εξισορρόπησης φορτίου. Ως παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν *η απόδοση, η καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων*. Το προτεινόμενο σχήμα αύξησε την απόδοση κατά 14,21% και μείωσε την καθυστέρηση κατά 99% σε σύγκριση με το τυπικό ECMP όταν προκύπτει συμφόρηση, και έχει 75,2% μικρότερη τυπική απόκλιση φορτίου σε σύγκριση με τον φορτωτή ισοροπίας round-robin.

Στην έρευνα τους [59] οι Zhang κ.ά μελέτησαν τους αλγορίθμους ECMP, OSPF (Open Shortest Path First) και πρότειναν τον *dynamic ECMP* σε SDN δίκτυο κέντρων δεδομένων πραγματοποιώντας δύο διαφορετικά πειράματα για να μετρήσουν και να συγκρίνουν την επίδοση τους υπολογίζοντας τη χρήση εύρους ζώνης (bandwidth utilization) αυτών των αλγορίθμων. Στον αλγόριθμο που προτείνουν, ορίζουν ένα κατώτατο όριο bandwidth utilization για όλες τις συνδέσεις και όταν αυτό ξεπερνιέται σε κάποια σύνδεση η ροή μεταφέρεται δυναμικά σε άλλη σύνδεση με μικρότερο bandwidth utilization. Με αυτόν τον δυναμικό προγραμματισμό βελτιώνεται η απόδοση του δικτύου. Πιο αναλυτικά χρησιμοποίησαν ένα δίκτυο με *τοπολογία fat-tree* με 20 switches και 16 hosts και επέλεξαν τον *Floodlight SDN controller*. Στο πρώτο σενάριο σύγκριναν τον ECMP με τον OSPF και στο δεύτερο τον ECMP με τον dynamic ECMP. Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου έδειξαν ότι ο ECMP έχει καλύτερη απόδοση από τον OSPF προσφέροντας καλύτερη εξισορρόπηση φορτίου. Ακολούθως τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου κατέδειξαν ότι ο προτεινόμενος δυναμικός ECMP αλγόριθμος έχει καλύτερη απόδοση, καθώς ρυθμίζει δυναμικά τη ροή στις συνδέσεις σύμφωνα με το bandwidth utilization των συνδέσεων.

Στο άρθρο τους [81] οι Hamdan κ.ά. προτείνουν μια βελτιωμένη τεχνική εξισορρόπησης φορτίου για δίκτυα SDN- DCN που ονομάζεται *DPLBAnt (data-plane LB technique based on Ant Colony)* και τη συγκρίνουν με τον ECMP. Ο κύριος σκοπός της εργασίας είναι η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου μέσω της εξισορρόπησης του φόρτου κυκλοφορίας στα

δίκτυα SDN, με έμφαση στον εντοπισμό και την αναδρομολόγηση των λεγόμενων *elephant flows* (ροές δεδομένων μεγάλης κλίμακας). Η προσέγγιση DPLBAnt επιδιώκει να μειώσει τη συμφόρηση που προκαλείται από αυτές τις μεγάλες ροές δεδομένων και να αυξήσει την αποδοτικότητα του δικτύου. Για τα πειράματά τους χρησιμοποίησαν το Mininet και τον SDN ελεγκτή Ryu. Για την αξιολόγηση της τεχνικής χρησιμοποιήθηκαν οι μετρικές: *packet loss*, *Throughput* και *Delay*. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η προτεινόμενη τεχνική υπερτερεί έναντι δημοφιλών προσεγγίσεων όπως το ECMP για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και ελαχιστοποιεί τη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και τη μέση απώλεια πακέτων.

Στο ίδιο μοτίβο οι συγγραφείς Begam κ.ά. [82] προτείνουν έναν αλγόριθμο εξισορρόπησης φορτίου *MRBS (Multiple Regression-Based Searching)* που ανιχνεύει τις διάφορες συνθήκες φορτίου μέσω της παρακολούθησης του εύρους ζώνης σε SDN κέντρα δεδομένων. Μετά την ανίχνευση της κίνησης και του φορτίου, ο προτεινόμενος αλγόριθμος MRBS παίζει ζωτικό ρόλο στην προώθηση του αιτήματος στους διακομιστές που έχουν τον μικρότερο αριθμό συνδέσεων και μέσω της διαδρομής με το μικρότερο κόστος με βάση το ελάχιστο κόστος σύνδεσης και τη μικρότερη ροή κίνησης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνεται με τον ECMP. Για την αξιολόγηση τους χρησιμοποιήθηκαν οι μετρικές: *Delay*, *Bandwidth*, *Server Utilization*. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του αλγορίθμου MRBS με χρήση του mininet και του ελεγκτή *Floodlight* αποδεικνύουν ότι βελτιώνει αποτελεσματικά τη χρήση του εύρους ζώνης, μειώνει την καθυστέρηση και εξισορροπεί τα φορτία των διακομιστών.

Έναν αποτελεσματικότερο τρόπο προγραμματισμού των ροών σε ένα SDN δίκτυο κέντρου δεδομένων διερευνούν και οι συγγραφείς Kadim κ.ά. [83]. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν και αξιολόγησαν τον αλγόριθμο *SDN-RA (SDN-Reschedule Algorithm)*, ο οποίος αναπρογραμματίζει και αναδρομολογεί δυναμικά τις ροές δεδομένων σε δίκτυα SDN με βάση την ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Ο στόχος ήταν να βελτιώσουν την απόδοση των κέντρων δεδομένων, αποφεύγοντας τη συγκέντρωση κυκλοφορίας σε ορισμένα σημεία και λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική κατάσταση του δικτύου και τις απαιτήσεις QoS. Για αυτό το λόγο παρουσιάζουν έναν βελτιστοποιημένο αλγόριθμο επαναπρογραμματισμού (SDN-RA) δοκιμάζοντάς τον μέσω του Mininet και μιας τοπολογίας *Fat-Tree* υπό τον ελεγκτή Ryu. Η αξιολόγηση των επιδόσεων του SDN-RA ξεπέρασε τόσο τον ECMP όσο και τον Hedera όσον αφορά τις μετρικές QoS, όπως: *Throughput*, *Delay*, *Link Utilization* και *Loss Rate*.

Για την αντιμετώπιση των πολύπλοκων προκλήσεων της διαχείρισης του φορτίου σε δίκτυα SDN-DCN, η έρευνα των συγγραφέων Narcisse κ.ά. [84] αναδεικνύει έναν καινοτόμο αλγόριθμο τον *FCOPPA (Flow Classification and Optimized Path Prediction Algorithm)*. Το

FCOPPA επιτρέπει τη δυναμική διαμόρφωση και σχεδιασμό των μεγάλων και μικρών ροών, εξασφαλίζοντας βελτιστοποιημένα μονοπάτια δρομολόγησης σύμφωνα με τις συνθήκες του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου επιβεβαιώνεται από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ένα *Mininet* περιβάλλον με τον ελεγκτή *RYU*, χρησιμοποιώντας ένα κέντρο δεδομένων *fat-tree* τοπολογίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αποδίδει καλύτερα στην επίτευξη υψηλότερων ποσοστών απόδοσης, χαμηλότερης καθυστέρησης και αποτελεσματικότερης εξισορρόπησης φορτίου από ότι στους συμβατικούς αλγορίθμους, όπως ο αλγόριθμος ECMP.

Οι ερευνητές Liu κ.ά. [85] πρότειναν σε μια νέα προσέγγιση εξισορρόπησης φορτίου που βασίζεται στην προώθηση μέσω θύρας για SDN δίκτυα κέντρων δεδομένων, η οποία βασίζεται στην προώθηση πακέτων μέσω θύρας *PFLBS* (*port-based forwarding*). Μελέτησαν τη συμπεριφορά της προτεινόμενης στρατηγικής εξισορρόπησης φορτίου σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους δρομολόγησης όπως είναι ο ECMP. Οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αλγορίθμων περιλάμβαναν: *Flow Completion Time*, *Throughput*, *Link Utilization*. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι το PFLBS μειώνει το μέσο χρόνο ολοκλήρωσης ροής, βελτιώνει την απόδοση μεγάλων ροών και καθιστά πλήρη χρήση της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου.

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικά σημεία των παραπάνω εργασιών στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1- Άρθρα για δυναμικούς αλγόριθμους εξισορρόπησης φορτίου

| Αναφορά                     |      | Αντικείμενο έρευνας                                                                                                                                                           | Αλγόριθμοι LB            | Χρησιμοποιούμενες τεχνικές |                |            | Μετρικές                                                        | Συμπεράσματα                                                                                                                                                    | Καινοτομία                                                                                                        |
|-----------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |      |                                                                                                                                                                               |                          | Περιβάλλον προσομοίωσης    | SDN Controller | Τοπολογία  |                                                                 |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   |
| Alizadeh, et al. (2014)     | [66] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της ασυμμετρίας στον ECMP                                                                                                                        | ECMP, CONGA              | OMNET++                    | -              | Leaf-Spine | Throughput, Flow Completion Time                                | 5 φορές καλύτερο χρόνο ολοκλήρωσης ροών από τον ECMP και καλύτερο throughput                                                                                    | CONGA: αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου με καθολική επίγνωση της συμφόρησης στο δίκτυο                            |
| Zhang, et al. (2014)        | [59] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων ασυμμετρίας που μπορεί να προκληθεί από τον στατικό ECMP, βελτίωση απόδοσης δικτύου                                                              | ECMP, OSPF, Dynamic ECMP | Mininet                    | FloodLight     | Fat Tree   | Bandwidth Utilization                                           | Ο προτεινόμενος dynamic ECMP αλγόριθμος έχει καλύτερη απόδοση, καθώς ρυθμίζει δυναμικά τη ροή στις συνδέσεις σύμφωνα με το bandwidth utilization των συνδέσεων. | Dynamic ECMP: Δυναμικός αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου ECMP .                                                   |
| Katta, et al. (2016)        | [54] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της ασυμμετρίας στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών                                                                | ECMP,HULA, CONGA         | Mininet , P4               | -              | Leaf-Spine | Flow Completion Time, Link utilization                          | Ο αλγόριθμος HULA υπερέχει σε σχέση με τους αλγορίθμους ECMP και CONGA, καθώς προσφέρει καλύτερη κατανομή της κυκλοφορίας.                                      | HULA: Αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου με προώθηση πακέτων στο επόμενο άλμα τοπικά σε κάθε μεταγωγέα (hop by hop) |
| Hwang, R & Tseng, H. (2016) | [80] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της ασυμμετρίας και της σύγκρουσης κατακερματισμού στον ECMP, βελτίωση απόδοσης του δικτύου, μείωση απώλειας πακέτων για μικρές και μεγάλες ροές | ECMP, OLR                | Mininet                    | Ryu            | Fat Tree   | Throughput, Packet Loss Rate, Forwarding Information Base (FIB) | Υψηλότερο throughput και χαμηλότερο ποσοστό απώλειας πακέτων (packet loss), σε σύγκριση με τον ECMP.                                                            | OLR: Αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου με online υπολογισμό κόστους διαδρομής                                      |

