



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση σε Σύγχρονα Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων: Χαρακτηριστικά και Τάσεις

ΠΑΠΑΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μπαζιάνα Περιστέρα
Επίκουρη Καθηγήτρια

Λαμία 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση σε Σύγχρονα Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων: Χαρακτηριστικά και Τάσεις

ΠΑΠΑΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μπαζιάνα Περιστέρα
Επίκουρη Καθηγήτρια

Λαμία 2025



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

Telecommunication Traffic in Modern Data Center Networks: Characteristics and Trends

PAPATRIANTAFYLLOU NIKOLETA

FINAL THESIS

ADVISOR

Baziana Peristera
Assistant Professor

Lamia 2025

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 24/09/2025

Η Δηλ.

ΠΑΠΑΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην επίκουρη καθηγήτρια Περιστέρα Μπαζιάνα για την καθοδήγησή της, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε κάθε στάδιο της εργασίας και την πολύτιμη στήριξη του υποψηφίου Λιδάκτωρ Λαυίδ Γεωργαντά. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωσή της. Επιπλέον, ένα ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αδιάκοπη υποστήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τα χαρακτηριστικά της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε σύγχρονα δίκτυα κέντρων δεδομένων (ΔΚΔ), εστιάζοντας σε εφαρμογές πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Αξιοποιώντας το εργαλείο TrafPy για προσομοίωση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, παραμετροποιούνται βασικά χαρακτηριστικά - μέγεθος ροών, χρονικά διαστήματα αφίξεων και θερμικοί χάρτες - που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση και την σύγκριση των τοπολογιών Fat Tree και Leaf Spine. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε πέντε αντιπροσωπευτικά προφίλ ΔΚΔ - Πανεπιστήμιο, Ιδιωτική Επιχείρηση, Εμπορική Επιχείρηση, Νέφος Εφαρμογών Κοινωνικής Δικτύωσης και Κέντρο Δεδομένων TensorFlow - ώστε να διερευνηθεί πώς οι ιδιαιτερότητες των εφαρμογών επηρεάζουν την παραγόμενη κίνηση και την απόδοση των δύο τοπολογιών υπό μεταβαλλόμενα φορτία. Μέσα από τη διερεύνηση αυτών των μοτίβων, επιχειρείται η κατανόηση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα κέντρα δεδομένων και η αξιολόγηση των τάσεων που διαμορφώνουν το μέλλον της δικτυακής υποδομής τους.

ABSTRACT

This study examines the characteristics of network traffic in modern Data Center Networks (DCNs), with a focus on both real-time and non-real-time applications. Using the TrafPy tool to simulate traffic, we parameterize key features flow sizes and inter-arrival times and heatmaps to visualize and compare the Fat-Tree and Leaf Spine topologies. The methodology is applied to five representative DCN profiles - University, Private Enterprise, Commercial Cloud, Social Media Cloud, and TensorFlow - in order to investigate how application-specific traits shape the generated traffic and the performance of the two topologies under varying loads. By exploring these patterns, the study aims to elucidate the challenges faced by contemporary data centers and to assess the trends that are shaping the future of their network infrastructure.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	II
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1 ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	2
1.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	2
1.1.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	3
1.2 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗ ΚΙΝΗΣΗ.....	6
1.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	7
1.2.3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΑ ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥΣ.....	7
1.2.4 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΑ ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	9
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	9
1.3.1 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	10
2.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	10
2.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ TRAFPY.....	10
2.1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ TRAFPY	10
2.2 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ TRAFPY: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	11
2.2.1 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ (UNIVERSITY)	11
2.2.2 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΔΙΩΤΙΚΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (PRIVATE ENTERPRISE)	11
2.2.3 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (COMMERCIAL CLOUD).....	12
2.2.4 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ (SOCIAL MEDIA CLOUD).....	12
2.2.5 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ TENSORFLOW ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ	12
2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ TRAFPY.....	12
2.3.1 ΜΕΓΕΘΟΣ ΡΟΗΣ (FLOW SIZE).....	12
2.3.2 ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΑΦΙΞΕΩΝ ΡΟΩΝ (INTERARRIVAL TIMES).....	13
2.3.3 ΧΑΡΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΈΝΤΑΣΗΣ (HEATMAP)	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	15
3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	15
3.1.1 ΦΟΡΤΙΟ	15
3.1.2 ΡΟΕΣ.....	15
3.2 ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ	16

3.2.1 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ FAT TREE.....	16
3.2.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ LEAF-SPINE.....	17
3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... 21

4.1 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΚΙΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ FAT TREE	21
4.1.1 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ (UNIVERSITY)	21
4.1.2 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΔΙΩΤΙΚΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (PRIVATE ENTERPRISE)	24
4.1.3 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (COMMERCIAL CLOUD).....	28
4.1.4 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ (SOCIAL MEDIA CLOUD).....	32
4.1.5 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ TENSORFLOW ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ 36	
4.1.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ FAT TREE	40
4.2 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΚΙΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ LEAF SPINE.....	45
4.2.1 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ (UNIVERSITY)	45
4.2.2 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΔΙΩΤΙΚΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (PRIVATE ENTERPRISE)	48
4.2.3 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (COMMERCIAL CLOUD).....	52
4.2.4 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ (SOCIAL MEDIA CLOUD).....	57
4.2.5 ΚΕΝΤΡΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ TENSORFLOW ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ.....	61
4.2.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ FAT TREE	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ..... 69

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ FAT TREE ΚΑΙ LEAF SPINE	69
5.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .	69
5.1.2 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	85

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 87

Οι βασικές λειτουργίες ενός Δικτύου Κέντρων Δεδομένων περιλαμβάνουν τη διαχείριση της εσωτερικής κίνησης μεταξύ εφαρμογών, την επικοινωνία μεταξύ μηχανημάτων σε εικονικά περιβάλλοντα, και την παροχή σταθερής απόδοσης σε συνθήκες μεταβλητού φορτίου. Τα σύγχρονα κέντρα δεδομένων ακολουθούν πλέον αρχιτεκτονικές υπολογιστικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας (warehouse-scale computing), όπου το δίκτυο του κέντρου δεδομένων διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη διασύνδεση των υπολογιστικών κόμβων και των μονάδων αποθήκευσης. Παράλλα, η τοπολογία ενός Δικτύου Κέντρων Δεδομένων και η επιλογή των τεχνολογιών που χρησιμοποιεί επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική του απόδοση [4].

1.1.3 Τοπολογίες Δικτύων Κέντρων Δεδομένων

1.1.3.1 Τοπολογία

Η τοπολογία περιγράφει τη δομή και την οργάνωση με την οποία διασυνδέονται τα επιμέρους στοιχεία ενός συστήματος. Στην περίπτωση των υπολογιστικών και επικοινωνιακών συστημάτων, ο όρος αναφέρεται τόσο στη φυσική διάταξη των κόμβων και των συνδέσεων τους όσο και στη λογική αλληλεπίδραση που προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο καθορίζονται οι σχέσεις επικοινωνίας. Σαν έννοια αποτελεί βασική παράμετρο σχεδίασης, καθώς επηρεάζει άμεσα τον τρόπο ροής των πληροφοριών, την ανθεκτικότητα της υποδομής και τις δυνατότητες επεκτασιμότητας.[1]

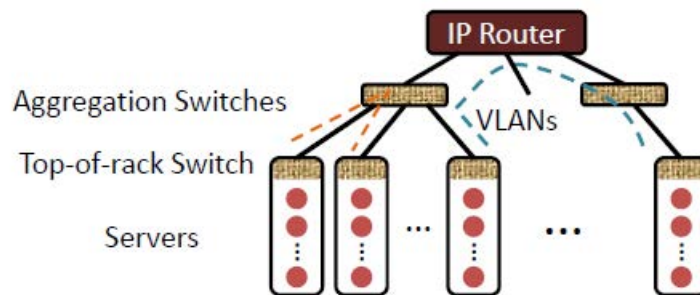
Σε ακαδημαϊκό επίπεδο, η τοπολογία θεωρείται κρίσιμο εννοιολογικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει την αφηρημένη μορφή μιας αρχιτεκτονικής. Δεν περιορίζεται στην περιγραφή της διάταξης, αλλά επεκτείνεται στην ανάλυση των ιδιοτήτων που απορρέουν από αυτήν, όπως το πλήθος και η πολυπλοκότητα των συνδέσεων, οι δυνατές διαδρομές επικοινωνίας, καθώς και η ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται σε αυξημένες απαιτήσεις ή σε αστοχίες. Με τον τρόπο αυτό, η τοπολογία συνδέεται άμεσα με την απόδοση και τη βιωσιμότητα μιας υποδομής σε βάθος χρόνου.[1][2]

1.1.3.2 Κατηγορίες Τοπολογιών

Οι τοπολογίες των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων έχουν υποστεί σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, απόδοση, επεκτασιμότητα και ανθεκτικότητα. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων, χρησιμοποιούνταν κυρίως η παραδοσιακή ιεραρχική αρχιτεκτονική τριών επιπέδων (three-tier architecture), βλέπε *Σχήμα 2*, όμως οι περιορισμοί τους σε θέματα συμφόρησης και πολυπλοκότητας οδήγησαν στην υιοθέτηση νεότερων μοντέλων[12]. Η τοπολογία αυτή περιλαμβάνει:

- το επίπεδο πρόσβασης (access layer), όπου συνδέονται οι εξυπηρετητές με switches (Top-of-Rack - ToR),
- το επίπεδο συγκέντρωσης ή διανομής (aggregation/distribution layer), που συγκεντρώνει την κίνηση από πολλαπλά access switches,

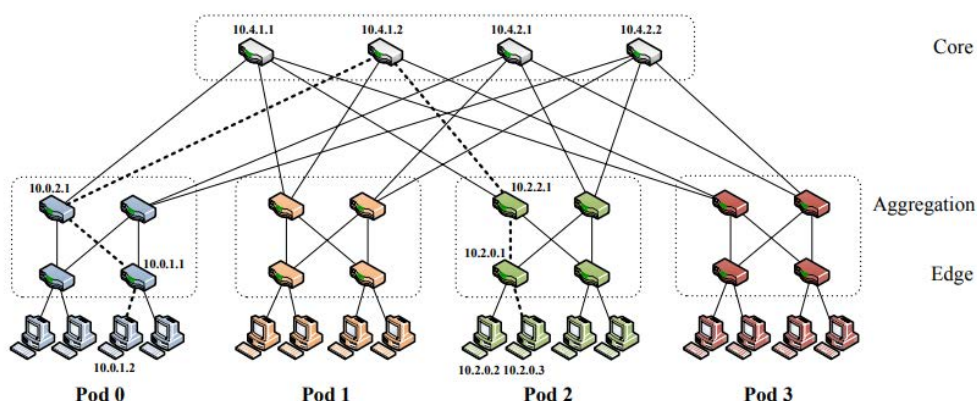
- και το επίπεδο κορμού (core layer), το οποίο συνδέει το δίκτυο με εξωτερικές υποδομές ή με άλλα τμήματα του ίδιου κέντρου δεδομένων [5].



Σχήμα 2 Ιεραρχική Δομή Τριών Επιπέδων [4]

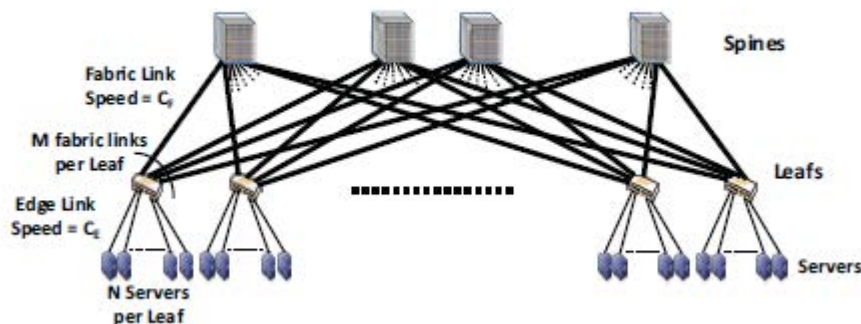
Το μοντέλο παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα συγκεκριμένα, η ύπαρξη περιορισμένου αριθμού σημείων σύνδεσης στο επίπεδο συγκέντρωσης προκαλεί συμφόρηση (congestion) όταν πολλές παράλληλες ροές διεκδικούν το ίδιο εύρος ζώνης. Επιπλέον, λόγω του τρόπου διασύνδεσης, παρατηρείται υπερασυνδρομή (oversubscription), δηλαδή πολλοί εξυπηρετητές μοιράζονται περιορισμένες διαδρομές προς τον κορμό, γεγονός που οδηγεί σε αστάθεια της απόδοσης [4][6][5].

Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για νέες με στόχο για βελτιωμένη απόδοση και την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων. Μία από τις πρώτες και πιο επιδραστικές προσεγγίσεις είναι η αρχιτεκτονική Fat Tree, η οποία βασίζεται σε τροποποιημένες Clos τοπολογίες, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3. Οι τοπολογίες αυτές είναι πολυεπίπεδες και συμμετρικές, επιτρέποντας την ύπαρξη πολλαπλών ισοδύναμων διαδρομών μεταξύ των κόμβων του δικτύου και αυτό συμβάλλει στην αυξημένη ανθεκτικότητα, την επεκτασιμότητα και την ισοκατανομή της κίνησης. Η Fat Tree τοπολογία χαρακτηρίζεται από συμμετρική δομή και πολλαπλά ισοδύναμα μονοπάτια μεταξύ εξυπηρετητών, εξισορροπώντας το φορτίο και μειώνοντας τη συμφόρηση μέσω πολυδιαδρομικής δρομολόγησης. Στην Fat Tree, όλα τα επίπεδα μεταγωγέων είναι σχεδιασμένα να διαμοιράζονται ισότητα το φορτίο, και δεν υφίσταται ένας κορμός με την έννοια που υπήρχε παλαιότερα. Το σύστημα είναι πλήρως ισοσταθμισμένο και παρέχει πολλαπλές ισοδύναμες διαδρομές μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων, η αρχιτεκτονική αυτή είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε περιβάλλοντα που απαιτούν μεγάλες και ισομερώς κατανεμημένες ροές [6].



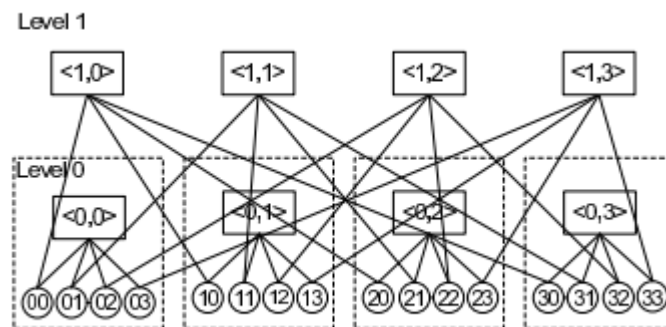
Σχήμα 3 Τοπολογία Fat Tree με 4 μεταγωγείς κορμού και 16 εξυπηρετητές [6]

Μία ακόμα διαδεδομένη τοπολογία είναι η Leaf Spine, η οποία αποτελείται από δύο επίπεδα: τους μεταγωγείς φύλλου (leaf switches) που συνδέονται απευθείας με τους εξυπηρετητές (servers) και τους μεταγωγείς κορμού (spine switches) που διασυνδέουν όλα τα φύλλα μεταξύ τους, όπως φαίνονται στο *Σχήμα 4*. Στη Leaf Spine όλα τα φύλλα έχουν ίση πρόσβαση στο κορμό, άρα η καθυστέρηση μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους φύλλων είναι σχεδόν σταθερή [7]. Παράλληλα, η αρχιτεκτονική αυτή προσφέρει ένα επίπεδο ομοιομορφίας μεταξύ όλων των εξυπηρετητών, ελαχιστοποιώντας τη συμφόρηση και επιτυγχάνοντας προβλέψιμες καθυστερήσεις, γεγονός που την καθιστά ιδανική για υποδομές με υψηλό αριθμό ταυτόχρονων συνδέσεων. Η τοπολογία Leaf Spine είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για κέντρα δεδομένων υπερκλίμακας, λόγω της εύκολης επεκτασιμότητάς τους [8][9].



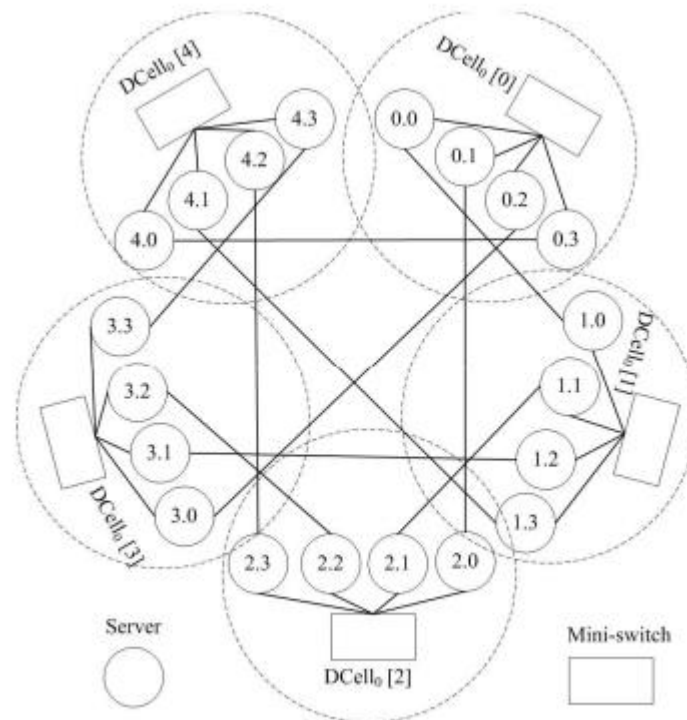
Σχήμα 4 Τοπολογία Leaf Spine με 4 μεταγωγείς κορμού [7]

Η τοπολογία BCube σχεδιάστηκε από τη Microsoft Research για κέντρα δεδομένων με αρθρωτές ροές. Εδώ, οι εξυπηρετητές διαθέτουν πολλαπλές κάρτες δικτύου και συνδέονται σε πολλαπλά επίπεδα μεταγωγών, δημιουργώντας ένα πολυεπίπεδο πλέγμα, όπως βλέπουμε στο *Σχήμα 5*. Η αρχιτεκτονική αυτή δίνει τη δυνατότητα σε κάθε server να συμμετέχει ενεργά στη δρομολόγηση και να διαθέτει εναλλακτικές διαδρομές επικοινωνίας. Η BCube έχει υψηλή ανθεκτικότητα σε βλάβες, καθώς η αποτυχία ενός μεταγωγέα δεν διακόπτει την επικοινωνία χάρη στις πολλαπλές διαδρομές. Επιπλέον, προσφέρει υψηλή απόδοση σε εφαρμογές μεγάλης έντασης δεδομένων. Ωστόσο, απαιτεί περισσότερες διεπαφές ανά server και πολύπλοκο σχεδιασμό καλωδίωσης [10].



Σχήμα 5 Τοπολογία Δικτύου BCube με 4 μεταγωγείς κορμού και 16 εξυπηρετητές

Η τοπολογία DCell εισάγει μια προσανατολισμένη προς τους εξυπηρετητές προσέγγιση, όπου έχουν ενεργό ρόλο στη δρομολόγηση πακέτων. Στη βάση της υπάρχει μια "κυψέλη" (DCell0), που αποτελείται από εξυπηρετητές και έναν μικρό μεταγωγέα, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6. Έτσι, πολλαπλές DCell0 ενώνονται σε μεγαλύτερες δομές, σχηματίζοντας ένα ιεραρχικό δίκτυο μεγάλης κλίμακας. Η τοπολογία αυτή είναι ιδιαίτερα επεκτάσιμη, επιτρέποντας τη σύνδεση εκατομμυρίων εξυπηρετητών, και εξαιρετικά ανθεκτική σε σφάλματα, καθώς ακόμα και αν αποτύχει μεγάλος αριθμός συνδέσεων, οι εξυπηρετητές διαθέτουν εναλλακτική δρομολόγηση. Το μειονέκτημα είναι η πολυπλοκότητα που απαιτείται στους αλγορίθμους δρομολόγησης για την διαχείριση του δικτύου [11].



Σχήμα 6 Τοπολογία DCell για 4 μεταγωγείς και 20 εξυπηρετητές [10]

1.2 Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

Στο υποκεφάλαιο 1.2 παρουσιάζεται η έννοια της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, τα βασικά της χαρακτηριστικά και προηγούμενες μελέτες πάνω στην κίνηση.

1.2.1 Εισαγωγή

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση αναφέρεται στη μεταφορά δεδομένων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων επικοινωνίας, μέσω των φυσικών και λογικών διαύλων ενός δικτύου. Σε επίπεδο δικτύου κέντρων δεδομένων (Data Center Network - DCN), η κίνηση αυτή περιλαμβάνει πακέτα, ροές (flows) και πλαίσια (frames), τα οποία μεταφέρονται μεταξύ εξυπηρετητών, διακομιστών και συσκευών αποθήκευσης. Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αποδοτικότητα των συστημάτων, καθώς σχετίζεται άμεσα με την απόκριση των εφαρμογών, την αξιοπιστία και την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) [3][12].

Η κίνηση αυτή χαρακτηρίζεται από διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα, τον όγκο, το μέγεθος των πακέτων και τη συχνότητα των ροών, γεγονός που απαιτεί εξελιγμένες στρατηγικές διαχείρισης. Σε σύγχρονα δίκτυα, η ανάγκη για διαχείριση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι ακόμα μεγαλύτερη λόγω των απαιτήσεων εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης, όπως οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων και η μηχανική μάθηση [13].

1.2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά της Κίνησης Δεδομένων

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων παρουσιάζει ένα σύνολο χαρακτηριστικών που την καθιστούν μοναδική σε σχέση με άλλα είδη δικτύων. Πρώτον, η κίνηση αυτή εμφανίζει μεγάλη ετερογένεια ως προς τις ροές δεδομένων, καθώς συνυπάρχουν τόσο οι μικρού μεγέθους και συχνές ροές, όσο και οι σπάνιες αλλά μεγάλες σε όγκο ροές. Επιπλέον, παρατηρείται έντονη χρονική συγκέντρωση (burstiness) και εντοπιότητα (temporal locality), φαινόμενα που περιγράφονται από συχνές εκρήξεις πακέτων σε σύντομο χρονικό διάστημα, επιβαρύνοντας τους ενδιάμεσους κόμβους και καθιστώντας απαραίτητη την αποδοτική διαχείριση του ρυθμού μετάδοσης και της προσωρινής αποθήκευσης (buffering) [12].

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό είναι κατανομή της κίνησης. Η διαχείριση του δικτύου οδηγεί σε ορισμένα τμήματα να εμφανίζουν πολύ υψηλότερο φόρτο σε σχέση με άλλα, γεγονός που οδηγεί σε τοπικά φαινόμενα συμφόρησης [4]. Τέλος, πολλά είδη εφαρμογών των ΔΚΔ απαιτούν τη χρήση μεθόδων διαφοροποιημένης δρομολόγησης, προτεραιοτήτων και εξισορρόπησης φορτίου διότι επηρεάζονται άμεσα και έντονα από την υιοθετούμενη τοπολογία του δικτύου [6][15].

1.2.3 Διαφορετικοί Τύποι Εφαρμογών στα Κέντρα Δεδομένων και τα Χαρακτηριστικά της Κίνησής τους

Σε ένα κέντρο δεδομένων, κάθε τύπος εφαρμογής που φιλοξενείται δημιουργεί μοναδικά πρότυπα κίνησης, τόσο ως προς τη χρονική της κατανομή όσο και ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ροών. Η κατανόηση των διαφορετικών απαιτήσεων κίνησης ανά τύπο εφαρμογής είναι θεμελιώδης για τον σχεδιασμό αποδοτικών και επεκτάσιμων δικτύων κέντρων δεδομένων [16].

Αρχικά, υπάρχουν οι εφαρμογές για διαδικτυακές υπηρεσίες (online serving) που περιλαμβάνουν εξυπηρέτηση αιτημάτων σε πραγματικό χρόνο, όπως υπηρεσίες αναζήτησης, μέσα κοινωνικής δικτύωσης, ηλεκτρονικό εμπόριο και εφαρμογές web. Τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά της κίνησης αυτής είναι οι σύντομες, μικρού μεγέθους ροές (micro flows), που δημιουργούνται από αιτήματα και αποκρίσεις μικρού όγκου, με στόχο την ταχύτατη εξυπηρέτηση χρηστών και την συνεχή διαθεσιμότητα καθώς τα κέντρα δεδομένων αυτά καλούνται να εξυπηρετήσουν πολλές ταυτόχρονες συνδέσεις [7]. Οι ροές αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλό μέσο ρυθμό δεδομένων, αλλά υψηλή πυκνότητα σε αριθμό αιτημάτων ανά δευτερόλεπτο, γεγονός που επιβάλλει περιορισμούς σε επίπεδο καθυστέρησης (latency) [17].

Επίσης, η κίνηση στα κέντρα δεδομένων σε αυτή την περίπτωση, χαρακτηρίζονται από ροές που εμφανίζονται με ιδιαίτερα υψηλή συχνότητα και απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, καθώς σχετίζονται άμεσα με την ανάγκη διαδραστικού τρόπου εξυπηρέτησης και της άμεση απόκριση που χρειάζεται για εξυπηρέτηση νέων χρηστών. Η κυκλοφορία αυτού του τύπου τείνει να έχει βόρεια-νότια κατεύθυνση (north-south), δηλαδή μεταξύ εξωτερικών χρηστών και των εξυπηρετητών των κέντρων δεδομένων, καθώς τα αιτήματα εισέρχονται από το διαδίκτυο και φτάνουν στα εσωτερικά συστήματα για επεξεργασία και απάντηση [13]. Η ευαισθησία των εφαρμογών αυτών στην καθυστέρηση καθιστά απαραίτητη

την χρήση πολιτικών δρομολόγησης προτεραιότητας και μηχανισμών διαφοροποίησης κίνησης, όπως η απομόνωση των ροών ποντικιού (mice flows) από τις ροές ελέφαντα (elephant flows), ώστε να αποφεύγεται ο αποκλεισμός (starvation) [2][18].