|                        |      |                                                                                                                                                                                  |                      |              |     |                 |                                              |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                |
|------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|-----|-----------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Benet, et al. (2018)   | [76] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της ασυμμετρίας στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών                                                                   | ECMP, MP-HULA, CONGA | Mininet , P4 | -   | Fat Tree        | Link Utilization, Flow Completion Time (FCT) | Το MP-HULA αποδείχθηκε ότι προσφέρει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους κατανομής φορτίου, όπως ο ECMP και ο CONGA, μειώνοντας τη συμφόρηση και βελτιώνοντας το FCT           | MP-HULA: Αλγόριθμος δυναμικής κατανομής φορτίου σε δίκτυα που χρησιμοποιούν πολλαπλά μονοπάτια |
| Ye, et al. (2018)      | [77] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της ασυμμετρίας στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών                                                                   | ECMP, W-ECMP, HULA   | Mininet ,P4  | -   | Leaf-Spine      | Workload, Flow Completion Time (FCT)         | Για μικρές ροές προέκυψε ότι ο Weighted-ECMP έχει τις ίδιες επιδόσεις με τον ECMP, ενώ για μεγαλύτερες ροές οι αλγόριθμοι Weighted-ECMP και HULA επιφέρουν βελτιώσεις στον χρόνο ολοκλήρωσης των ροών. | Weighted-ECMP: σταθμισμένο σύστημα ίσου κόστους εξισορρόπησης φορτίου πολλαπλών διαδρομών      |
| Dewanto, et al. (2018) | [15] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγκρουσης κατακερματισμού και της ασυμμετρίας που μπορεί να προκληθεί στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και μείωση της καθυστέρησης | ECMP, SDN-ECMP       | Mininet      | Ryu | Fat Tree        | Throughput, Packet Loss, Delay               | Η προτεινόμενη από τους ερευνητές εφαρμογή ECMP αύξησε σημαντικά την απόδοση, εκμηδένισε την απώλεια πακέτων και μείωσε σημαντικά την καθυστέρηση                                                      | SDN-based ECMP: Παραλλαγή του αλγόριθμου εξισορρόπησης φορτίου ECMP βασισμένος σε δίκτυα SDN   |
| Liu, et al (2019)      | [56] | Αντιμετώπιση του προβλήματος της σύγκρουσης κατακερματισμού στον ECMP, βελτίωση απόδοσης των μεγάλων ροών, μείωση καθυστέρησης των μικρών-μεσαίων ροών                           | ECMP, BLEND          | Mininet      | -   | Leaf-spine Tree | Throughput, Latency, Flow Completion Time    | Η προτεινόμενη στρατηγική βελτιώνει σημαντικά την απόδοση και την αξιοπιστία των DCNs και μειώνει την καθυστέρηση σε σύγκριση με τον ECMP                                                              | BLEND: Υβριδικός αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου                                              |
| Kadim, et al. (2020)   | [83] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγκρουσης                                                                                                                                      | ECMP, SDN-RA, HEDERA | Mininet      | Ryu | Fat Tree        | Throughput, Link Utilization,                | Η αξιολόγηση των επιδόσεων του SDN-RA δείχνει βελτίωση                                                                                                                                                 | SDN-RA: Αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου με βάση                                               |

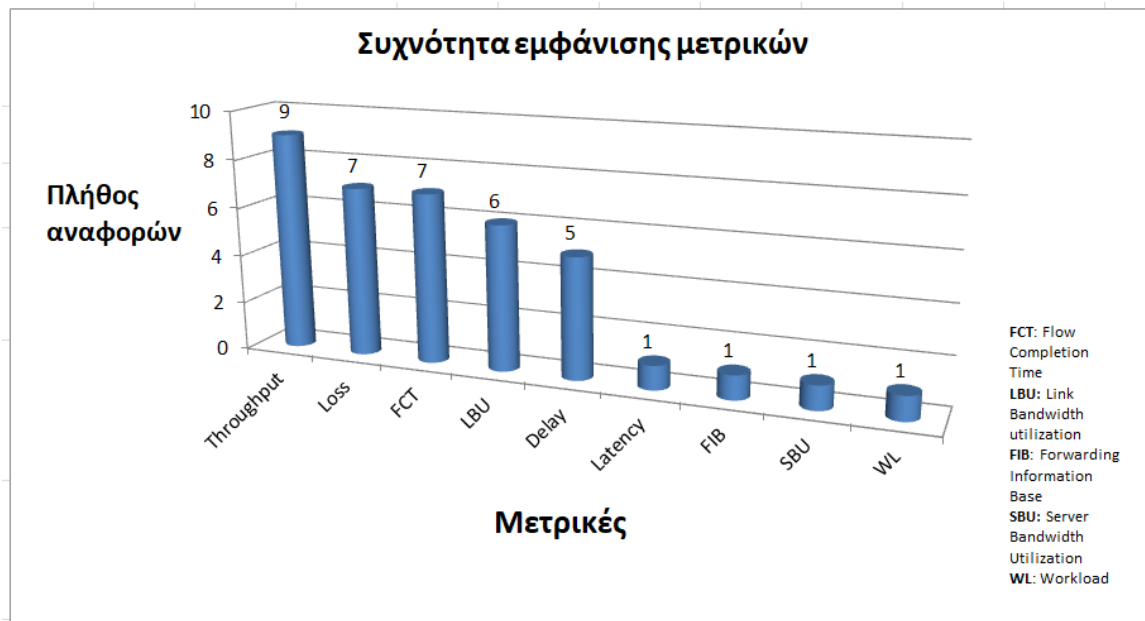
|                       |      |                                                                                                                                                                                                                             |                      |          |            |           |                                                    |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                       |
|-----------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------|------------|-----------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |      | κατακερματισμού και της ασυμμετρίας στον ECMP, βελτίωση απόδοσης του δικτύου, μείωση καθυστέρησης και απώλειας πακέτων                                                                                                      |                      |          |            |           | Delay, Loss Rate                                   | του δικτύου όσον αφορά την απόδοση και τη χρήση των συνδέσεων, καθώς και μείωση της καθυστέρησης και του ποσοστού απωλειών.                                                                                | την εκτίμηση της ζήτησης ροής, το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την καθυστέρηση σύνδεσης.                                                                 |
| Nepolo, et al. (2021) | [79] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της ασυμμετρίας στον ECMP και W-ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών                                                                                                   | ECMP, W-ECMP, P-ECMP | Mininet  | Ryu        | Fat Tree  | Throughput, Delay, Bandwidth                       | Το P-ECMP κατέγραψε βελτιωμένη throughput καθώς και βελτιωμένη κατανομή εύρους ζώνης μεταξύ των διαφόρων ροών κυκλοφορίας σε σύγκριση με το ECMP και το W-ECMP.                                            | Predictive-ECMP: Αλγόριθμος προώθησης ροών κυκλοφορίας σε λιγότερο συμφορημένες συνδέσεις με βάση εκτιμώμενες προοπτικές συμφόρησης.                  |
| Hamdan, et al. (2021) | [81] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγκρουσης κατακερματισμού και της ασυμμετρίας που μπορεί να προκληθεί στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών, μείωση της καθυστέρησης και της απώλειας πακέτων | ECMP, DPLBAnt        | Mininet  | Ryu        | Fat Tree  | Packet loss, Delay, Throughput                     | Η στρατηγική DPLBAnt απέδωσε καλύτερα σε σύγκριση με το ECMP. Συγκεκριμένα, πέτυχε υψηλότερο throughput, χαμηλότερο delay και μικρότερο packet loss, ειδικά σε δίκτυα με αυξημένη κίνηση από μεγάλες ροές. | DPLBAnt: Αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου σε SDN-DCN που εντοπίζει και δρομολογεί μεγάλες ροές βασιζόμενος στην τεχνική ACO (Ant Colony Optimization) |
| Liu, et al. (2021)    | [85] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγκρουσης κατακερματισμού και της ασυμμετρίας στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών                                                                           | ECMP, PFLBS          | OMNeT ++ | -          | Fat Tree  | Flow Completion Time, Throughput, Link Utilization | Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι το PFLBS μειώνει τον μέσο χρόνο ολοκλήρωσης ροής, βελτιώνει την απόδοση μεγάλων ροών και καθιστά πλήρη χρήση της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου.           | PFLBS: Αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου με δυναμικό χρονοπρογραμματισμό μεγάλων ροών με βάση την τρέχουσα διαθέσιμη χρήση της σύνδεσης.               |
| Begam, et al. (2022)  | [82] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγκρουσης                                                                                                                                                                                 | ECMP, MRBS           | Mininet  | FloodLight | Fat-Tree, | Delay, Bandwidth,                                  | Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει την καθυστέρηση και                                                                                                                                                     | MRBS: Αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου για τη                                                                                                         |

|                         |      |                                                                                                                               |                      |         |     |                        |                                  |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      |
|-------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------|-----|------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |      | κατακερματισμού και της ασυμμετρίας στον ECMP, βελτίωση απόδοσης του δικτύου                                                  |                      |         |     | Jellyfish , Leaf-Spine | Server Utilization               | τον χρόνο και παρουσιάζει καλύτερη χρήση του διακομιστή σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους                                                                                                      | βέλτιστη επιλογή εξυπηρετητή και διαδρομής δρομολόγησης                                              |
| Narcisse, et al. (2024) | [84] | Αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγκρουσης κατακερματισμού στον ECMP, βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και των μεγάλων ροών | ECMP, FCOPPA, HEDERA | Mininet | Ryu | Fat Tree               | Throughput, Latency, Packet Loss | Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αποδίδει καλύτερα στην επίτευξη υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης, χαμηλότερης καθυστέρησης και αποτελεσματικότερης εξισορρόπησης φορτίου από συμβατικούς αλγορίθμους, όπως ο ECMP. | FCOPPA: Αλγόριθμος έξυπνης εξισορρόπησης φορτίου των συνδέσεων στο δίκτυο μέσω της μηχανικής μάθησης |

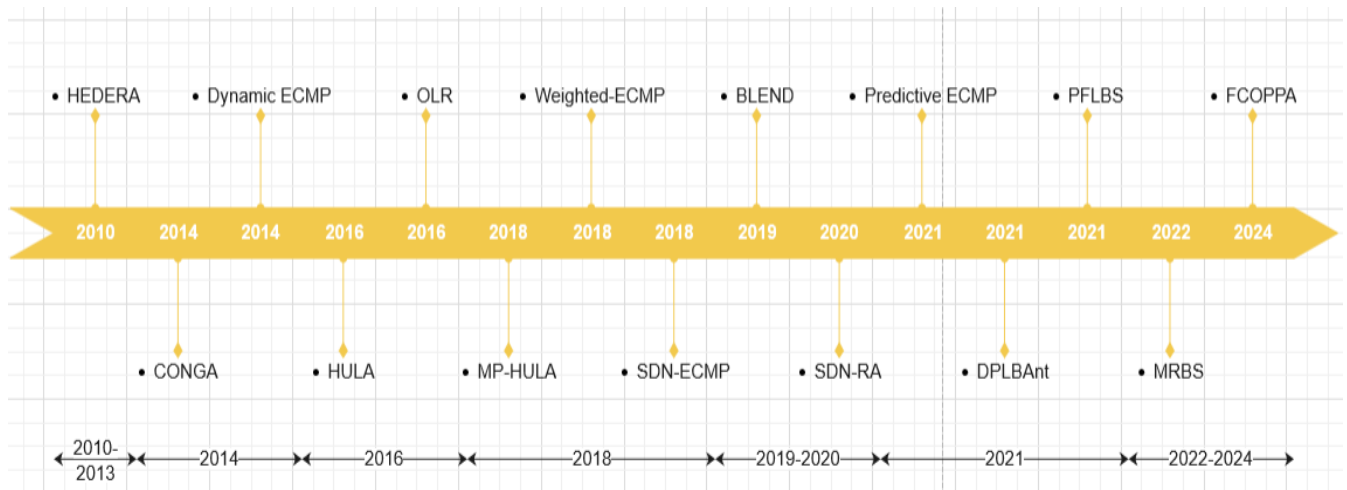
| Αναφορές                       |      | Throughput | Delay | Packet Loss/Packet Loss rate | Latency | Link Bandwidth | Flow Completion Time | Forwarding Information | Server Bandwidth | Workload |
|--------------------------------|------|------------|-------|------------------------------|---------|----------------|----------------------|------------------------|------------------|----------|
| Alizadeh, et al.               | [66] | •          |       |                              |         |                | •                    |                        |                  |          |
| Zhang, et al.                  | [59] |            |       |                              |         | •              |                      |                        |                  |          |
| Katta, et al.                  | [54] |            |       |                              |         | •              | •                    |                        |                  |          |
| Hwang, et al.                  | [80] | •          |       | •                            |         |                |                      | •                      |                  |          |
| Benet., et al.                 | [76] |            |       |                              |         | •              | •                    |                        |                  |          |
| Ye, et al.                     | [77] |            |       |                              |         |                | •                    |                        |                  | •        |
| Dewanto, et al.                | [15] | •          | •     | •                            |         |                |                      |                        |                  |          |
| Liu., et al                    | [56] | •          |       |                              | •       |                | •                    |                        |                  |          |
| Kadim, N., U. & Mohammed J. I. | [83] | •          | •     | •                            |         | •              |                      |                        |                  |          |
| Nepolo, et al.                 | [79] | •          | •     |                              |         | •              |                      |                        |                  |          |
| Hamdan et al.                  | [81] | •          | •     | •                            |         |                |                      |                        |                  |          |
| Liu et al.                     | [85] | •          |       |                              |         | •              | •                    |                        |                  |          |
| Begam, et al                   | [82] |            | •     |                              |         |                |                      |                        | •                |          |
| Narcisse, et al.               | [84] | •          |       | •                            | •       |                |                      |                        |                  |          |

Πίνακας 2- Μετρικές ανά άρθρο





Εικόνα 21: Συχνότητα εμφάνισης μετρικών



Εικόνα 22: Χρονολόγιο εμφάνισης βελτιώσεων LB για τον ECMP

### 3.5 Συζήτηση

#### 3.5.1 Διαπιστώσεις - Ευρήματα

Τα DCN, λόγω της εκθετικής ανάπτυξης των υπηρεσιών Διαδικτύου, του υπολογιστικού νέφους, των μεγάλων δεδομένων και της τεχνητής νοημοσύνης, έχουν αναδειχθεί σε αναντικατάστατη και κρίσιμη υποδομή για την υποστήριξη αυτής της διαρκώς αυξανόμενης τάσης. Ωστόσο, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά δίκτυα, οι απαιτήσεις στο DCN, για

παράδειγμα, το μεγάλο μέγεθος σε εξυπηρετητές, η τεράστια ποικιλομορφία εφαρμογών, η ανάγκη για υψηλή υπολογιστική ισχύ και η υψηλή αξιοπιστία, θέτουν σημαντικές προκλήσεις για την υποδομή και τη λειτουργία του [25]. Μια από τις βασικότερες λειτουργίες ενός DCN είναι να κατευθύνει την κυκλοφορία δεδομένων από τις πηγές τους στους προορισμούς τους. Το SDN στα δίκτυα κέντρων δεδομένων έρχεται να αλλάξει την έννοια των παραδοσιακών DCN αποσυνδέοντας τα επίπεδα ελέγχου και προώθησης με στόχο την επίτευξη καλύτερων παραμέτρων απόδοσης και την υλοποίηση της λειτουργίας της εξισορρόπησης φορτίου για την κυκλοφορία των δεδομένων [10].

Στις παραπάνω ενότητες της παρούσας εργασίας έγινε μια προσπάθεια να αναλυθούν τα βασικά προβλήματα που παρουσιάζει ο ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου ECMP στα δίκτυα κέντρων δεδομένων SDN και να παρουσιαστούν οι βασικότερες προτεινόμενες λύσεις για την αντιμετώπισή τους. Οι παραδοσιακές τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου στις συνδέσεις, όπως το ECMP εκχωρούν τις ροές σε διαδρομές βάσει στατικών μετρικών, με αποτέλεσμα οι ροές να μην κατανέμονται ομοιόμορφα, προκαλώντας συμφόρηση σε ορισμένα μονοπάτια και υποχρησιμοποίηση άλλων. Η έλλειψη ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού στους μεταγωγείς αποτελεί βασικό εμπόδιο, ιδιαίτερα στις πολύπλοκες τοπολογίες δικτύων που απαιτούν υψηλή ευελιξία. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, έχουν προταθεί αρκετές λύσεις, με κύρια χαρακτηριστικά την κεντρική διαχείριση των ροών, τη δυναμική προσαρμογή των διαδρομών και τη χρήση εναλλακτικών προσεγγίσεων για την αντιμετώπιση των συγκρούσεων κατακερματισμού:

#### 1. *HEDERA – Κεντριοποιημένος Έλεγχος και Δυναμική Επανεκχώρηση Ροών:*

Το σύστημα HEDERA, όπως προτείνεται από τους συγγραφείς του άρθρου [64], εστιάζει στον κεντρικό έλεγχο των μεγάλων ροών που δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις εύρους ζώνης. Το HEDERA παρακολουθεί τη χρήση των διαδρομών και τις αναθέτει δυναμικά με βάση τη διαθεσιμότητα των πόρων του δικτύου. Αυτό επιτρέπει την αποφυγή συμφόρησης, καθώς οι μεγάλες ροές κατευθύνονται προς μονοπάτια με λιγότερο φορτίο. Οι μικρότερες ροές, που δεν επιβαρύνουν σημαντικά το δίκτυο, διαχειρίζονται παραδοσιακά μέσω του ECMP, χωρίς την ανάγκη δυναμικού προγραμματισμού.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του HEDERA είναι η δυναμική επανεκχώρηση ροών. Όταν μια μεγάλη ροή ανιχνεύεται σε ένα μονοπάτι που έχει ήδη συμφόρηση, το σύστημα την ανακατευθύνει προς άλλη διαδρομή που διαθέτει ελεύθερο εύρος ζώνης, βελτιστοποιώντας έτσι την κατανομή της κίνησης. Η δυνατότητα αυτή βελτιώνει την

αποδοτικότητα των κέντρων δεδομένων και αυξάνει την ισορροπημένη χρήση των πόρων.

2. *Περιορισμοί των Παραδοσιακών Προσεγγίσεων Κατακερματισμού:*

Μια από τις βασικές προκλήσεις στις υπάρχουσες λύσεις, όπως επισημαίνεται από τους Xu κ.ά. [72], είναι ότι οι μεταγωγείς χρησιμοποιούν περιορισμένο αριθμό συναρτήσεων κατακερματισμού, συχνά βασιζόμενοι σε πολυώνυμα CRC (Cyclic Redundancy Check). Αυτό καθιστά δύσκολη τη δημιουργία ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού για διαφορετικούς μεταγωγείς στην ίδια διαδρομή, γεγονός που οδηγεί σε προβλήματα συσχέτισης και ανισορροπίας. Η χρήση τυχαίων αρχικών τιμών δεν επαρκεί, καθώς η γραμμική λειτουργία των CRC πολυωνύμων δεν μπορεί να διασπάσει αποτελεσματικά τη συσχέτιση των κατακερματισμών.