Παράλληλα, άλλος τύπος εφαρμογών που συναντάται σε κέντρα δεδομένων είναι οι εφαρμογές επιστημονικής υπολογιστικής (scientific computing) όπως μοντελοποίηση φυσικών φαινομένων, εκπαίδευση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και αναλύσεις μεγάλων δεδομένων. Οι τύποι εφαρμογών αυτοί παρουσιάζουν έντονα χαρακτηριστικά ροών μεγάλου όγκου, με μεταφορά δεδομένων που μπορεί να ξεπερνά τα gigabytes ανά ροή. Οι ροές αυτές έχουν αυξημένο ρυθμό μετάδοσης, διαρκούν περισσότερο από τις μικρού μεγέθους ροές και εισάγουν υψηλό φόρτο στο δίκτυο, απαιτώντας υψηλό εύρος ζώνης και αποτελεσματικούς μηχανισμούς εξισορρόπησης [12][19].

Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των εφαρμογών είναι η κατά κύριο λόγο οριζόντια (east-west) τοπολογική κατανομή της κίνησης, καθώς η επεξεργασία δεδομένων διαμοιράζεται σε πολλαπλούς υπολογιστικούς κόμβους (nodes). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται έντονη ενδοκεντρική επικοινωνία μεταξύ εξυπηρετητών, με την πλειονότητα των δεδομένων να διακινείται μεταξύ racks και όχι μεταξύ του data center και του εξωτερικού χρήστη. Η αποτελεσματική υποστήριξη αυτών των ροών απαιτεί τοπολογίες με υψηλό αριθμό συνδέσεων, χαμηλή καθυστέρηση και υποστήριξη πολλαπλών διαδρομών (multipath routing), όπως οι Leaf Spine και Fat Tree [7][20].

Επιπλέον, κατά την έναρξη ή ολοκλήρωση μιας υπολογιστικής διεργασίας τέτοιου τύπου παρατηρούνται σύντομα χρονικά διαστήματα έντονης δραστηριότητας που προκαλούν προσωρινά σημεία συμφόρησης στο δίκτυο, δηλαδή οι ροές δεδομένων εμφανίζουν εκρηκτική χρονική συμπεριφορά (bursty traffic). Για την αντιμετώπιση αυτών των αιχμών, είναι αναγκαίες πολιτικές buffering και στρατηγικές δρομολόγησης που να μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στις συνθήκες συμφόρησης [16]. Αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται από υψηλή υπολογιστική ισχύ επειδή δημιουργούνται μαζικές μεταφορές δεδομένων μεταξύ των υπολογιστικών κόμβων, προκαλώντας έντονη συμφόρηση και δημιουργώντας ροές υψηλής διάρκειας και όγκου (ροές ελεφάντων). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η υποδομή TensorFlow της Google η οποία βασίζεται σε συνεχή και αξιόπιστη ροή μεγάλων πακέτων δεδομένων [4][21].

Τέλος, οι εφαρμογές αποθήκευσης και αντιγράφων ασφαλείας (offline backup), όπως η περιοδική αποθήκευση βάσεων δεδομένων, η συγχρονισμένη αντιγραφή και η συγκέντρωση αρχείων, εμφανίζουν διαφορετικό προφίλ κίνησης από εκείνα των διαδραστικών ή υπολογιστικά εντατικών εφαρμογών. Η κατηγορία αυτή παράγει μεγάλες ροές, όμως αυτές δεν είναι ευαίσθητες σε καθυστέρηση, καθώς υλοποιούνται εκτός ωρών αιχμής και με προβλέψιμο χρονοπρόγραμμα, δηλαδή, η χρονική στιγμή παράδοσης των δεδομένων δεν είναι κρίσιμη, με στόχο να μην επηρεάζουν ενεργές υπηρεσίες ή διαδραστικές εφαρμογές. Η προτεραιότητα της κίνησης είναι χαμηλή και οι απαιτήσεις από το δίκτυο εστιάζουν περισσότερο στη διαθεσιμότητα πόρων και λιγότερο στη γρήγορη παράδοση. Επομένως, αυτές οι ροές μπορούν να αξιοποιήσουν το υπόλοιπο εύρος ζώνης χωρίς να επηρεάζουν κρίσιμες υπηρεσίες [2][22].

Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό είναι η χαμηλή προτεραιότητα (low-priority scheduling) που δίνεται σε αυτές τις ροές από τα συστήματα διαχείρισης κίνησης (traffic control). Καθώς δεν απαιτείται άμεση ανταπόκριση, το δίκτυο αξιοποιεί το αχρησιμοποίητο εύρος ζώνης (residual bandwidth). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η συμφόρηση κατά τις ώρες αυξημένης ζήτησης και διατηρείται η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για τις κρίσιμες λειτουργίες του data center. [2]. Επιπλέον, η τοπολογική κατανομή της κυκλοφορίας σε αυτού του είδους τις εφαρμογές είναι συνήθως ανατολής-δύσης (east-west), δηλαδή αφορά επικοινωνία μεταξύ εξυπηρετητών εντός του κέντρου δεδομένων. Σε αυτή την κατηγορία εφαρμογών η ένταση της κυκλοφορίας είναι συχνά συνεχής και μακράς διάρκειας, και ακολουθεί επαναλαμβανόμενα μοτίβα με χαμηλή μεταβλητότητα σε σχέση με τις διαδραστικές εφαρμογές [23].

1.2.4 Προηγούμενες Μελέτες για την Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση στα Κέντρα Δεδομένων

Οι πρώτες εμπεριστατωμένες μελέτες που κατέγραψαν και ανέλυσαν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση εντός των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων προήλθαν από ερευνητικά έργα που βασίστηκαν σε δεδομένα από πραγματικές υποδομές. Για παράδειγμα, η εργασία των Benson et al. [15] συγκέντρωσε και ανάλυσε δεδομένα από δίκτυα παραγωγής, αποκαλύπτοντας κρίσιμες διαφοροποιήσεις στα μοτίβα ροών ανάλογα με το φορτίο και την αρχιτεκτονική του συστήματος. Οι συγγραφείς κατέδειξαν την ανάγκη για μηχανισμούς διαφοροποιημένης εξυπηρέτησης και ευέλικτης διαχείρισης συμφόρησης.

Παρόμοιες διαπιστώσεις έγιναν και από την ανάλυση δεδομένων της Yahoo!, όπως παρουσιάζεται από τους Chen et al. [24]. Εκεί εντοπίστηκαν σημαντικές διακυμάνσεις στον όγκο και τη συχνότητα των μετακινήσεων δεδομένων μεταξύ γεωγραφικά απομακρυσμένων κέντρων, τονίζοντας τον ρόλο της κατεύθυνσης της ροής και της γεωτοπολογίας. Οι Kandula et al. [2] επιβεβαίωσαν τη σημασία της χρονικής μεταβλητότητας των ροών, καθώς και την ανάγκη για ακριβή παρακολούθηση και πρόβλεψη.

Οι παραπάνω μελέτες ανέδειξαν τη σημασία των στατιστικών χαρακτηριστικών της ροής, όπως η κατανομή των μεγεθών ροής, ο χρόνος άφιξης και οι χρονικές εκρήξεις, ως κρίσιμους παράγοντες στη σχεδίαση και προσομοίωση ρεαλιστικής τηλεπικοινωνιακής συμπεριφοράς. Η πληθώρα αυτών των δεδομένων αξιοποιείται πλέον σε εργαλεία όπως το TrafPy, που παρέχει μοντέλα δημιουργίας κίνησης για προσομοιώσεις [25].

1.3 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε σύγχρονα δίκτυα κέντρων δεδομένων, με στόχο την κατανόηση των χαρακτηριστικών τους και την προσομοίωση αυτών των χαρακτηριστικών σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα.

Οι βασικοί στόχοι είναι:

- Η χαρτογράφηση των πρότυπων ροών ανά τύπο εφαρμογής και αρχιτεκτονική ΔΚΔ.
- Η αξιολόγηση της επίδρασης της τοπολογίας στη ροή και την απόδοση του δικτύου.
- Η χρήση του εργαλείου TrafPy για τη δημιουργία προσομοιώσεων βασισμένων σε ρεαλιστικά στατιστικά μοντέλα.

1.3.1 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η μελέτη εστιάζει σε ερωτήματα όπως:

- Ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε σύγχρονα δίκτυα κέντρα δεδομένων;
- Πώς διαφέρει η κίνηση ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και τη δικτυακή τοπολογία;
- Πώς μπορεί να αξιοποιηθεί η προσομοίωση για μελλοντική βελτιστοποίηση των δικτύων κέντρων δεδομένων;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Προσομοίωση Δικτύου Κέντρων Δεδομένων

2.1 Προγράμματα Προσομοίωσης

Αναζητήσαμε προγράμματα τα οποία θα μπορούσαν να μας δώσουν με αξιόπιστο τρόπο τηλεπικοινωνιακή κίνηση κέντρων δεδομένων, για να δώσουμε απάντηση στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στο υποκεφάλαιο 1.3.1. Παρακάτω στο υποκεφάλαιο 2.1 αναλύεται γιατί το TraFpy ένα έγκυρο και δημοσιευμένο εργαλείο ανοιχτού κώδικα με την δυνατότητα να παράγει ρεαλιστικά μοτίβα κίνησης αποτέλεσε την καταλληλότερη επιλογή.

2.1.1 Περιγραφή του Trafpy

Το TrafPy αποτελεί ένα λογισμικό εργαλείο ανοιχτού κώδικα, το οποίο είναι σχεδιασμένο για τη δημιουργία και αξιολόγηση προτύπων κίνησης σε δίκτυα κέντρων δεδομένων με στόχο την προσομοίωση και την ανάλυση της απόδοσης διαφόρων τοπολογιών, πολιτικών δρομολόγησης και στρατηγικών διαχείρισης ροής. Το TrafPy ανήκει στην κατηγορία των εργαλείων παραγωγής τηλεπικοινωνιακής κίνησης (traffic generators) και επιτρέπει τη δημιουργία ρεαλιστικών ροών βασισμένων σε στατιστικά πρότυπα τα οποία έχουν αντληθεί από εμπειρικά δεδομένα πραγματικών υποδομών [17].

Η λειτουργικότητα του TrafPy υποστηρίζει τη δημιουργία πολλών τύπων ροών, μικρής και διάρκειας, καθώς και παραμέτρων όπως το μέγεθος της ροής, το χρονικό διάστημα μεταξύ αφίξεων (interarrival times), και η διάρκεια της σύνδεσης. Το εργαλείο βασίζεται στη γλώσσα Python και προσφέρει ευελιξία στη σύνταξη σεναρίων μέσω API και διασυνδέσεων προγραμματισμού, καθιστώντας το κατάλληλο για ακαδημαϊκές μελέτες και πρακτικές αξιολογήσεις τοπολογιών.

2.1.2 Μεθοδολογική Προσέγγιση και Χρήση TraFpy

Η μεθοδολογία βασίζεται στην ανάλυση δευτερογενούς βιβλιογραφίας και στην εφαρμογή προσομοιωτικού εργαλείου TraFpy. Μέσω της δημιουργίας και παρακολούθησης διαφορετικών σεναρίων, η εργασία εξετάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ ροής, τοπολογίας και εφαρμογών και αξιολογεί τη δυνατότητα πρόβλεψης της τηλεπικοινωνιακής συμπεριφοράς. Στην εργασία αυτή θα μελετηθούν τα δεδομένα προσομοίωσης σε πέντε κατηγορίες δικτύων κέντρων δεδομένων, οι οποίες είναι Κέντρο Δεδομένων Πανεπιστημίου (University), Κέντρο Δεδομένων Ιδιωτικής Επιχείρησης (Private Enterprise), Κέντρο Δεδομένων Εμπορικής Επιχείρησης (Commercial Cloud), Κέντρο Δεδομένων Εφαρμογών Κοινωνική Δικτύωσης (Social Media Cloud) και Κέντρο Δεδομένων TensorFlow για Τεχνητή Νοημοσύνη.

Η κύρια συμβολή του TrafPy εντοπίζεται στην ικανότητά του να ενσωματώνει πραγματικά πρότυπα κίνησης, βασισμένα σε εμπειρικά δεδομένα από διαφορετικά είδη υποδομών κέντρων δεδομένων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί δεδομένα που έχουν προκύψει από μελέτες σε πανεπιστημιακά, επιχειρησιακά και εμπορικού τύπου περιβάλλοντα, όπως και από πρωτογενείς αναλύσεις της φύσης των ροών σε μεγάλης κλίμακας υποδομές [2][23][24]. Κάθε κατηγορία εξυπηρετεί διαφορετικά είδη εφαρμογών, οδηγώντας σε διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά κίνησης, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την προσαρμογή των παραμέτρων προσομοίωσης στις ιδιαιτερότητες κάθε περιβάλλοντος [17].

Το TrafPy επιτρέπει τη μοντελοποίηση κρίσιμων χαρακτηριστικών, όπως η κατανομή του μεγέθους των ροών (flow size), οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων (interarrival times) και η ένταση της κίνησης ανά ζεύγος εξυπηρετητών. Η χρήση του TrafPy διευκολύνει τη μελέτη της αποδοτικότητας διαφορετικών τοπολογιών και πρωτοκόλλων σε συνθήκες

μεταβαλλόμενου ή σταθερού φορτίου. Για παράδειγμα, μέσω πειραματισμών με μεταβλητές όπως ο αριθμός των ταυτόχρονων ροών, το φορτίο κίνησης ή η μέθοδος δρομολόγησης, μπορεί να αξιολογηθεί η απόδοση της αρχιτεκτονικών υπό πραγματικές συνθήκες.

Τέλος, το TrafPy ενσωματώνει επίσης εργαλεία για τη δημιουργία γραφικών απεικονίσεων και στατιστικών αναφορών, συμβάλλοντας στην κατανόηση της συμπεριφοράς της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των ΔΚΛ.

2.2 Διαφορετικοί Τύποι Δικτύων Κέντρων Δεδομένων στο TrafPy: Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές

Το TrafPy παρέχει δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών τύπων δικτύων κέντρων δεδομένων, προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα και απαιτήσεις εφαρμογών. Η κατηγοριοποίηση αυτή βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα και αντικατοπτρίζει τις διαφορές στον τρόπο λειτουργίας, στη δομή των ροών και στις ανάγκες απόδοσης κάθε περιβάλλοντος. Οι διαφορές αυτές αφορούν πλήθος χαρακτηριστικών όπως η χωρική κατανομή της κίνησης, η διάρκεια και το μέγεθος των ροών, η μεταβλητότητα της έντασης, η καθυστέρηση, η προτεραιότητα μετάδοσης και το επίπεδο συμμετρίας στις επικοινωνίες [25].

2.2.1 Κέντρο Δεδομένων Πανεπιστημίου (University)

Τα πανεπιστημιακά ΔΚΛ εξυπηρετούν ανάγκες όπως εκπαιδευτικές πλατφόρμες, υπηρεσίες ηλεκτρονικής αλληλογραφίας, απομακρυσμένη πρόσβαση σε εξυπηρετητές, φιλοξενία ιστοσελίδων (web hosting) και διαμοιρασμό αρχείων. Κάποιες ακόμη εφαρμογές που εξυπηρετούνται περιλαμβάνουν συστήματα υποστήριξης μαθημάτων (e-class), πλατφόρμες αποθήκευσης και πολυμεσική μετάδοση (multicast video). Στα πανεπιστημιακά δίκτυα, οι τηλεπικοινωνιακές ροές που παρατηρούνται είναι ασυνεχείς και παρουσιάζουν σημαντική χρονική μεταβλητότητα, γεγονός που αντανάκλα τις εναλλαγές στη χρήση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Αναλυτικότερα, παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις τόσο στον όγκο όσο και στη διάρκεια των ροών, οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε αυξημένες απαιτήσεις για διαχείριση της συμφόρησης και επαρκή κατανομή πόρων [2][26].

2.2.2 Κέντρο Δεδομένων Ιδιωτικής Επιχείρησης (Private Enterprise)

Στα ΔΚΛ Ιδιωτικής Επιχείρησης οι κύριες εφαρμογές που συναντάται περιλαμβάνουν διαχείριση επιχειρησιακών δεδομένων (ERP), διαχείριση πελατειακών σχέσεων (CRM), εσωτερικά εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού και βάσεις δεδομένων. Στα δίκτυα αυτά, οι ροές χαρακτηρίζονται από υψηλή περιοδικότητα, συχνότητα και κανονικότητα, μεσαίου όγκου δεδομένα και χαμηλή μεταβλητότητα. Επίσης παρατηρείται ότι η κατανομή του φορτίου είναι σχετικά σταθερή, η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται κυρίως μέσω μικρομεσαίων ροών, οι οποίες ακολουθούν προβλέψιμα χρονικά μοτίβα. Οι ροές της συγκεκριμένης κατηγορίας εμφανίζουν συνήθως χαμηλή καθυστέρηση, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές κρίσιμες για την επιχειρησιακή λειτουργία. Στις παραπάνω υπηρεσίες περιλαμβάνονται διαδικασίες offline backup για την αποθήκευση εταιρικών δεδομένων, με χαμηλή χρονική προτεραιότητα και υλοποίηση σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα [2][27].

2.2.3 Κέντρο Δεδομένων Εμπορικής Επιχείρησης (Commercial Cloud)

Στα ΔΚΔ εμπορικού νέφους εστιάζουν στην υποστήριξη διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως αναζήτηση ιστού, εφαρμογές λογισμικού ως υπηρεσία (Software as a Service - SaaS), πλατφόρμες ως υπηρεσία (Platform as a Service - PaaS), ηλεκτρονικό εμπόριο (e-commerce) και βίντεο streaming. Στα δίκτυα αυτά οι ροές είναι κατά κύριο λόγο μικρές και σύντομες, με ιδιαίτερα υψηλή συχνότητα και χαμηλή καθυστέρηση, επειδή οι εφαρμογές αυτές εξαρτώνται από την ταχύτατη απόκριση και διαθεσιμότητα, καθώς καλούνται να εξυπηρετήσουν τεράστιο αριθμό χρηστών ταυτόχρονα [13][20]. Η κίνηση σε αυτά τα περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα εκρηκτική (bursty), με αρκετές αυξομειώσεις στον όγκο και τη διάρκεια των ροών, ενώ η ζήτηση διαφέρει δραματικά κατά τη διάρκεια της ημέρας [25].

2.2.4 Κέντρο Δεδομένων Εφαρμογών Κοινωνική Δικτύωσης (Social Media Cloud)

Η κατηγορία αυτή αφορά εφαρμογές που περιλαμβάνουν σε πραγματικό χρόνο ανταπόκριση σε διαδικτυακά αιτήματα (web requests), προσωρινή αποθήκευση δεδομένων (caching), σύνθεση εξατομικευμένων ροών ενημέρωσης (newsfeeds) και διαχείριση σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Οι τηλεπικοινωνιακές ροές σε αυτό το περιβάλλον είναι γενικά ομοιογενείς, η κίνηση παραμένει υψηλής συχνότητας αλλά είναι καλύτερα κατανοημένη και πιο ελεγχόμενη. Επιπλέον, οι απαιτήσεις για άμεση απόκριση είναι αυξημένες, καθώς οι χρήστες περιμένουν γρήγορη πρόσβαση σε προσωποποιημένο περιεχόμενο. Το εύρος ζώνης αξιοποιείται αποτελεσματικά, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα πλήθος συνδέσεων και μεταφορές δεδομένων με συνεχή ροή [27]. Οι ροές είναι μικρού έως μεσαίου μεγέθους, συχνά με χαμηλή καθυστέρηση, και απαιτούν υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία, ώστε να διατηρείται η εμπειρία του τελικού χρήστη [25].

2.3.5 Κέντρο Δεδομένων TensorFlow για Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται εφαρμογές που αφορούν εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης και αναλύσεις μεγάλων δεδομένων (big data analytics). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί η πλατφόρμα TensorFlow της Google, η οποία περιγράφεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά [4]. Οι τηλεπικοινωνιακές ροές σε τέτοια δίκτυα παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συμμετρίας, έχουν μεγάλο όγκο, υψηλό ρυθμό μετάδοσης και μεγάλη διάρκεια ζωής, γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά το δίκτυο [19][23]. Οι εκρήξεις κίνησης (bursts) παρατηρούνται συχνά κατά την έναρξη και την ολοκλήρωση των υπολογιστικών διεργασιών, απαιτώντας αποτελεσματικές τεχνικές απορρόφησης φόρτου (buffering) και προσαρμοστικές πολιτικές δρομολόγησης (adaptive routing) [15]. Οι ροές αυτές επιδεικνύουν έντονη και συνεχόμενη δραστηριότητα, είναι κυρίως ενδοκεντρικές και απαιτούν σταθερή, υψηλής απόδοσης υποδομή. Επιπλέον, οι διαδικασίες αποθήκευσης των μοντέλων και των δεδομένων εκπαίδευσης εκτελούνται σε προγραμματισμένες φάσεις με χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης, επιτρέποντας τη βελτιστοποιημένη χρήση πόρων [28].

2.3 Παράμετροι Προσομοίωσης Κίνησης στο TrafPy

2.3.1 Μέγεθος Ροής (Flow Size)

Το μέγεθος των ροών αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες για τη μοντελοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Στο TrafPy, το μέγεθος μπορεί να οριστεί μέσω προσαρμοσμένων κατανομών, όπως η εκθετική, η Pareto ή η κατανομή πραγματικών δεδομένων. Η κατανομή των μεγεθών ροών που υλοποιείται στο TrafPy βασίζεται σε

ρεαλιστικά μοτίβα κίνησης που έχουν καταγραφεί σε λειτουργικά περιβάλλοντα κέντρων δεδομένων. Επίσης, η απεικόνιση των μεγεθών αυτών με γραφήματα παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο παρατήρησης και ανάλυσης της συχνότητας εμφάνισης μικρών ροών έναντι μεγάλων, επιτρέποντας τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο καταναλώνεται το εύρος ζώνης και επηρεάζεται η ποιότητα υπηρεσίας.

Η κατανόηση αυτών των μοτίβων είναι ουσιώδης για τον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης, τη διαμόρφωση πολιτικών δρομολόγησης και την προσαρμογή των στρατηγικών εξισορρόπησης φορτίου. Παράλληλα, με την παραμετροποίηση του εύρους μεγέθους ροών, το TrafPy επιτρέπει τη δημιουργία σεναρίων υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτου, ενισχύοντας την αξιοπιστία και τη ρεαλιστικότητα των πειραμάτων προσομοίωσης και παρέχει τη δυνατότητα διερεύνησης της στατιστικής κατανομής των ροών, που είναι χαρακτηριστική σε πραγματικά δίκτυα κέντρων δεδομένων.

Ως εκ τούτου, η ευελιξία στον ορισμό και την ανάλυση των μεγεθών ροών αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό της προσομοίωσης στο TrafPy, διευκολύνοντας τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου και την εξαγωγή συμπερασμάτων με πρακτική αξία για τον σχεδιασμό Δικτύων Κέντρων Δεδομένων [25][29].

2.3.2 Χρονικά Διαστήματα μεταξύ Αφίξεων Ροών (Interarrival Times)

Τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων πακέτων αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη μελέτη της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, καθώς αποτυπώνουν τη χρονική συχνότητα εμφάνισης νέων αιτημάτων ή μεταδόσεων στο δίκτυο. Μέσω της γραφικής απεικόνισής τους, το TrafPy επιτρέπει την εύκολη αναγνώριση κρίσιμων χρονικών μοτίβων, όπως τα σημεία συμφόρησης, οι μεταβαλλόμενοι ρυθμοί άφιξης και οι διακυμάνσεις της ζήτησης.

Η δυνατότητα επιλογής κατανομών όπως η Poisson και η Erlang επιτρέπει στο χρήστη να προσομοιώσει με ακρίβεια σενάρια εφαρμογών που κυμαίνονται από σταθερής συχνότητας αιτήματα (π.χ. συστήματα ελέγχου αποθεμάτων ή υπηρεσίες βάσεων δεδομένων) έως εφαρμογές υψηλής αβεβαιότητας και απότομων αιχμών (π.χ. big data analytics, μετάδοση πολυμέσων).

Αυτή η ευελιξία παραμετροποίησης ενισχύει τη ρεαλιστικότητα των προσομοιώσεων και επιτρέπει την ακριβή αξιολόγηση της επίδοσης πρωτοκόλλων δρομολόγησης και εξισορρόπησης, συμβάλλοντας στην αποτύπωση της συμπεριφοράς του δικτύου υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτου και στη δοκιμή της ανθεκτικότητας του σχεδιασμού του δικτύου σε χρονικές μεταβολές της κίνησης. [25]

2.3.3 Χάρτης Θερμικής Έντασης (Heatmap)

Το TrafPy ενσωματώνει δυνατότητα απεικόνισης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέσω χαρτών θερμικής έντασης (heatmaps). Οι χάρτες αυτοί απεικονίζουν την ένταση της κίνησης μεταξύ των κόμβων του Δικτύου Κέντρου Δεδομένων, επισημαίνοντας περιοχές με συμφόρηση, διαδρομές με αυξημένο ρυθμό μετάδοσης καθώς και περιοχές με χαμηλή ή μηδενική δραστηριότητα.