3. *Εναλλακτικές Προσεγγίσεις για Αντιμετώπιση του Hashing:*

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, έχουν προταθεί διάφορες εναλλακτικές λύσεις:

- ο *Χρήση Πρώτων Αριθμών:* Μια λύση που προτάθηκε από τους Xu κ.ά. [58] αφορά την εκμετάλλευση των πρώτων αριθμών για τη δημιουργία ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού. Οι πρώτοι αριθμοί χρησιμοποιούνται ως διαιρέτες στις καθολικές συναρτήσεις κατακερματισμού, μειώνοντας τις συσχετίσεις και βελτιώνοντας την κατανομή των ροών. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε μη ιεραρχικές τοπολογίες, όπως τα δίκτυα πλέγματος και τα WAN.
- ο *Ανασυνδυασμός Χρωμάτων στα Clos Networks:* Για τα δίκτυα τύπου Clos, προτείνεται μια τεχνική ανασυνδυασμού χρωμάτων, η οποία μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων ανεξάρτητων συναρτήσεων κατακερματισμού. Αυτό επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των ίδιων συναρτήσεων σε διαφορετικούς μεταγωγείς, διατηρώντας τη σταθερότητα του συστήματος και μειώνοντας τις συσχετίσεις.
- ο *Γραμμικότητα των Συναρτήσεων Κατακερματισμού:* Οι Zhang κ.ά. [57] προτείνουν την αξιοποίηση της γραμμικότητας των συναρτήσεων κατακερματισμού. Η πρόταση αυτή δίνει στους διαχειριστές δικτύου μεγαλύτερο έλεγχο στις διαδρομές που ακολουθούν οι ροές, επιτρέποντας την επανακατεύθυνση των ροών σε εναλλακτικά μονοπάτια με μεγαλύτερη ευελιξία. Χωρίς την ανάγκη ριζικών αλλαγών στο υλικό, η γραμμικότητα του

κατακερματισμού μπορεί να βελτιώσει την κατανομή των ροών και να αποφύγει τη συμφόρηση.

#### 4. Προσομοιώσεις και Επίδραση της Επιλογής Διαδρομής:

Οι προσομοιώσεις δικτύων με χρήση πληροφοριών τοπολογίας σε πραγματικό χρόνο, όπως προτείνουν οι Zhang κ.ά. [57], δείχνουν ότι η χρήση γραμμικών συναρτήσεων κατακερματισμού μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Η παρακολούθηση της κατανομής των ροών και η προσομοίωση της επίδρασης αποτυχιών σε διάφορα σημεία του δικτύου μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για τον βέλτιστο σχεδιασμό των μονοπατιών.

Συμπερασματικά οι παραδοσιακές τεχνικές κατακερματισμού που χρησιμοποιεί ο ECMP, ενώ προσφέρουν απλότητα και ευρεία εφαρμογή, υποφέρουν από περιορισμούς όσον αφορά την ομοιόμορφη κατανομή ροών στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Οι νεότερες προσεγγίσεις, που βασίζονται σε δυναμικό προγραμματισμό ροών, όπως το HEDERA, η χρήση πρώτων αριθμών και η γραμμικότητα των συναρτήσεων κατακερματισμού, προσφέρουν λύσεις για τη μείωση της ανισορροπίας φορτίου και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των δικτυακών πόρων.

Η επίλυση της ασυμμετρίας στη δρομολόγηση και την εξισορρόπηση φορτίου σε SDN δίκτυα κέντρων δεδομένων είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που αντιμετωπίζονται σε σύγχρονες αρχιτεκτονικές. Η ασυμμετρία, η οποία προκύπτει όταν το φορτίο κατανέμεται άνισα ανάμεσα σε πολλαπλές διαδρομές, μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των εφαρμογών, να αυξήσει την καθυστέρηση και να δημιουργήσει συμφόρηση στο δίκτυο. Οι παραδοσιακές μέθοδοι εξισορρόπησης φορτίου, όπως το ECMP, βασίζονται στη στατική κατανομή των ροών δεδομένων σε διαδρομές ίσου κόστους, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τη συμφόρηση που μπορεί να προκύψει. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανισόρροπη κατανομή του φορτίου, ιδίως όταν υπάρχουν ασύμμετρες διαδρομές, δημιουργώντας σημεία συμφόρησης και μειώνοντας την απόδοση του δικτύου. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, έχουν αναπτυχθεί νέες προσεγγίσεις που αξιοποιούν πληροφορίες για τη συμφόρηση του δικτύου και προσαρμόζουν δυναμικά τη δρομολόγηση των δεδομένων.

Η προσέγγιση των flowlets προσφέρει έναν αποδοτικό συμβιβασμό, διαχωρίζοντας τις ροές σε μικρότερες υποροές, οι οποίες μπορούν να δρομολογηθούν μέσω διαφορετικών διαδρομών, αποφεύγοντας την επαναταξινόμηση των πακέτων. Η επίγνωση της συμφόρησης είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για την αποτελεσματική εξισορρόπηση φορτίου. Στα παραδοσιακά σχήματα όπως το ECMP, δεν υπάρχει επίγνωση της συνολικής κατάστασης του δικτύου, με αποτέλεσμα να αγνοείται η συμφόρηση και να διανέμεται άνισα το φορτίο. Οι προσεγγίσεις

που χρησιμοποιούν καθολική επίγνωση της συμφόρησης προσφέρουν πολύ καλύτερη απόδοση, καθώς προσαρμόζουν δυναμικά τη δρομολόγηση με βάση τη συμφόρηση σε όλο το δίκτυο.

Ο αλγόριθμος CONGA, ο οποίος χρησιμοποιεί τα *flowlets* και την *καθολική επίγνωση της συμφόρησης* προσπαθεί να επιλύσει το πρόβλημα της ασυμμετρίας και της συμφόρησης. Το CONGA αποτελεί ένα κατανεμημένο σύστημα που λαμβάνει υπόψη την κατάσταση συμφόρησης σε διαδρομές εντός του δικτύου και επιτρέπει στους μεταγωγείς να κατανείμουν δυναμικά την κίνηση ανάλογα με τη συμφόρηση που παρατηρείται σε κάθε διαδρομή. Ο CONGA επιτυγχάνει χρόνο ολοκλήρωσης των ροών που είναι 5 φορές καλύτερος από τον ECMP και μπορεί να ανταποκρίνεται μέσα σε μικροδευτερόλεπτα όταν προκύπτει ασυμμετρία στο δίκτυο [66]. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα του CONGA, η υλοποίηση του είχε περιορισμούς. Χρειάστηκε προσαρμοσμένο υλικό για την εφαρμογή του, γεγονός που περιόριζε την ευελιξία και την επεκτασιμότητα του αλγορίθμου, κυρίως λόγω της ανάγκης για διατήρηση πληροφορίας συμφόρησης ανά διαδρομή στους μεταγωγείς.

Μια προσπάθεια για να ξεπεραστούν οι αδυναμίες του CONGA έγινε με τον αλγόριθμο HULA. Το HULA επιτρέπει στους διαχειριστές να προσαρμόζουν και να τροποποιούν τον αλγόριθμο χωρίς να απαιτείται νέο υλικό, ενώ προσφέρει εξαιρετική απόδοση σε DCN με τοπολογία Fat-tree. Το HULA επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη μέση απόδοση και τη χαμηλότερη απώλεια πακέτων, μόλις 4%, συγκριτικά με άλλους μηχανισμούς. Τα πλεονεκτήματά του είναι ιδιαίτερα εμφανή σε περιπτώσεις με μεγάλο αριθμό μικρών ροών, όπου ξεπερνά το ECMP κατά 10 φορές υπό φορτίο 60%. Ακόμη και για τις μεγάλες ροές, το HULA αποδίδει 4 φορές καλύτερα από το ECMP στο ίδιο επίπεδο φορτίου. Ο HULA βασίζεται σε δύο κύριες αρχές: τη συλλογή πληροφοριών αξιοποίησης και τη δρομολόγηση με βάση την αξιοποίηση. Κάθε κόμβος του δικτύου συγκεντρώνει και μοιράζεται πληροφορίες για την κατάσταση των διαδρομών του με τους γειτονικούς κόμβους, επιτρέποντας τη δυναμική ανακατανομή του φορτίου ανάλογα με τη συμφόρηση που παρατηρείται σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, το HULA αποφεύγει την τοπική συμφόρηση και κατανέμει την κυκλοφορία πιο αποτελεσματικά [54], [75].

Το MP-HULA είναι μια προσέγγιση εξισορρόπησης φορτίου που αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς πολλαπλών διαδρομών σε δίκτυα SDN, αντιμετωπίζοντας τα όρια των προηγούμενων αλγορίθμων όπως το HULA και το CONGA. Βασικά πλεονεκτήματα του MP-HULA είναι η ικανότητά του να εκμεταλλεύεται πολλαπλές διαδρομές, προσαρμόζοντας δυναμικά τις αποφάσεις δρομολόγησης με βάση τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και η χρήση του P4 για την προγραμματιστικότητα στο επίπεδο

δεδομένων. Χρησιμοποιεί πληροφορίες αξιοποίησης πολλαπλών διαδρομών, αποφεύγοντας τη συμφόρηση και επιτρέπει την κίνηση να διασπείρεται σε πολλές διαδρομές, ενισχύοντας την απόδοση και μειώνοντας το χρόνο ολοκλήρωσης των ροών. Συλλέγει και διαχειρίζεται πληροφορίες συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο και προσαρμόζει τις αποφάσεις δρομολόγησης δυναμικά, βελτιστοποιώντας την κατανομή του φορτίου. Ο MP-HULA απέδειξε ότι υπερτερεί σε απόδοση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους κατανομής φόρτου, όπως ο ECMP και ο CONGA, προσφέροντας μειωμένη συμφόρηση και αυξημένο throughput. Ξεχώρισε για την ικανότητά του να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου, ενώ συμβάλλει στη μείωση της καθυστέρησης (latency) και της απώλειας πακέτων (packet loss) [76].

Από την άλλη το Weighted-ECMP προσφέρει σταθμισμένη εξισορρόπηση φορτίου και επιτρέπει την κατανομή της κίνησης σε ίσου κόστους διαδρομές, βάσει βαρών που αντιπροσωπεύουν την πραγματική ικανότητα των διαδρομών. Χρησιμοποιεί το P4 για την εφαρμογή του, επιτρέποντας την προσαρμογή των αποφάσεων δρομολόγησης δυναμικά. Για μικρές ροές, ο Weighted-ECMP παρουσιάζει παρόμοιες επιδόσεις με τον ECMP. Ωστόσο, σε μεγαλύτερες ροές, ο Weighted-ECMP βελτιώνει τον χρόνο ολοκλήρωσης των ροών [77].