Αυτός ο τύπος αναπαράστασης παρέχει μια περιεκτική εικόνα της χωρικής κατανομής της κίνησης και διευκολύνει την κατανόηση της λειτουργίας του δικτύου υπό διαφορετικές συνθήκες. Μέσω της απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο ή βάσει καταγεγραμμένων δεδομένων, μπορούν να εντοπιστούν σημεία υπερφόρτωσης, να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα πολιτικών δρομολόγησης και να γίνουν διορθωτικές παρεμβάσεις στο σχεδιασμό του συστήματος.

Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην προσομοίωση, καθώς βοηθά στην ταυτοποίηση αναποτελεσματικών διαδρομών ή ανισοκατανομής φόρτου, βελτιώνοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τοπολογικό σχεδιασμό, δρομολόγηση και στρατηγικές

εξισορρόπησης φορτίου. Η χρήση τέτοιων οπτικών εργαλείων αποτελεί επομένως κρίσιμο στοιχείο για την εμπεριστατωμένη αξιολόγηση της συμπεριφοράς ενός ΔΚΔ σε συνθήκες προσομοιωμένης κίνησης [25].

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία και Προσομοίωση Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

3.1 Παράμετροι Παραγόμενης Κίνησης

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο αναλύονται οι παράμετροι του TrafPy για τον έλεγχο του φορτίου και των ροών.

3.1.1 Φορτίο

Το φορτίο τηλεπικοινωνιακής κίνησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων, καθώς σχετίζεται άμεσα με δείκτες όπως η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων και η συνολική απόδοση του συστήματος. Το φορτίο κίνησης ορίζεται ως το ποσοστό χρήσης της διαθέσιμης χωρητικότητας των συνδέσεων του δικτύου σε δεδομένο χρονικό διάστημα.

Στο TrafPy, το φορτίο εκφράζεται μέσω της παραμέτρου *target_load_fraction*, η οποία δηλώνει το ποσοστό του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η παράμετρος αυτή αποτελεί μέρος της δομής *network_load_config*, που εμπεριέχει επίσης τις μεταβλητές *ep_link_capacity* και *network_rate_capacity* για τη ρύθμιση της χωρητικότητας των ζευξέων και την αντιστοίχιση της επιθυμητής έντασης ροής.

Επιπλέον, ο χρονισμός των ροών καθορίζεται από τις παραμέτρους *min_demand_arrival_time* και *max_demand_arrival_time*, οι οποίες καθορίζουν το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο μπορούν να εμφανιστούν οι αφίξεις των ροών, ενώ η παράμετρος *max_last_demand_arrival_time* θέτει το ανώτατο χρονικό όριο εντός του οποίου μπορεί να ξεκινήσει η τελευταία ροή, επηρεάζοντας έτσι τον συνολικό χρονικό ορίζοντα της παραγωγής κίνησης. Η χρήση αυτών των μεταβλητών επιτρέπει την προσομοίωση περιβαλλόντων με διαφορετικά προφίλ χρονικής κατανομής της κίνησης, όπως σενάρια με αυξανόμενη ένταση, περιοδικότητα ή μεταβαλλόμενη δυναμική, ενισχύοντας έτσι τη ρεαλιστικότητα και την ευελιξία της προσομοίωσης.

Το TrafPy στοχεύει στη ρεαλιστική προσομοίωση traffic patterns βασισμένων σε workloads που συναντώνται σε πανεπιστημιακά ή εμπορικά δίκτυα, και επομένως το φορτίο έχει εμπειρικό υπόβαθρο (data-driven) [2]. Η καταγραφή της έντασης και του χρονισμού των ροών παρέχει τη βάση για την ανάπτυξη τεχνικών πρόβλεψης, δυναμικής δρομολόγησης και προσαρμοστικής διαχείρισης συμφόρησης

3.1.2 Ροές

Οι ροές (flows) αποτελούν τη βασική μονάδα μεταφοράς δεδομένων στα Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων και αποτελούνται από διαφορετικά χαρακτηριστικά, όσον αφορά το μέγεθος, τη διάρκεια, τον ρυθμό μετάδοσης και τη συχνότητα εμφάνισης. Το TrafPy προσφέρει μια ευέλικτη πλατφόρμα για τη μοντελοποίησή τους, επιτρέποντας τη δημιουργία τόσο μικρών όσο και μεγάλων ροών βάσει παραμετροποιησιμων ρυθμίσεων.

Συγκεκριμένα, η παραμετροποίηση περιλαμβάνει τις μεταβλητές *min_num_demands* και *max_num_demands*, οι οποίες ορίζουν αντίστοιχα τον ελάχιστο και τον μέγιστο αριθμό ροών (demands) που παράγονται ανά κύκλο προσομοίωσης. Οι παράμετροι αυτοί προσδιορίζουν τη διακύμανση στην παραγωγή ροών για κάθε γύρο προσομοίωσης, επιτρέποντας στο TrafPy να προσομοιώσει τόσο σταθερά όσο και δυναμικά σενάρια δικτυακής δραστηριότητας. Οι ροές αυτές διανέμονται στο καθορισμένο χρονικό εύρος και προσφέρουν ευελιξία στην προσαρμογή της έντασης της κίνησης ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειραματικού σεναρίου. Επιπρόσθετες παράμετροι όπως *min_demand_size*,

max_demand_size, min_demand_duration και max_demand_duration προσφέρουν έλεγχο στη μοντελοποίηση του μεγέθους και της διάρκειας των ροών, ενισχύοντας τον ρεαλισμό της προσομοίωσης.

Παράλληλα, η Jensen-Shannon απόκλιση είναι ένα μέτρο στατιστικής απόστασης ανάμεσα σε δύο πιθανότητες κατανομής - στην προκειμένη περίπτωση, ανάμεσα στην επιθυμητή χωρική κατανομή της κυκλοφορίας και την ομοιόμορφη (ή αναμενόμενη) κατανομή. Μια τιμή JSD κοντά στο 0 υποδηλώνει ότι η τελική κατανομή των ροών είναι πολύ κοντά στην ομοιόμορφη, δηλαδή οι κόμβοι στέλνουν και λαμβάνουν δεδομένα με περίπου ίσες πιθανότητες. Αντίθετα, τιμές πλησιέστερες στο 1 υποδεικνύουν ότι η κίνηση είναι πολύ πιο ασύμμετρα κατανεμημένη, δηλαδή υπάρχουν σαφώς διακεκριμένοι κόμβοι με υψηλή ή χαμηλή δραστηριότητα [25].

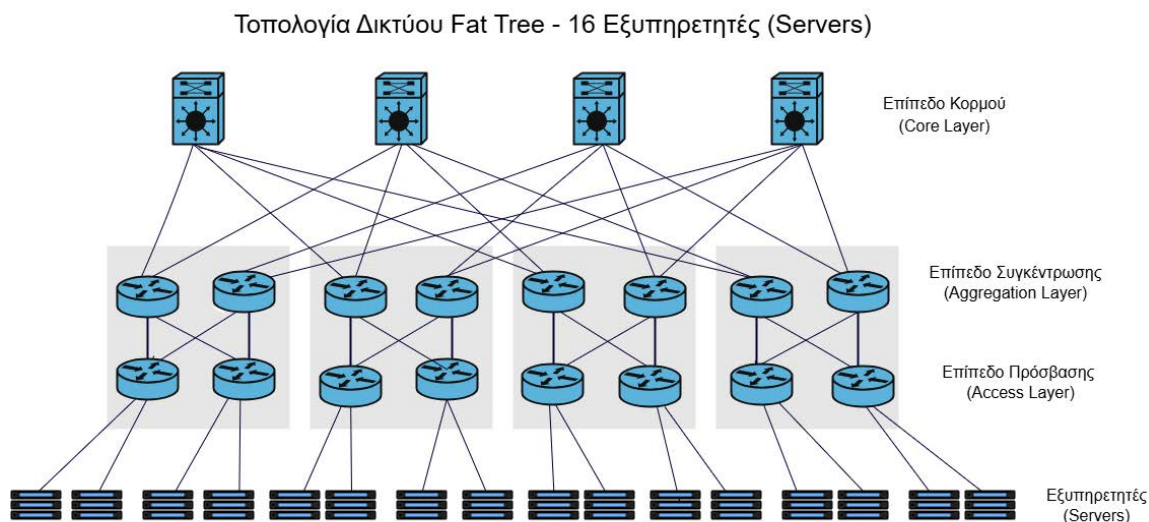
Η λεπτομερής παραμετροποίηση που προσφέρει το TrafPy για τη δημιουργία ροών επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων και ρεαλιστικών σεναρίων κυκλοφορίας, τα οποία αντικατοπτρίζουν διαφορετικά λειτουργικά είδη εφαρμογών σε ΔΚΔ. Η δυνατότητα ελέγχου κρίσιμων χαρακτηριστικών, όπως ο αριθμός, η διάρκεια, το μέγεθος και ο χρόνος άφιξης των ροών, καθιστά εφικτή την αναπαραγωγή συνθηκών τόσο κανονικής λειτουργίας όσο και καταστάσεων αιχμής. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση με ακρίβεια της επίδρασης των ροών σε πρωτόκολλα, τοπολογίες και μηχανισμούς διαχείρισης, οδηγώντας σε πιο αποδοτικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς των ΔΚΔ υπό ποικίλα φορτία.

3.2 Συγκρινόμενες Τοπολογίες

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει η επιλογή της αρχιτεκτονικής του δικτύου, αφού έχει άμεση σχέση με την απόδοση, την επεκτασιμότητα και την ανθεκτικότητα. Δύο από τις πιο διαδεδομένες και αποτελεσματικές τοπολογίες που έχουν αντικαταστήσει τα παραδοσιακά δίκτυα τριών επιπέδων είναι οι Fat Tree και Leaf Spine. Οι δύο αυτές τοπολογίες στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας εντός των κέντρων δεδομένων αλλά παρουσιάζουν διακριτά χαρακτηριστικά και προσφέρουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

3.2.1 Τοπολογία Fat Tree

Η τοπολογία Fat Tree αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες αρχιτεκτονικές για κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας, αναπτύχθηκε αρχικά για υπερυπολογιστές και στη συνέχεια υιοθετήθηκε ευρέως στα κέντρα δεδομένων. Η δομή της βασίζεται στην ιεραρχική αρχή των τριών επιπέδων, το επίπεδο κορμού (core layer), το επίπεδο συγκέντρωσης (aggregation) και το επίπεδο πρόσβασης (access-edge layer), όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3*.



Σχήμα 7 Διάγραμμα Τοπολογίας Fat Tree για 16 Εξυπηρετητές

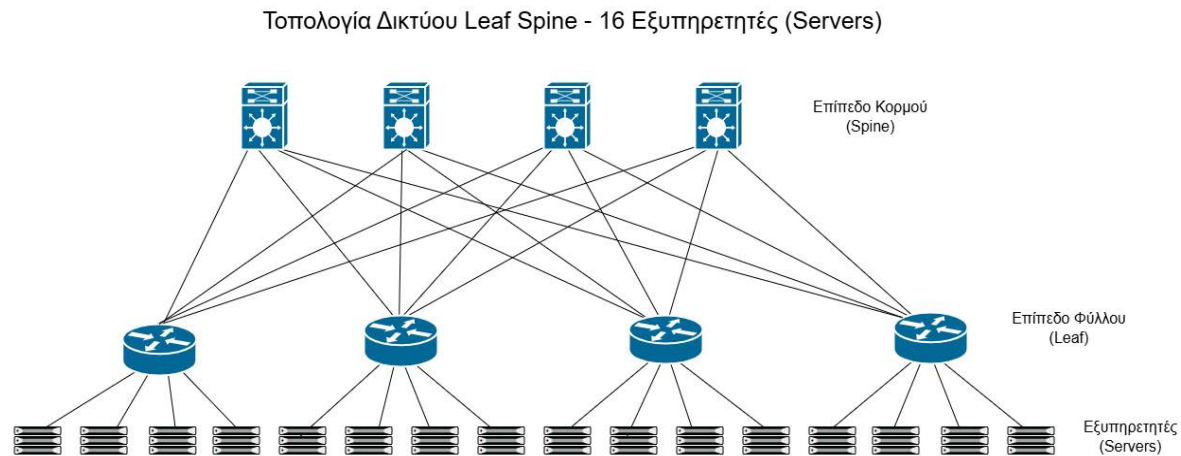
Ένα βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι κάθε μεταγωγέας πρόσβασης (access switch) συνδέεται με όλους τους μεταγωγείς συγκέντρωσης (aggregation switches) στην ίδια μονάδα καθώς και κάθε μεταγωγέας συγκέντρωσης συνδέεται με όλους τους μεταγωγείς κορμού (core switches). Αυτή η πολλαπλή σύνδεση εξασφαλίζει πολλές διαδρομές μεταξύ οποιονδήποτε δύο σημείων, μειώνοντας την πιθανότητα συμφόρησης με την χρήση των πολλαπλών διαδρομών (multipath routing) [30] [31]. Έτσι, λόγω των πολλαπλών διαδρομών, μπορεί να διαχειριστεί υψηλούς όγκους δεδομένων, ειδικά με τη χρήση προσαρμοστικής δρομολόγησης (adaptive routing) και αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου. Η συμμετρική της δομή επιτρέπει επίσης την ισόρροπη κατανομή της βελτιώνοντας την αξιοπιστία και ανθεκτικότητα του συστήματος [32]. Το κύριο χαρακτηριστικό της τοπολογίας Fat Tree είναι ότι χρησιμοποιεί ισοδύναμες διαδρομές ανάμεσα σε κάθε ζεύγος κόμβων, γεγονός που την καθιστά ιδανική για την εφαρμογή τεχνικών ισόρροπης κατανομής φόρτου.