Το P-ECMP βελτιώνει τη λειτουργία του Weighted-ECMP, χρησιμοποιώντας προβλέψεις για τη συμφόρηση μέσω μετρήσεων απώλειας bytes. Δίνει βάρη στους συνδέσμους με βάση την πρόβλεψη της συμφόρησης και προωθεί την κίνηση στους λιγότερο συμφορημένους συνδέσμους. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης P-ECMP παρουσίασε σαφώς ανώτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το σταθμισμένο πρωτόκολλο W-ECMP [79]. Μια άλλη σημαντική προσέγγιση για την αντιμετώπιση της ασυμμετρίας του δικτύου είναι η τεχνική *Flowlet Switching* που προτείνεται στο *LetFlow*. Αυτή η τεχνική επιλέγει τυχαία διαδρομές για κάθε flowlet, εξασφαλίζοντας την κατανομή του φορτίου με δυναμικό και ισορροπημένο τρόπο [73].

Συμπερασματικά η καθολική επίγνωση της συμφόρησης του δικτύου αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την επιτυχία αυτών των τεχνικών εξισορρόπησης φορτίου, επιτρέποντας στα DCN να ανταποκρίνονται δυναμικά στις ανάγκες της κίνησης και να προσαρμόζονται στις συνεχείς αλλαγές του φόρτου εργασίας. Επίσης τα flowlets προσφέρουν μια ιδιαίτερα αποδοτική προσέγγιση για την εξισορρόπηση φορτίου, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι διαδρομές του δικτύου δεν είναι συμμετρικές. Με τη χρήση των flowlets, οι αλγόριθμοι όπως το CONGA και το LetFlow επιτυγχάνουν βελτιωμένη κατανομή φορτίου, μειώνοντας τη συμφόρηση και αυξάνοντας την απόδοση του δικτύου.

### 3.5.2 Αξιολόγηση επιδόσεων

O

Πίνακας 3 παρουσιάζει την απόδοση των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου που εξετάστηκαν σύμφωνα με τις προσομοιώσεις τους. Συνοψίζονται ορισμένοι κοινοί στόχοι αυτών των αλγορίθμων [13].

*Μείωση FCT:* Η καθυστέρηση είναι σημαντική για εφαρμογές που είναι χρονικά εξαρτημένες. Αυτές οι εφαρμογές συνήθως αλληλεπιδρούν άμεσα με τους τελικούς χρήστες και οι καθυστερήσεις τους επηρεάζουν έντονα την απόδοση των εφαρμογών. Έτσι, ορισμένα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν τη μέση ή την ουρά FCT των ροών και συνήθως στοχεύουν στις σύντομες ροές που τείνουν να μπλοκάρονται από μεγάλες ροές χωρίς προσεκτική διεύθυνση.

*Παροχή υψηλής απόδοσης (Throughput):* Οι μεγάλες ροές απαιτούν σταθερό και υψηλό εύρος ζώνης για τη μεταφορά των δεδομένων τους. Ορισμένα σχήματα, ιδίως τα συγκεντρωτικά, στοχεύουν στην ομοιόμορφη ανάθεση μεγάλων ροών στις διαθέσιμες διαδρομές για τη βελτίωση της απόδοσης και της χρήσης της ζεύξης.

*Τροποποίηση υλικού (Hardware Modification):* Τα σχήματα εντός του δικτύου τροποποιούν μεταγωγείς ή προσθέτουν εξοπλισμό υλικού στα δίκτυα κέντρων δεδομένων για να υλοποιήσουν τις αναθέσεις τους. Οι τροποποιήσεις απαιτούν υποστήριξη από τον κατασκευαστή και ενδέχεται να περιορίσουν την επεκτασιμότητα.

*Τροποποίηση κεντρικού υπολογιστή/λογισμικού (Host/Software Modification):* Για να αποφύγουν τις τροποποιήσεις υλικού, ορισμένα σχήματα μεταφέρουν τις υλοποιήσεις τους σε τελικούς κεντρικούς υπολογιστές ή στο λογισμικό τελικού χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εύκολο να αναπτυχθούν σε δίκτυα κέντρων δεδομένων. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί, δεδομένου ότι δεν υποστηρίζουν όλες οι εφαρμογές και τα κέντρα δεδομένων την αλλαγή του κεντρικού υπολογιστή ή την εικονικοποίηση.

*Αντίδραση στη συμφόρηση (Reaction to congestion):* Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από τα περισσότερα συστήματα για την αντιμετώπιση της συμφόρησης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους: reactive και proactive. Οι reactive αλγόριθμοι αναδρομολογούν ροές ή προγραμματίζουν νέες ροές μόνο όταν εντοπίζουν συμφόρηση. Αντίθετα, οι proactive αλγόριθμοι εξισορροπούν προσεκτικά το φορτίο για να αποφύγουν τη συμφόρηση.

Πίνακας 3 Αξιολόγηση επιδόσεων

| LB              | FCT | Throughput | Hardware Modification | Host/Software Modification | Reaction to Congestion |
|-----------------|-----|------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|
| HEDERA          |     | ✓          |                       |                            | reactive               |
| CONGA           | ✓   | ✓          | ✓                     |                            | proactive              |
| HULA            | ✓   | ✓          | ✓                     |                            | proactive              |
| MP-HULA         | ✓   | ✓          | ✓                     |                            | proactive              |
| Weighted-ECMP   | ✓   | ✓          |                       |                            | proactive              |
| Predictive-ECMP | ✓   | ✓          |                       | ✓                          | proactive              |

### 3.5.3 Στρατηγικές σχεδιασμού LB

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, συνοψίζονται οι σημαντικότερες πτυχές σχεδιασμού των μελετημένων μηχανισμών εξισορρόπησης φορτίου από πέντε οπτικές γωνίες.

*Centralized vs Distributed (Κεντριοποιημένη ή Κατανεμημένη):* Η πρώτη οπτική είναι η επιλογή κεντριοποιημένου ή κατανεμημένου συστήματος. Στα κεντριοποιημένα συστήματα ένας κεντρικός ελεγκτής λειτουργεί σε κεντρικό επίπεδο για να συλλέγει πληροφορίες σχετικά με την κυκλοφορία και τη χρήση των συνδέσεων σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, προσαρμόζει τη δρομολόγηση ή αναδιαμορφώνει τις διαδρομές ανάλογα με τις ανάγκες. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η δυνατότητα ακριβούς παρακολούθησης της κίνησης των εφαρμογών και της συμφόρησης στο δίκτυο. Ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί επίσης να βοηθήσει τους αλγόριθμους εξισορρόπησης φορτίου να εντοπίσουν έγκαιρα ασύμμετρες τοπολογίες λόγω αστοχίας συνδέσεων και να τροποποιήσουν τις αποφάσεις τους. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, το βασικό μειονέκτημα είναι ότι ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να γίνει σημείο συμφόρησης, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα, επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση.



Αντίθετα, οι καταναμεμημένες λύσεις βασίζονται σε μεταγωγείς ή hosts για τη λήψη αποφάσεων με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Ένας καταναμεμημένος αλγόριθμος εφαρμόζεται τοπικά, είτε σε έναν μεταγωγέα είτε σε έναν host, για τη διαχείριση της κυκλοφορίας, ενώ τα καταναμεμημένα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη συμφόρηση και τις αποτυχίες συνδέσεων. Αυτές οι λύσεις επεξεργάζονται την κυκλοφορία ταχύτερα και είναι πιο κατάλληλες για ανάπτυξη σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η έλλειψη πλήρους γνώσης για την κυκλοφορία και τη συνολική χρήση των συνδέσμων μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη εξισορρόπηση φορτίου, ενώ η έγκαιρη διαχείριση των αποτυχιών συνδέσεων παραμένει πρόκληση. Οι καταναμεμημένοι αλγόριθμοι συχνά βασίζονται σε ανιχνευτές ή μηνύματα επιβεβαίωσης (ACKs) για τη μετάδοση πληροφοριών συμφόρησης μεταξύ μεταγωγέων ή hosts. Παρόλο που αυτό βελτιώνει τη δυναμικότητα της διαχείρισης, συνεπάγεται επιπλέον επιβάρυνση, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την επεκτασιμότητα του συστήματος.

*Passive vs Proactive (Παθητική ή Ενεργητική):* Η δεύτερη οπτική αφορά στον τρόπο αντίδρασης στη συμφόρηση του δικτύου. Ένας παθητικός αλγόριθμος συλλέγει δεδομένα σχετικά με τη χρήση των συνδέσεων ή την κυκλοφορία στους μεταγωγείς και τους τελικούς χρήστες και στη συνέχεια προσαρμόζει τη δρομολόγηση για να εξισορροπήσει το φορτίο. Το πλεονέκτημα αυτών των αλγορίθμων είναι ότι ο προγραμματιστής χρειάζεται να διαχειριστεί μόνο ένα υποσύνολο των ροών, αντί να επεξεργάζεται κάθε ροή που περνάει από το δίκτυο. Για παράδειγμα, οι συγκεντρωτικές μέθοδοι μπορούν να εστιάσουν μόνο στις μεγάλες ροές, μειώνοντας έτσι την επιβάρυνση του ελεγκτή. Ωστόσο, το να περιορίζεται η διαχείριση σε ένα μέρος των ροών μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη απόδοση.

Σε αντίθεση με τους παθητικούς αλγορίθμους, οι ενεργητικοί (proactive) αλγόριθμοι δεν στοχεύουν συγκεκριμένες ροές. Αντίθετα, εγκαθιστούν προκαθορισμένους κανόνες εκ των προτέρων, με βάση τους οποίους επεξεργάζονται όλες τις ροές που φτάνουν στους μεταγωγείς. Οι ενεργητικές προσεγγίσεις επιτρέπουν την ταχεία ανάθεση μιας ροής στην τελική της διαδρομή, αποτρέποντας τη δημιουργία συμφόρησης, αντί να παρεμβαίνουν μόνο όταν αυτή εμφανίζεται. Παρόλα αυτά, το μειονέκτημα των ενεργητικών αλγορίθμων είναι η μειωμένη αποτελεσματικότητά τους σε ασύμμετρες τοπολογίες, όπου η στατική προσέγγιση δεν επαρκεί για την εξισορρόπηση του φορτίου.

*Local vs Global Congestion-Awareness (Τοπική ή Καθολική Επίγνωση της συμφόρησης):* Η τρίτη οπτική αφορά στη χρήση τοπικής ή καθολικής επίγνωσης της συμφόρησης. Οι αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου που βασίζονται σε τοπικές πληροφορίες συμφόρησης, όπως το μήκος των ουρών στις θύρες των μεταγωγέων, δεν απαιτούν αλλαγές στο υπάρχον

υλικό ή στα πρωτόκολλα του δικτύου. Αυτό τους καθιστά εύκολους στην υλοποίηση. Αυτά τα σχήματα αποδίδουν καλά σε συμμετρικές τοπολογίες δικτύου και όταν οι ροές έχουν ομοιόμορφο μέγεθος. Ωστόσο, σε περιπτώσεις ασύμμετρων τοπολογιών ή ροών με μεγάλη ποικιλία σε μέγεθος, η απόδοσή τους μπορεί να είναι χειρότερη ακόμη και από στατικές προσεγγίσεις, όπως το ECMP.

Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν καθολικές πληροφορίες συμφόρησης βασίζονται στη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη χρήση των συνδέσεων και την κυκλοφορία του δικτύου, είτε μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή είτε με τη χρήση κατανεμημένων μηχανισμών που μεταφέρουν δεδομένα συμφόρησης μεταξύ μεταγωγέων και χρηστών. Αυτή η καθολική επίγνωση θεωρείται κρίσιμη για την εξισορρόπηση φορτίου, ειδικά σε ασύμμετρες τοπολογίες και περιβάλλοντα με έντονες διακυμάνσεις κυκλοφορίας, όπου οι τοπικές πληροφορίες δεν αρκούν και μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλότερη απόδοση.

Η συλλογή καθολικών δεδομένων συμφόρησης, ωστόσο, είναι απαιτητική και δαπανηρή στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Στις συγκεντρωτικές προσεγγίσεις, ένας κεντρικός ελεγκτής συλλέγει πληροφορίες αλλά συνήθως έχει μεγάλο χρόνο απόκρισης, με αποτέλεσμα η συμφόρηση να έχει πιθανόν εξαφανιστεί πριν δράσει το σύστημα. Τα κατανεμημένα σχήματα, αντίθετα, βασίζονται σε ανιχνευτές που διανέμουν πληροφορίες συμφόρησης σε καθολικό επίπεδο, παρέχοντας πιο άμεση και έγκαιρη ανατροφοδότηση.

*In-Network vs Host Based (Εντός δικτύου ή χρηστών):* Η τέταρτη οπτική αφορά το που θα εφαρμοστεί η τεχνική εξισορρόπησης φορτίου. Τα σχήματα εξισορρόπησης φορτίου που υλοποιούνται εντός του δικτύου λειτουργούν στο εσωτερικό του δικτύου και όχι στο επίπεδο μεταφοράς που αφορά τους τελικούς χρήστες. Επειδή τα πρωτόκολλα μεταφοράς στους τελικούς χρήστες είναι ήδη πολύπλοκα, τα σχήματα που βασίζονται στο δίκτυο αποφεύγουν να επιβαρύνουν περαιτέρω την πολυπλοκότητά τους. Παρόλα αυτά, αυτά τα σχήματα απαιτούν τη μέτρηση των πακέτων και τον υπολογισμό των ροών όταν χρειάζονται πληροφορίες για την κίνηση των εφαρμογών, γεγονός που συνεπάγεται επιπλέον κόστος.

Αντίθετα, τα σχήματα που βασίζονται στους χρήστες έχουν το πλεονέκτημα ότι αντλούν απευθείας δεδομένα κίνησης από τις εφαρμογές που εκτελούνται στους hosts. Χωρίς να περιορίζονται από τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική του δικτύου, μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικά δίκτυα και μεγαλύτερες τοπολογίες. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι αυξάνουν την πολυπλοκότητα της στοίβας μεταφοράς στους τελικούς χρήστες και συνεπάγονται περισσότερα γενικά έξοδα. Επιπλέον, ορισμένες εφαρμογές στα

κέντρα δεδομένων αποφεύγουν να περνούν μέσω του κεντρικού πυρήνα του δικτύου, καθιστώντας τη χρήση αυτών των αλγορίθμων πρακτικά αδύνατη σε τέτοιες περιπτώσεις.

*Per-Packet vs Per-Flow (ανά πακέτο ή ανά ροή)*: Η τελευταία οπτική αφορά στον τρόπο ανάλυσης της δρομολόγησης των δεδομένων. Οι μηχανισμοί εξισορρόπησης φορτίου που λειτουργούν σε επίπεδο πακέτου επιλέγουν γρήγορα μια κατάλληλη διαδρομή για κάθε πακέτο ξεχωριστά. Ωστόσο, όταν οι καθυστερήσεις μεταξύ των διαθέσιμων διαδρομών διαφέρουν σημαντικά, μπορεί να προκύψει αναδιάταξη των πακέτων. Αυτή η μέθοδος είναι υπολογιστικά απαιτητική, καθώς απαιτεί επεξεργασία για κάθε πακέτο. Από την άλλη πλευρά, οι μηχανισμοί εξισορρόπησης φορτίου σε επίπεδο ροής εκχωρούν ολόκληρη τη ροή σε μια συγκεκριμένη διαδρομή και γενικά δεν αλλάζουν τη διαδρομή της πριν αυτή ολοκληρωθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή αναδιάταξης πακέτων. Ωστόσο, στις υποδομές κέντρων δεδομένων, το μέγεθος των ροών μπορεί να διαφέρει πολύ, με τις μεγάλες ροές να μεταφέρουν τη μεγαλύτερη ποσότητα δεδομένων. Οι μέθοδοι εξισορρόπησης φορτίου ανά ροή δεν επιτυγχάνουν ιδανική κατανομή φορτίου, καθώς δεν μπορούν να σπάσουν τις ροές σε μικρότερα μέρη για καλύτερη διαχείριση.

Για να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ αποφυγής αναδιάταξης πακέτων και υψηλής απόδοσης, έχουν προταθεί μέθοδοι όπως τα flowlets (υποροές). Ένα flowlet αποτελεί ένα υποσύνολο πακέτων που προέρχονται από την ίδια ροή. Τα flowlets ορίζονται με βάση μια τιμή χρονικής διακοπής, που αντιπροσωπεύει το ελάχιστο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων flowlets. Χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση, κάθε flowlet μπορεί να δρομολογηθεί μέσω διαφορετικού μονοπατιού, χωρίς να προκύψει αναδιάταξη πακέτων, ενώ παρέχει πιο ευέλικτο και λεπτομερές χρονοπρογραμματισμό σε σύγκριση με τη διαχείριση ολόκληρων ροών.

#### **3.5.4 Περιορισμοί- Εφαρμογές- Επιπτώσεις της έρευνας**

Ένας βασικός περιορισμός της παρούσας εργασίας είναι ότι διερευνήθηκαν μόνο δύο βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο ECMP αναλύοντας άρθρα που βασίζονται σε ελέγχους που έγιναν για δυο ειδών τοπολογίες Fat Tree και Leaf-spine. Η εστίαση στις τυπικές λύσεις του ECMP μπορεί να περιορίσει την κατανόηση πιο καινοτόμων προσεγγίσεων που προσπαθούν να λύσουν τα προβλήματα του ECMP. Η μέτρηση της απόδοσης του ECMP μπορεί να είναι σύνθετη, καθώς οι επιπτώσεις του εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος των ροών δεδομένων, η τοπολογία του δικτύου και οι δυναμικές του φόρτου. Ο προσδιορισμός των μεταβλητών που επηρεάζουν το αποτέλεσμα μπορεί να είναι δύσκολος.

Εφαρμογές :

Παρόλα αυτά η ανάλυση του ECMP βοηθά στην κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τη δρομολόγηση στα κέντρα δεδομένων, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διαχείριση του φορτίου και την αποφυγή συμφόρησης σε δίκτυα με μεγάλες ταχύτητες. Επίσης η εργασία εξετάζοντας τη συμπεριφορά του ECMP σε μοντέρνα περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις, όπου η αποδοτικότητα της δρομολόγησης είναι κρίσιμη για την ομαλή λειτουργία του συστήματος προσφέρει βαθύτερη κατανόηση στη λειτουργία και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η χρήση του στα κέντρα δεδομένων. Επιπλέον διερευνώντας εναλλακτικές λύσεις στον ECMP για τη βελτίωση της κατανομής του φόρτου, όπως αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τη συμφόρηση ή χρησιμοποιούν δυναμικά χαρακτηριστικά για προσαρμοστική δρομολόγηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη σωστή λειτουργία των δικτύων κέντρων δεδομένων.

Επιπτώσεις :

Με την παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να παρουσιαστούν τα εγγενή προβλήματα του ευρέως χρησιμοποιούμενου αλγόριθμου εξισορρόπησης φορτίου ECMP σε δίκτυα SDN DCN, όπως η ανισομερής κατανομή του φορτίου, η αδυναμία προσαρμογής σε δυναμικές συνθήκες δικτύου και η αγνόηση της συμφόρησης. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για την κατανόηση των ορίων της τρέχουσας τεχνολογίας. Επίσης η διερεύνηση των προβλημάτων του ECMP μπορεί να οδηγήσει σε προτάσεις για νέες λύσεις που θα βελτιώνουν την αποδοτικότητα της δρομολόγησης.

### **3.5.5 Πρωτοτυπία –Αξία**

Η παρούσα έρευνα μπορεί να συμβάλλει προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών εξισορρόπησης φορτίου σε SDN κέντρα δεδομένων. Καταδεικνύοντας ότι ο ECMP δεν είναι πλέον επαρκής για τις ανάγκες των σύγχρονων δικτύων, αυτό μπορεί να προωθήσει την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων αλγορίθμων δρομολόγησης. Επιπλέον οι λύσεις που προκύπτουν από την ανάλυση του ECMP μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα των δικτύων, μειώνοντας τη συμφόρηση και εξισορροπώντας καλύτερα το φορτίο σε δίκτυα με μεγάλες απαιτήσεις σε bandwidth. Επίσης μπορεί να βελτιώσουν τον τρόπο λειτουργίας της δρομολόγησης και να μειώσουν το κόστος λειτουργίας των κέντρων δεδομένων, καθώς η καλύτερη αξιοποίηση των υπαρχόντων πόρων σημαίνει λιγότερη ανάγκη για αλλαγές στις υποδομές και λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

#### 4. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Η εξισορρόπηση φορτίου αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στα δίκτυα SDN κέντρων δεδομένων, καθώς εξασφαλίζει τη βέλτιστη αξιοποίηση των δικτυακών πόρων και τη μείωση της συμφόρησης. Οι αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου, τόσο στατικοί όσο και δυναμικοί, έχουν αναλυθεί για να καλύψουν διαφορετικές ανάγκες και περιπτώσεις. Οι στατικοί αλγόριθμοι, όπως ο Random, Round Robin και Weighted Round Robin, προσφέρουν απλότητα στην εφαρμογή αλλά περιορίζονται σε περιβάλλοντα με χαμηλή ευελιξία. Αντίθετα, οι δυναμικοί αλγόριθμοι, όπως το ECMP, CONGA, Weighted ECMP, HULA, MP-HULA παρέχουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα και καλύτερη διαχείριση της κυκλοφορίας σε σύνθετα δίκτυα.