Επιπλέον, βασικό χαρακτηριστικό της τοπολογίας είναι η υψηλή επεκτασιμότητά της, καθώς μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό εξυπηρετητών με τη χρήση μεταγωγέων γενικής χρήσης (commodity switches), αυτό την καθιστά οικονομικά αποδοτική, αφού δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό. [32], [33]. Ωστόσο, η Fat Tree παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα στον έλεγχο και τη δρομολόγηση, ενώ απαιτεί σημαντική δαπάνη για την υποδομή καλωδίωσης. Επίσης, η στατική κατανομή των διαδρομών μπορεί να οδηγήσει σε ατελή αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης υπό συνθήκες bursty traffic. Παρ' όλα αυτά, η τοπολογία Fat Tree αποτελεί βασικό σημείο αναφοράς για πειράματα και αξιολόγηση απόδοσης [34] [35].

3.2.2 Τοπολογία Leaf-Spine

Η αρχιτεκτονική Leaf-Spine αποτελεί μια σύγχρονη και εξαιρετικά αποδοτική λύση για την υποστήριξη των αυξανόμενων απαιτήσεων σε εύρος ζώνης και παράλληλη επεξεργασία στα κέντρα δεδομένων. Η τοπολογία βασίζεται σε δύο επίπεδα: το επίπεδο φύλλου (leaf layer), με τους μεταγωγείς φύλλων (leaf switches) που συνδέονται με τους εξυπηρετητές (servers), και το επίπεδο κορμού (spine layer), με τους μεταγωγείς κορμού (spine

switches) που διασυνδέουν τους μεταγωγείς φύλλων (leaf switches) μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8 Διάγραμμα Τοπολογίας Leaf Spine για 16 Εξυπηρετητές

Με τη δομή αυτή, όλη η κίνηση μεταξύ των μεταγωγέων φύλλων περνάει μέσω των μεταγωγέων κορμού, έτσι κάθε μεταγωγέας φύλλου συνδέεται με όλα τους μεταγωγείς κορμού, εξασφαλίζοντας μία ισομερή και χαμηλής καθυστέρησης διαδρομή για κάθε πιθανό ζεύγος πηγής-προορισμού καθώς και μειώνεται σημαντικά τη συμφόρηση σε σχέση με την παραδοσιακή τριεπίπεδη τοπολογία, προσφέροντας γραμμική επεκτασιμότητα και προβλέψιμη απόδοση [36]. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της τοπολογίας Leaf Spine είναι η ισομετρική κατανομή του εύρους ζώνης (bandwidth) αφού όλοι οι εξυπηρετητές έχουν πρόσβαση στο ίδιο πλήθος μεταγωγέων κορμού [36], [37]. Αυτό την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις σε east-west traffic, όπως συμβαίνει στις εφαρμογές μηχανικής μάθησης και big data analytics.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της Leaf Spine είναι επεκτασιμότητα. Μπορεί να επεκταθεί γραμμικά με την προσθήκη νέων μεταγωγέων φύλλων για τη σύνδεση περισσότερων εξυπηρετητών, ή νέων μεταγωγέων κορμού για την αύξηση του συνολικού εύρους ζώνης. Η αποτυχία ενός μεταγωγέα κορμού δεν επηρεάζει τη συνδεσιμότητα, καθώς η κυκλοφορία ανακατευθύνεται αυτόματα μέσω των άλλων ενεργών μεταγωγέων κορμού, εξασφαλίζοντας υψηλή διαθεσιμότητα. Επίσης οι απαιτήσεις για πλήρη συνδεσιμότητα μεταξύ μεταγωγέων φύλλων και μεταγωγέων κορμού οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και κόστος διασύνδεσης, το οποίο σε μεγάλες εγκαταστάσεις μπορεί να γίνει σημαντικό [37], [39].

Συνολικά, η τοπολογία Leaf-Spine υπερέχει σε περιβάλλοντα με απαιτήσεις υψηλής απόδοσης, ευελιξίας και χαμηλής καθυστέρησης, γεγονός που την καθιστά ιδανική επιλογή για μοντέρνα υπολογιστικά κέντρα μεγάλης κλίμακας.

3.3 Παράμετροι Προσομοίωσης

Κατά την προσομοίωση των ροών στο TrafPy, χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος Jensen-Shannon divergence (JSD) με τιμή 0.6 ως κριτήριο διαφοροποίησης στην επιλογή των προορισμών για τις ροές. Στο πλαίσιο του πειράματος, η τιμή αυτή υποδηλώνει μια μέτρια απόκλιση από την ομοιόμορφη κατανομή ροών, κάτι που συνεπάγεται περισσότερο ρεαλιστική κίνηση. Η προσομοίωση με τέτοια τιμή επιτρέπει στο TrafPy να δημιουργεί

σενάρια όπου ορισμένοι κόμβοι λειτουργούν ως σημεία συμφόρησης ή συχνοί δέκτες/αποστολείς, προσεγγίζοντας έτσι καλύτερα την πραγματική λειτουργία ενός ΔΚΔ, όπου συγκεκριμένες εφαρμογές, βάσεις δεδομένων ή εξυπηρετητές συγκεντρώνουν σημαντικό όγκο κυκλοφορίας.

Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τις βασικές ποσοτικές παραμέτρους των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μέσω του εργαλείου TrafPy, για τις δύο υπό μελέτη τοπολογίες: Fat Tree και Leaf-Spine. Οι παράμετροι που αναλύονται είναι: το φορτίο κίνησης (Gbps), ο αριθμός παραγόμενων ροών, και ο αριθμός των server σε κάθε δίκτυο. Οι τοπολογίες της προσομοίωσης απεικονίζονται στα Σχήμα 3 και Σχήμα 4 και ο αριθμός των server είναι 16 όπως βλέπουμε στον Πίνακα 1.

Παρατηρείται ότι σε όλα τα σενάρια, εκτός του TensorFlow, ο αριθμός παραγόμενων ροών παραμένει σταθερός 6000, γεγονός που απορρέει από την δειγματοληψία του TraFpy και την ικανοποίηση της παραμέτρου JSD. Εξαιρέση αποτελεί το TensorFlow workload, όπου ο αριθμός ροών είναι σημαντικά υψηλότερος (48.816 ροές), αντανακλώντας τη φύση της εφαρμογής.

Το φορτίο κίνησης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 πρέπει να παραμένει σταθερό ανά τοπολογία για να γίνει η σύγκριση της επιρροής των τοπολογιών καθώς και των εφαρμογών στην κίνηση. Στην τοπολογία Fat Tree όπως και στην Leaf-Spine το φορτίο κίνησης καταγράφεται στα 128 Gbps, για όλα τα workloads, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, γεγονός που επιτρέπει άμεση συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης κάθε τοπολογίας υπό ίδιες συνθήκες κίνησης και που επιτεύχθηκε με τη χρήση του target load fraction που ορίστηκε στη διαδικασία παραγωγής ροών μέσω του εργαλείου προσομοίωσης. Η τοπολογία Fat Tree ορίστηκε με τις παραμέτρους $k=4$ για τους μεταγωγείς κορμού που οδηγεί σε 16 εξυπηρετητές, $L=2$ για το βάθος της ιεραρχίας, και $n=4$ για τον αριθμό μεταγωγέων. Οι χωρητικότητες κάθε συνδέσμου της τοπολογίας διαμορφώθηκαν μέσω των παραμέτρων *server_to_rack_channel_capacity* ίση με 2.1 Gbps, *rack_to_edge_channel_capacity* ίση με 0.002 Gbps, *edge_to_agg_channel_capacity* ίση με 0.001 Gbps και *agg_to_core_channel_capacity* = 4.4 Gbps. Για την τοπολογία Leaf-Spine χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση *create_leaf_spine* με παραμέτρους *num_leaves*=4, *num_spines*=4 και *servers_per_leaf*=4, δημιουργώντας επίσης δίκτυο με 16 εξυπηρετητές. Η παράμετρος *ep_capacity* = 10e9 όρισε τη χωρητικότητα των συνδέσεων από κάθε server προς το leaf switch σε 10 Gbps, τιμή που ευθυγραμμίζεται με χαρακτηριστικά σύγχρονων data centers. Η απεικόνιση των δύο τοπολογιών όπως προσομοιώθηκαν απεικονίζεται στα Σχήμα 7 και Σχήμα 8.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος *target_load_fraction* ως δείκτης ελέγχου του φόρτου κίνησης που διοχετεύεται στο δίκτυο. Η παράμετρος αυτή καθορίζει το ποσοστό της μέγιστης θεωρητικής χωρητικότητας που αξιοποιείται από τον generator. Για την τοπολογία Fat Tree η τιμή ορίστηκε σε 0.95, ενώ στην τοπολογία Leaf-Spine επιλέχθηκε τιμή 0.1.

Με τον συνδυασμό των παραμέτρων αυτών ήταν δυνατή η σύγκριση τόσο διαφορετικών τοπολογιών όσο και διαφορετικών καταστάσεων χρησιμοποίησης, με χαρακτηριστικό αποτέλεσμα την επίτευξη συνολικού φορτίου στα 128 Gbps και για τις δύο τοπολογίες. Το φορτίο κίνησης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 παραμένει σταθερό γεγονός που επιτρέπει άμεση συγκριτική αξιολόγηση της επιρροής των τοπολογιών καθώς και των εφαρμογών στην κίνηση.

Πίνακας 1 Στατιστικά Στοιχεία για Τοπολογίες Fat Tree και Leaf Spine (Φορτίο Κίνησης (Gbps), Παραγόμενες Ροές, Σύνολο Μεγέθους Ροών (GB))

	Fat Tree			Leaf Spine		
	Φορτίο Κίνησης (Gbps)	Παραγόμενες Ροές	Αριθμός Server	Φορτίο Κίνησης (Gbps)	Παραγόμενες Ροές	Αριθμός Server
University	128	6000	16	128	6000	16
Private Enterprise	128	6000	16	128	6000	16
Commercial Cloud	128	6000	16	128	6000	16
Social Media Cloud	128	6000	16	128	6000	16
TensorFlow	128	48816	16	128	48816	16

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.1 Παραγόμενη Κίνηση για την Τοπολογία Fat Tree

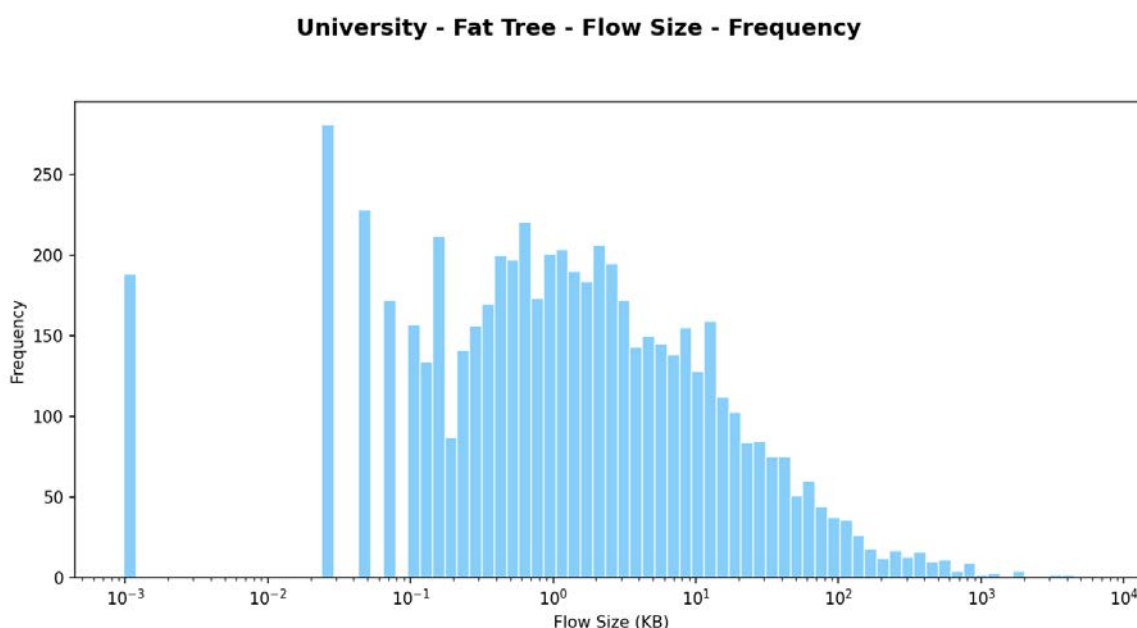
Στο υποκεφάλαιο 4.1 παρουσιάζεται η κίνηση που παράχθηκε στην προσομοίωση στα τα πέντε δίκτυα κέντρων δεδομένων για την τοπολογία Fat Tree.