Παρόλο που ο αλγόριθμος ECMP χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της απλότητας και της δυνατότητας για κατανομή κίνησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών με ίσο κόστος, παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως οι συγκρούσεις των συναρτήσεων κατακερματισμού και η ασυμμετρία στη δρομολόγηση. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα και να οδηγήσουν σε ανισοκατανομή της κίνησης. Για την αντιμετώπιση των συγκρούσεων κατακερματισμού και της ασυμμετρίας, προτείνονται βελτιώσεις στις τεχνικές κατακερματισμού και στη δρομολόγηση μέσω της δυναμικής παρακολούθησης και κατανομής των μεγάλων ροών και τη γραμμικότητα των συναρτήσεων κατακερματισμού και μέσω του βαθμού ανάλυσης της δρομολόγησης των δεδομένων και την επίγνωση της συμφόρησης του δικτύου. Η παρούσα έρευνα παρέχει μια εκτενή ανάλυση των υπαρχόντων αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου και προτείνει τρόπους βελτίωσης της απόδοσης του ECMP σε δίκτυα SDN-DCN. Οι διαπιστώσεις αυτές συμβάλλουν στην περαιτέρω βελτίωση της τεχνολογίας SDN, υποδεικνύοντας περιοχές όπου μπορεί να γίνει πρόοδος.

Η μελλοντική έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί περαιτέρω στη βελτιστοποίηση των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου για περιβάλλοντα με μεγάλη κίνηση και πολυπλοκότητα όπως είναι τα DCN, στη διερεύνηση νέων τεχνικών για την επίλυση των προβλημάτων κατακερματισμού και ασυμμετρίας, μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης, στην αξιολόγηση των αλγορίθμων σε διαφορετικά σενάρια και συνθήκες, για να επιβεβαιωθούν τα ευρήματα και να εφαρμοστούν σε πραγματικά περιβάλλοντα. Ένας ακόμα τομέας που θα μπορούσε να εξεταστεί είναι η ενσωμάτωση παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στον αλγόριθμο ECMP, έτσι ώστε η κίνηση να κατανέμεται όχι μόνο με βάση το κόστος των μονοπατιών, αλλά και τις απαιτήσεις QoS, όπως καθυστέρηση και jitter. Για παράδειγμα, για

ροές με διαφορετικές προτεραιότητες, πρέπει να διατεθεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης στις ροές υψηλής προτεραιότητας για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις τους. Έτσι, ο τρόπος επίτευξης διαφορετικών στόχων βελτιστοποίησης ή ακόμη και η επίτευξη πολλών στόχων βελτιστοποίησης αποτελούν μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις. Εκτός αυτού, τα σχήματα εξισορρόπησης φορτίου υποθέτουν γενικά ότι η συμφόρηση των ροών βρίσκεται στο δίκτυο. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές, το σημείο συμφόρησης ορισμένων ροών βρίσκεται στο επίπεδο εφαρμογών που ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων των εφαρμογών είναι βραδύτερος από την ταχύτητα του δικτύου. Έτσι, θα πρέπει να έχουμε πιο γενικές εκτιμήσεις για το δίκτυο και να σχεδιάζουμε σχήματα εξισορρόπησης φορτίου για μια μεγάλη ποικιλία ροών. Επιπλέον ο σχεδιασμός μελλοντικών συστημάτων εξισορρόπησης φορτίου θα πρέπει να προσαρμόζεται σε ασύμμετρα σενάρια με χαμηλή πολυπλοκότητα. Για παράδειγμα, μπορούμε να σχεδιάσουμε κατανεμημένα συστήματα που δεν χρειάζεται να βασίζονται σε ανατροφοδότηση για την ανίχνευση συμφόρησης διαδρομής. Στην πραγματικότητα, η χρήση των flowlet προσπάθησε να λύσει αυτό το πρόβλημα. Διαπιστώνεται επομένως ότι το κενό του flowlet μπορεί να αξιοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμφόρησης της διαδρομής. Με αυτό τον τρόπο, η μελλοντική εργασία θα μπορούσε να εμβαθύνει στη βελτίωση και στην εξέλιξη του ECMP, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη εξισορρόπηση φορτίου και την αντιμετώπιση των προκλήσεων που ανακύπτουν σε σύγχρονα δίκτυα κέντρα δεδομένων SDN.

## Βιβλιογραφία

- [1] [1] Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(1), 14-76.
- [2] Nunes, B. A. A., Mendonca, M., Nguyen, X. N., Obraczka, K., & Turletti, T. A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(3), 1617-1634.
- [3] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., & Turner, J. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, 38(2), 69-74.
- [4] Feamster, N., Rexford, J., & Zegura, E. The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(2), 87-98, 2014.
- [5] Akyildiz, I. F., Lee, A., Wang, P., Luo, M., & Chou, W. A Roadmap for Traffic Engineering in SDN-OpenFlow Networks. *Computer Networks*, 71, 1-30, 2014.
- [6] Lara, A., Kolasani, A., & Ramamurthy, B. Network Innovation using OpenFlow: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 493-512, 2014.
- [7] Jain, R., & Paul, S. Network Virtualization and Software Defined Networking for Cloud Computing: A Survey. *IEEE Communications Magazine*, 51(11), 24-31, 2013.
- [8] Scott-Hayward, S., O'Callaghan, G., & Sezer, S. SDN Security: A Survey. 2013 *IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS)*, 1-7.
- [9] Samaan, S. S., & Jeiad, H. A. (2023). A Review on Utilizing Big Data Techniques for Performance Improvement in Software Defined Networking. *IRAQI JOURNAL OF COMPUTERS, COMMUNICATIONS, CONTROL AND SYSTEMS ENGINEERING*, 23(3).

- [10] Ali, T. E., Morad, A. H., & Abdala, M. A. (2018). Load balance in data center SDN networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(5), 3086-3092.
- [11] 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.
- [12] Zakia, U., & Yedder, H. B. (2017, October). Dynamic load balancing in SDN-based data center networks. In *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)* (pp. 242-247). IEEE.
- [13] Zhang, J., Yu, F. R., Wang, S., Huang, T., Liu, Z., & Liu, Y. (2018). Load balancing in data center networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3), 2324-2352.
- [14] Haile, G. B., & Zhang, J. (2021). Dynamic load balancing algorithm in SDN-based data center networks. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10.
- [15] Dewanto, et al. Improved Load Balancing on Software Defined Network-based Equal Cost Multipath Routing in Data Center Network, Jurnal InfotelVol.10 No.3 August 2018, <https://doi.org/10.20895/infotel.v10i3.379>
- [16] Yuanhong Huo, Xiaoyang Li, Wei Wang, and Dake Liu. High performance table-based architecture for parallel crc calculation. In *The 21st IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [17] 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).
- [18] Karakus, M. & Durresi, A. ``A survey: Control plane scalability issues and approaches in software-defined networking (SDN)," *Comput. Netw.*, vol. 112, pp. 279\_293, Jan. 2016.
- [19] Chou, L.-D. , Yang, Y.-T., Hong, Y.-M., Hu, J.-K. & Jean, B., ``A geneticbased load balancing algorithm in OpenFlow network," in *Advanced Technologies, Embedded and Multimedia for Human-Centric Computing*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014, pp. 411\_417.
- [20] Vaughan-Nichols, S. J. , ``OpenFlow: The next generation of the network?" ,*Computer*, vol. 44, no. 8, pp. 13\_15, 2011



- [21] Alhilali, A. H., & Montazerolghaem, A. (2023). Artificial intelligence based load balancing in SDN: A comprehensive survey. *Internet of Things*, 22, 100814.
- [22] Mckeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., et al., "OpenFlow: enabling innovation in campus networks", *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 69-74, 2008.
- [23] Ke, C. H., & Hsu, S. J. (2020). Load balancing using P4 in software-defined networks. *Journal of Internet Technology*, 21(6), 1671-1679.
- [24] Bosshart, P., Daly, D., Gibb, G., Izzard, M., McKeown, N., Rexford, J., Schlesinger, C., Talayco, D., Vahdat, A., Varghese, G., & Walker, D. P4: Programming Protocol-Independent Packet Processors. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(3), 87-95
- [25] Xia, W., Zhao, P., Wen, Y., & Xie, H. (2016). A survey on data center networking (DCN): Infrastructure and operations. *IEEE communications surveys & tutorials*, 19(1), 640-656.
- [26] Omran M., A., Alssaheli, Z., Zainal Abidin, N. A. Zakaria, Z. Abal Abas, 'Software Defined Network based Load Balancing for Network Performance Evaluation', *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 13, No. 4, pp. 117-125, 2022
- [27] Briain, D. Ó., Denieffe, D., Okello, D., & Kavanagh, Y. (2020). Enabling models of Internet eXchange Points for developing contexts. *Development Engineering*, 5, 100057.
- [28] OpenFlow Switch Specification, Version 1.5.1 (Protocol version 0x06), March 26, 2015, Open Networking Foundation.
- [29] Goswami, B., Wilson, S., Asadollahi, S., & Manuel, T., "Data visualization: experiment to impose ddos attack and its recovery on software defined networks," in *Data Visualization*. Springer, 2020, pp. 141–160.
- [30] Singh, S., Goswami, B., Paulose, J. & Thomas, L., "Implementing and experimenting with openmul scalability in software defined network," *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [31] Kulkarni, M., Goswami, B., & Paulose, J. (2022, April). P4 based load balancing strategies for large scale software-defined networks. In *2022 Second International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)* (pp. 1-7). IEEE