4.1.1 Κέντρο Δεδομένων Πανεπιστημίου (University)

Στα υποκεφάλαια 4.1.1.1, 4.1.1.2, και 4.1.1.3 αναλύονται οι γραφικές παραστάσεις ΔΚΔ Πανεπιστημίου για το μέγεθος ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση, με τα σχήματα που αναπαριστούν την προσομοίωση της κίνησης για την τοπολογία Fat Tree.

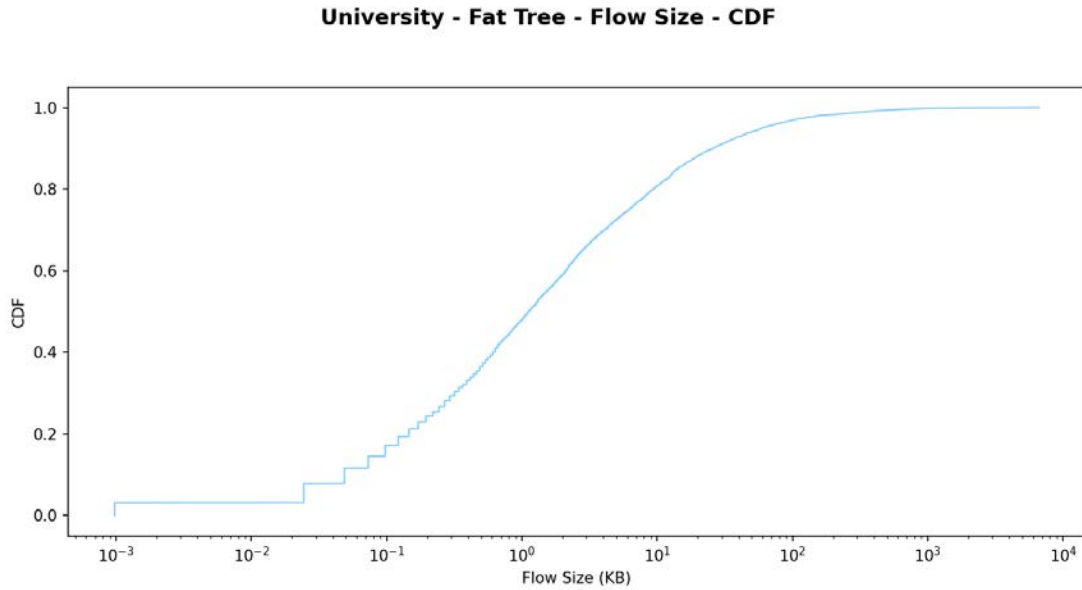
4.1.1.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα για το μέγεθος της ροής στην τοπολογία Fat Tree παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέρος των ροών μεταξύ 10^{-2} και 10^{-1} KB, όπως φαίνεται και από τις κορυφές που δημιουργούνται στο Σχήμα 5. Μετά το 1 KB υπάρχει σταδιακή μείωση καθώς αυξάνονται οι διαστάσεις των ροών, υποδηλώνοντας έναν τυπικό συνδυασμό μικρών και μεσαίου μεγέθους ροών με περιστασιακές μεγαλύτερες μεταφορές. Η παρουσία ορισμένων πολύ μεγάλων ροών, έως και 102 KB και πάνω, δείχνει ότι το δίκτυο υποστηρίζει επίσης λειτουργίες που απαιτούν μεγάλες ποσότητες δεδομένων, κάτι που ανταποκρίνεται στις αναμενόμενες εργασίες στα πανεπιστημιακά ΔΚΔ.



Σχήμα 9 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για University Workload

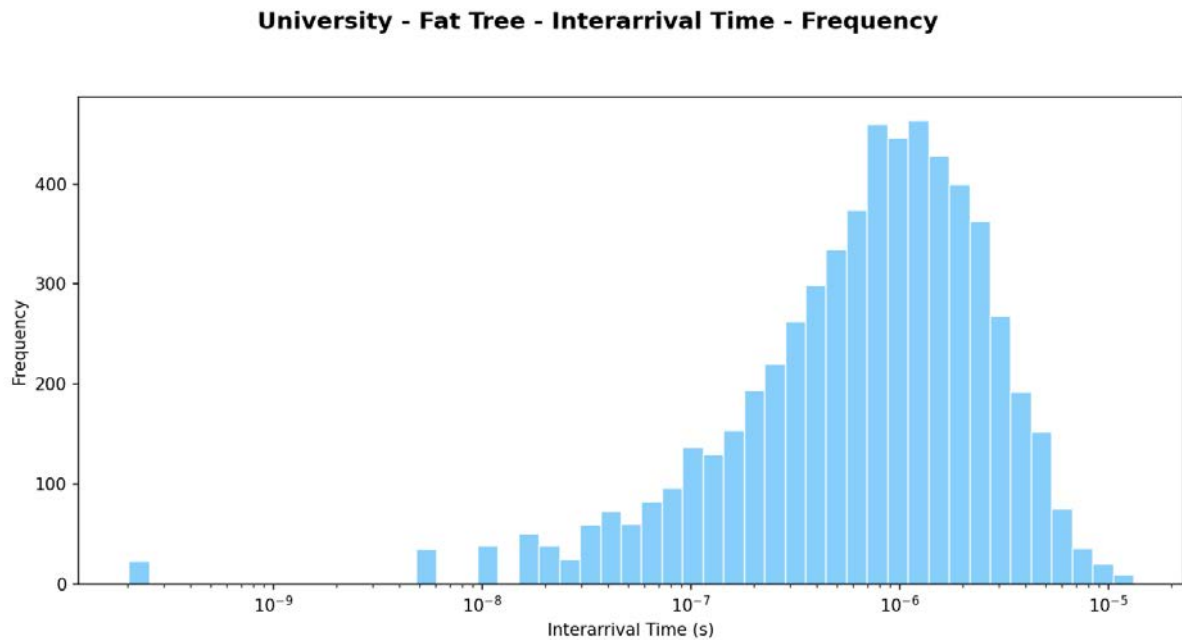
Ο πίνακας CDF του Σχήματος 6 ενισχύει αυτή την ερμηνεία. Σχεδόν το 80% των ροών είναι κάτω από περίπου 10 KB, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή παρουσία ελαφρών επικοινωνιών, όπως μηνύματα, αιτήματα και σήματα ελέγχου. Η απότομη κλίση στο μεσαίο τμήμα του CDF υπογραμμίζει περαιτέρω ότι ένα μεγάλο μέρος των ροών είναι στενά ομαδοποιημένο σε αυτό το εύρος, παρουσιάζοντας μια σχετικά προβλέψιμη κατανομή του μεγέθους.



Σχήμα 10 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για University Workload

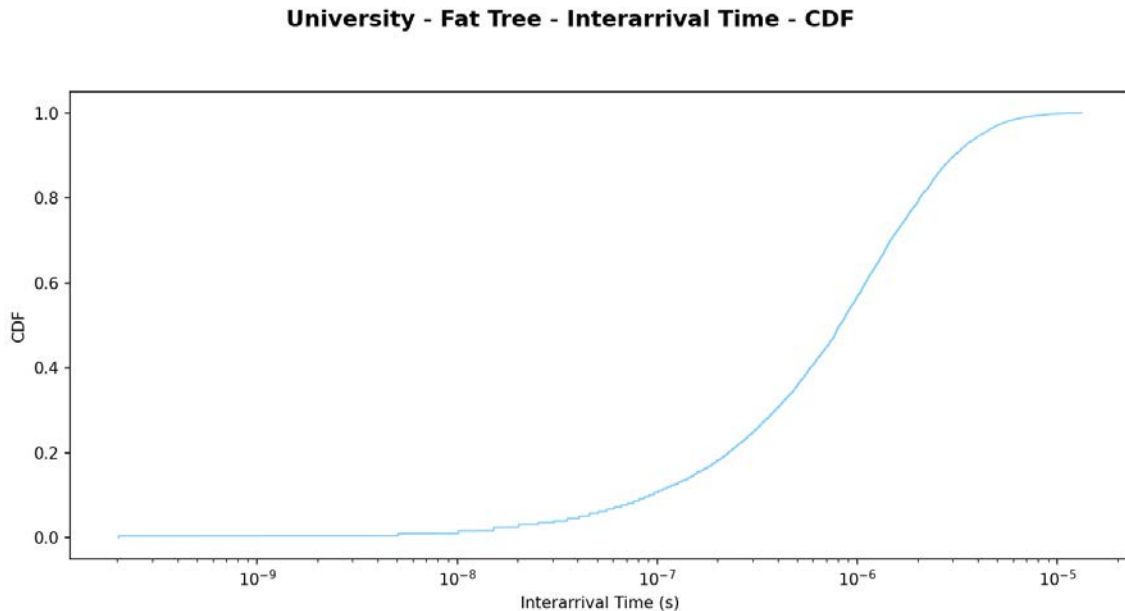
4.1.1.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Οι χρόνοι διαδοχικής άφιξης επικεντρώνονται μεταξύ 10^{-8} και 10^{-5} δευτερολέπτων, όπως φαίνεται από την καμπύλη του Σχήματος 11. Οι μεγαλύτερες κορυφές παρουσιάζονται κοντά στα 10^{-6} δευτερόλεπτα, που υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο πλήθος των αφίξεων γίνεται σε αυτό το χρονικό φάσμα. Αυτό υποδεικνύει ένα μοτίβο μετάδοσης υψηλής συχνότητας, πιθανότατα που προκαλείται από διακοπτόμενες, διαδραστικές εργασίες, όπως ερωτήματα ιστού, υπηρεσίες cloud ή διανεμημένες εφαρμογές.



Σχήμα 11 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για University Workload

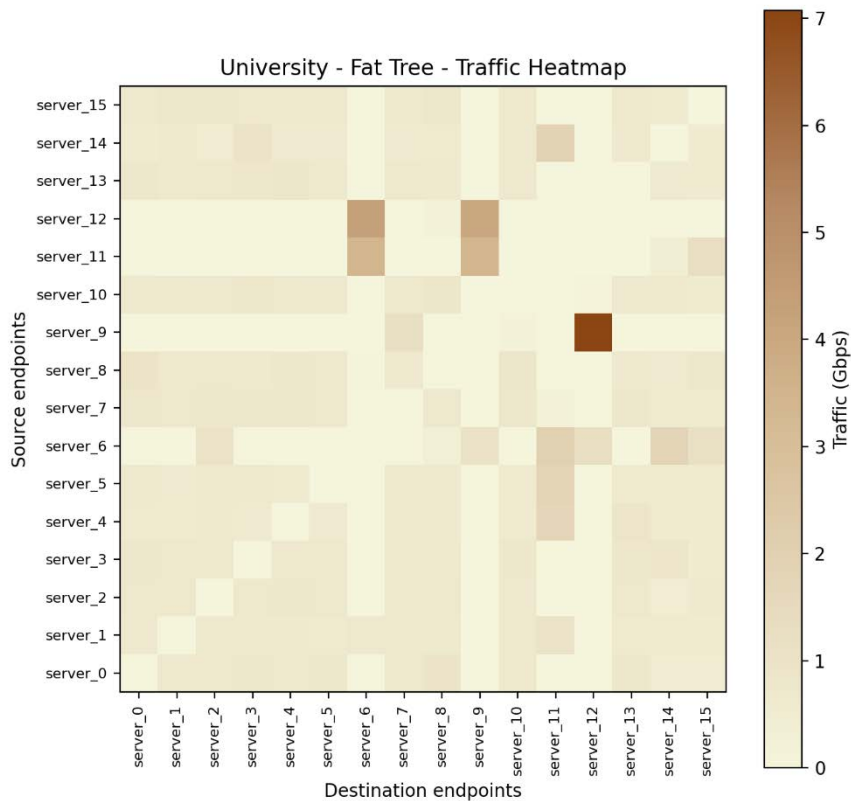
Η CDF των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των αφίξεων δείχνει ότι περίπου το 60% των ροών φτάνει εντός της τάξης των 10^{-6} δευτερολέπτων, επιβεβαιώνοντας ένα μοτίβο όπου οι περισσότερες αφίξεις απέχουν μεταξύ τους μερικά μικροδευτερόλεπτα. Το μοτίβο που παρατηρείται στο *Σχήμα 12* υποδεικνύει μια τοπολογία που εξυπηρετεί συχνή και πυκνή επικοινωνία, χαρακτηριστικό σε περιβάλλοντα με πολλούς ενεργούς χρήστες και υπηρεσίες υποβάθρου.