- [32] 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.
- [33] Liang, S., Jiang, W., Zhao, F., & Zhao, F. (2020). Load balancing algorithm of controller based on sdn architecture under machine learning. *Journal of Systems Science and Information*, 8(6), 578-588.
- [34] Bagci, K. T., & Tekalp, A. M. (2019). SDN-enabled distributed open exchange: Dynamic QoS-path optimization in multi-operator services. *Computer networks*, 162, 106845.
- [35] Khan, S., Hussain, F. K., & Hussain, O. K. (2021). Guaranteeing end-to-end QoS provisioning in SOA based SDN architecture: A survey and Open Issues. *Future Generation Computer Systems*, 119, 176-187.
- [36] Xue, H., Kim, K. T., & Youn, H. Y. (2019). Dynamic load balancing of software-defined networking based on genetic-ant colony optimization. *Sensors*, 19(2), 311
- [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] Jamali, S., Badirzadeh, A., & Siapoush, M. S. (2019). On the use of the genetic programming for balanced load distribution in software-defined networks. *Digital Communications and Networks*, 5(4), 288-296
- [39] Shi, X., Li, Y., Xie, H., Yang, T., Zhang, L., Liu, P., ... & Liang, Z. (2020). An openflow-based load balancing strategy in SDN. *Comput. Mater. Contin*, 62(1), 385-398.
- [40] Ramya, K., Sayeekumar, M., & Karthik, G. M. (2020). Software defined networking based solution in load balancing for media transfer in overlay network. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 17(1), 43-47.
- [41] Joshi, N., & Gupta, D. (2019). A comparative study on load balancing algorithms in software defined networking. In *Ubiquitous Communications and Network Computing: Second EAI International Conference, Bangalore, India, February 8–10, 2019, Proceedings 2* (pp. 142-150). Springer International.
- [42] Khan, M. A., Goswami, B., Paulose, J. & Thomas, L., "Novel model to inculcate proactive behaviour in programmable switches for floodlight controlled software

- defined network,” Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science, vol. 747, pp. 1–19, 2020.
- [43] Semong, T., Maupong, T., Anokye, S., Kehulakae, K., Dimakatso, S., Boipelo, G., & Sarefo, S., “Intelligent load balancing techniques in software defined networks: A survey,” Electronics, vol. 9, no. 7, p. 1091, 2020.
- [44] Haile, G. B., & Zhang, J. (2021). Dynamic load balancing algorithm in SDN-based data center networks. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10.
- [45] Chand, N. A., Kumar, A. H., & Marella, S. T. (2018). Cloud computing based on the load balancing algorithm. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.7), 131-135 N.V.
- [46] Milani, A. S., & Navimipour, N. J. (2016). Load balancing mechanisms and techniques in the cloud environments: Systematic literature review and future trends. *Journal of Network and Computer Applications*, 71, 86-98.
- [47] Mitzenmacher, M. (2001). The Power of Two Choices in Randomized Load Balancing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 12(10), 1094-1104.
- [48] Balharith, T., & Alhaidari, F. (2019, May). Round robin scheduling algorithm in CPU and cloud computing: a review. In *2019 2nd international conference on computer applications & information security (ICCAIS)* (pp. 1-7). IEEE
- [49] Kaur, S., Singh, J. & Ghumman, N., Round Robin Based Load Balancing in Software Defined Networking. Conference: 2nd International Conference on “Computing for Sustainable Global Development At: Bharati Vidyapeeth's Institute of Computer, 2015
- [50] Mehmood, M., Sattar, K., Khan, A. H., & Afzal, M. (2015). Load balancing approach in cloud computing. *J Inform Tech Softw Eng*, 5(153), 2.
- [51] Manikandan, N., & Pravin, A. (2018). An efficient improved weighted round Robin load balancing algorithm in cloud computing. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(3.1), 110-7
- [52] Chand, N. A., Kumar, A. H., & Marella, S. T. (2018). Cloud computing based on the load balancing algorithm. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.7), 131-135.

- [53] Liu, H., Wang, Y., Chen, Y., Guo, C., & Zhang, Y. (2013). Ensuring Connectivity via Data Plane Mechanisms. *USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*.
- [54] Katta, N., Hira, M., Kim, C., Sivaraman, A., & Rexford, J. (2016, March). Hula: Scalable load balancing using programmable data planes. In *Proceedings of the Symposium on SDN Research* (pp. 1-12).
- [55] Alvizu, et al. (2017). Comprehensive Survey on T-SDN: Control and Transport Layers Separation in Software-Defined Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2322-2353.
- [56] Liu, L. et al., "An SDN-based Hybrid Strategy for Load Balancing in Data Center Networks," 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Barcelona, Spain, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISCC47284.2019.8969673
- [57] Zhang et al., Hashing Linearity Enables Relative Path Control in Data Centers, *Proceedings of the 2021 USENIX Annual Technical Conference* is sponsored by USENIX., <https://www.usenix.org/conference/atc21/presentation/zhang-zhehui>
- [58] Xu, Y., He, K., Wang, R., Yu, M., Duffield, N., Wassel, H., ... & Vahdat, A. (2022). Hashing Design in Modern Networks: Challenges and Mitigation Techniques. In *2022 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 22)* (pp. 805-818).
- [59] Zhang, et al., "SDN-based ECMP algorithm for data center networks," *2014 IEEE Computers, Communications and IT Applications Conference*, Beijing, 2014, pp. 13-18, doi: 10.1109/ComComAp.2014.7017162.
- [60] Al-Fares, M., Loukissas, A., & Vahdat, A. A Scalable, Commodity Data Center Network Architecture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(4), 63-74, 2008
- [61] Broadcom Corporation. Bcm56070 switch programming guide. <https://docs.broadcom.com/doc/56070-PG2-PUB>, 2020.
- [62] Cisco Data center access design with cisco nexus 5000 series switches and 2000 series fabric extenders and virtual portchannels. [https://itnetworkingpros.files.wordpress.com/2014/04/c07-572829-01\\_design\\_n5k\\_n2k\\_vpc\\_dg.pdf](https://itnetworkingpros.files.wordpress.com/2014/04/c07-572829-01_design_n5k_n2k_vpc_dg.pdf), 2018.
- [63] Joglekar, A., Kounavis, M. E., & Berry, F. L. (2005, December). A Scalable and High Performance Software iSCSI Implementation. In *FAST* (Vol. 5, pp. 20-20).

- [64] Al-Fares, M., Radhakrishnan, S., Raghavan, B., Huang, N., & Vahdat, A. (2010, April). Hedera: dynamic flow scheduling for data center networks. In *Nsdi* (Vol. 10, No. 8, pp. 89-92).
- [65] Cisco. Cef polarization. <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/expressforwarding-cef/116376-technote-cef-00.html>, 2013.
- [66] Alizadeh, et al. (2014). CONGA: Distributed Congestion-Aware Load Balancing for Datacenters. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 43(4), 503-514.
- [67] Curtis, A. R., Mogul, J. C., Tourrilhes, J., Yalagandula, P., Sharma, P., & Banerjee, S. (2011). DevoFlow: Scaling flow management for high-performance networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 41(4), 254-265.
- [68] Hong, C. Y., Kandula, S., Mahajan, R., Zhang, M., Gill, V., Nanduri, M., & Wattenhofer, R. (2013). Achieving high utilization with software-driven WAN. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 43(4), 15-26.
- [69] Gill, P., Jain, N., & Nagappan, N. (2011, August). Understanding network failures in data centers: measurement, analysis, and implications. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference* (pp. 350-361).
- [70] Sun, X., & Yang, G. (2022, December). Research on load balancing strategy of data center based on Yen Algorithm in SDN. In *2022 IEEE 5th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)* (Vol. 5, pp. 1243-1247). IEEE.
- [71] Hendel, A. (2015). *U.S. Patent Application No. 14/026,725*
- [72] Meyer, A. Co-prime hashing, July 28 2020. US Patent 10,725,990
- [73] Vanini, E., Pan, R., Alizadeh, M., Taheri, P., & Edsall, T. (2017). Let it flow: Resilient asymmetric load balancing with flowlet switching. In *14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 17)* (pp. 407-420)
- [74] Kumar, et al., (2017). HULA: Scalable Load Balancing Using Programmable Data Planes. *ACM SIGCOMM Symposium on SDN Research*.
- [75] Kulkarni, M., Goswami, B., & Paulose, J. (2023, February). HULA: Dynamic and Scalable Load Balancing Mechanism for Data Plane of SDN. In *2023 Fifth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)* (pp. 1-9). IEEE.

- [76] Benet, C. H., Kassler, A. J., Benson, T., & Pongracz, G. (2018, August). Mp-hula: Multipath transport aware load balancing using programmable data planes. In *Proceedings of the 2018 Morning Workshop on In-Network Computing* (pp. 7-13).
- [77] Ye, J. L., Chen, C., & Chu, Y. H. (2018, October). A weighted ECMP load balancing scheme for data centers using P4 switches. In *2018 IEEE 7th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)* (pp. 1-4).
- [78] Katta, et al., (2014). Ravana: Controller Fault-Tolerance in Software-Defined Networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*.
- [79] Nepolo, E., & Zodi, G. A. L. (2021, January). A predictive ECMP routing protocol for fat-tree enabled data centre networks. In *2021 15th international conference on ubiquitous information management and communication (IMCOM)* (pp. 1-8). IEEE.
- [80] Hwang, R., & Tseng, H., "Load Balancing and Routing Mechanism Based on Software Defined Network in Data Centers," *2016 International Computer Symposium (ICS)*, Chiayi, Taiwan, 2016, pp. 165-170, doi: 10.1109/ICS.2016.0041.
- [81] Hamdan, M., Khan, S., Abdelaziz, A., Sadih, S., Shaikh-Husin, N., Al Otaibi, S., ... & Marsono, M. N. (2021). DPLBAnt: Improved load balancing technique based on detection and rerouting of elephant flows in software-defined networks. *Computer Communications*, 180, 315-327.
- [82] Begam et al., 'Load Balancing in DCN Servers through SDN Machine Learning Algorithm', *Arabian Journal for Science and Engineering* (2022), SPRINGER LINK, 47:1423–1434, <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05911-1>
- [83] Kadim, U., & Mohammed, I., 'SDN-RA: An Optimized Reschedule Algorithm of SDN Load Balancer for Data Center Networks Based on QoS', 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 928 (2020) 032057, doi:10.1088/1757-899X/928/3/032057
- [84] Narcisse, T., Etienne, S., Olivier, A. and Adama, K. (2024) "An Intelligent Load Balancing Strategy to improve performance and QoS in SD-DCN (Software Defined-Data Center Network)", *Far East Journal of Applied Mathematics*, 117(2), pp. 149–167. doi: 10.17654/0972096024008.
- [85] Liu, Z., Zhao, A., & Liang, M. (2021). A port-based forwarding load-balancing scheduling approach for cloud datacenter networks. *Journal of Cloud Computing*, 10(1), 13.