Σχήμα 12 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών και στην Τοπολογία Fat Tree για University Workload

4.1.1.3 Διάγραμμα θερμικής έντασης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας της κατανομής της κίνησης υποδεικνύει ένα ομοιόμορφο πρότυπο αλληλεπίδρασης, με λίγα σημεία υψηλής έντασης. Ορισμένα ζεύγη πηγή-προορισμός εμφανίζονται πιο σκούρα, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 13* υποδεικνύοντας εντοπισμένες προτιμήσεις επικοινωνίας, με την εντονότερη επικοινωνία να είναι της τάξης των 7 Gbps. Ωστόσο, δεν υπάρχει ένας μοναδικός δίαυλος ροής που να κυριαρχεί στο θερμικό χάρτη, υπονοώντας ισορροπημένη κατανομή φορτίου, ένα ισχυρό δείγμα των ικανοτήτων της τοπολογίας Fat Tree για αποτελεσματική διασπορά κίνησης.



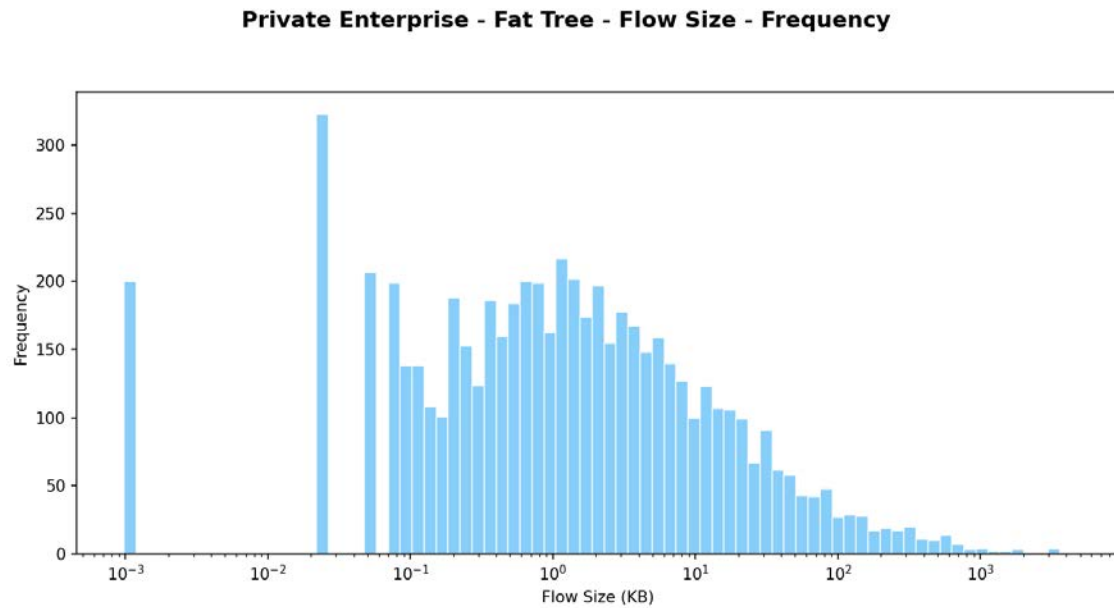
Σχήμα 13 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Fat Tree για University Workload

4.1.2 Κέντρο Δεδομένων Ιδιωτικής Επιχείρησης (Private Enterprise)

Παρακάτω στα υποκεφάλαια 4.1.2.1, 4.1.2.2, και 4.1.2.3 βλέπουμε τις γραφικές παραστάσεις για το ΔΚΔ Ιδιωτικής Επιχείρησης με τα μεγέθη ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση για την τοπολογία Fat Tree.

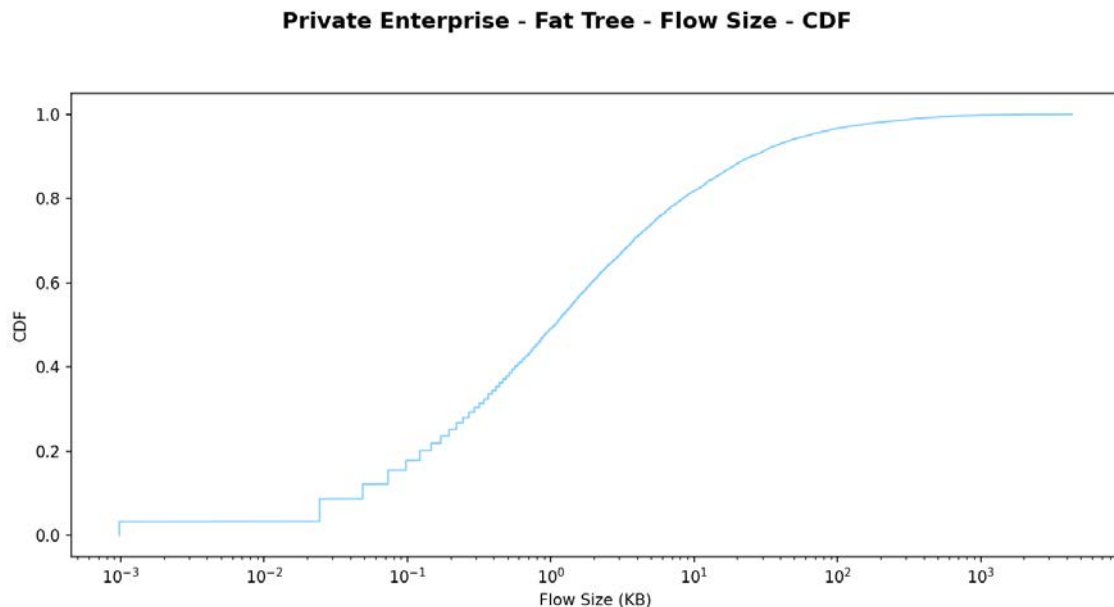
4.1.2.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα για το μέγεθος ροής στην τοπολογία Fat Tree αποκαλύπτει μια ευρεία κατανομή τιμών, με κορυφή στο εύρος περίπου 10^{-2} έως 10^{-1} KB. Το Σχήμα 14 υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο μέρος των ροών στο ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης αποτελείται από μικρές έως μέτριες ανταλλαγές δεδομένων, που πιθανώς σχετίζονται με εσωτερικές μεταφορές αρχείων, ενημερώσεις συστημάτων με μέτριο συναλλακτικό φόρτο. Παρατηρείται επίσης ουρά που εκτείνεται έως περίπου 10^3 KB, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη οποραδικών αλλά μεγαλύτερων ροών, όπως πλήρη αντίγραφα ασφαλείας ή μαζικός συγχρονισμός δεδομένων.



Σχήμα 14 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για Private Enterprise Workload

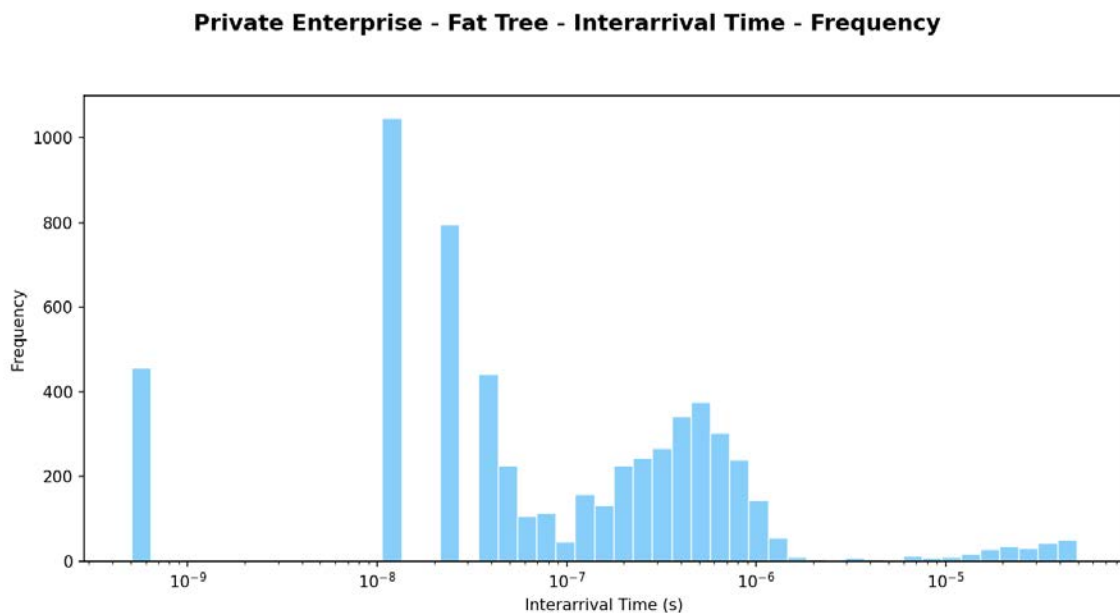
Η CDF στο *Σχήμα 15* επιβεβαιώνει τα ευρήματα του διαγράμματος. Η αύξηση της κλίσης είναι αισθητή από περίπου τα 10 KB και επιταχύνεται μέχρι τα 10^2 KB, φτάνοντας περίπου το 90 % της συνολικής συσσώρευσης πριν από τα 10^2 KB. Πέραν αυτού του σημείου, η CDF συνεχίζει με πιο αργό ρυθμό, καταγράφοντας την ουρά των μεγαλύτερων ροών. Αυτό το διάστημα τιμών δείχνει ότι η πλειονότητα της κίνησης είναι προβλέψιμη και μεσαίου μεγέθους, αλλά η ύπαρξη ακραίων περιπτώσεων επιβάλλει την ανάγκη για υποδομή με υψηλή ανθεκτικότητα και ευελιξία, χαρακτηριστικά που υποστηρίζονται από τη δομή πολλαπλών επιπέδων και διαδρομών της Fat Tree.



Σχήμα 15 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για Private Enterprise Workload

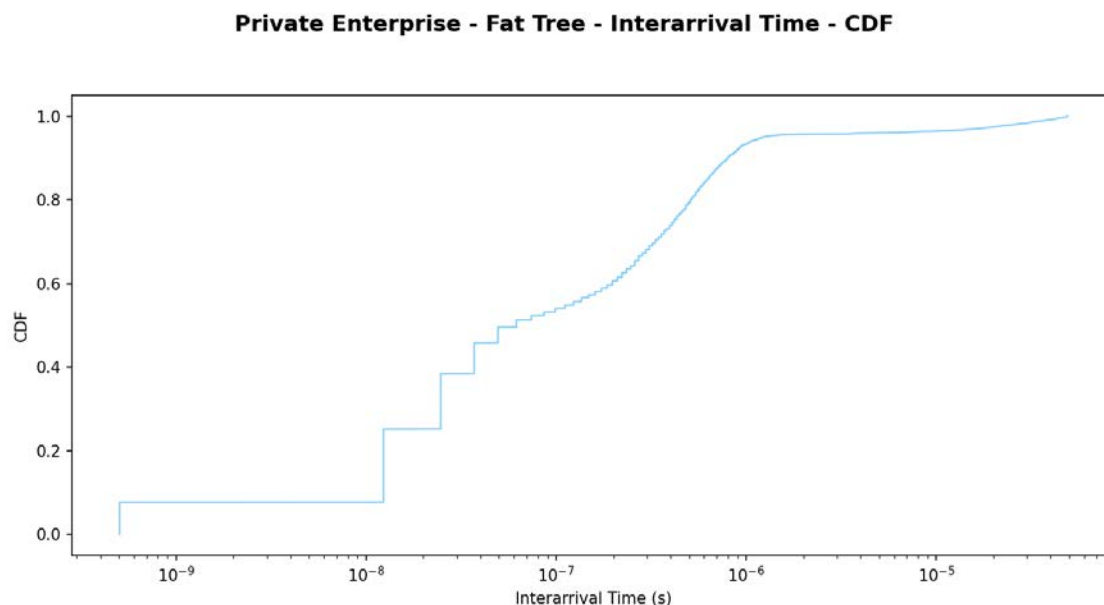
4.1.2.1 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των διαστημάτων μεταξύ αφίξεων για την τοπολογία Fat Tree παρουσιάζει μια πολυκορυφή κατανομή, με κύριες συγκεντρώσεις ροών να εμφανίζονται στην περιοχή μεταξύ 10^{-8} και 10^{-6} δευτερολέπτων. Στο *Σχήμα 16* παρατηρείται ότι οι πιο έντονες κορυφώσεις είναι γύρω από τα 10^{-8} δευτερόλεπτα, υποδεικνύοντας την ύπαρξη υψηλής συχνότητας δραστηριοτήτων. Οι ροές με μικρά διαστήματα κάτω από 10^{-9} δευτερολέπτα πιθανώς σχετίζονται με αυτοματοποιημένες διαδικασίες όπως η παρακολούθηση υπηρεσιών, ενώ τα μεγαλύτερα διαστήματα πάνω από 10^{-5} δευτερολέπτα ενδέχεται να προέρχονται από περιοδικές ή σποραδικές αλληλεπιδράσεις, όπως προγραμματισμένα αντίγραφα ασφαλείας ή καθυστερημένα αιτήματα χρήση.



Σχήμα 16 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για Private Enterprise Workload

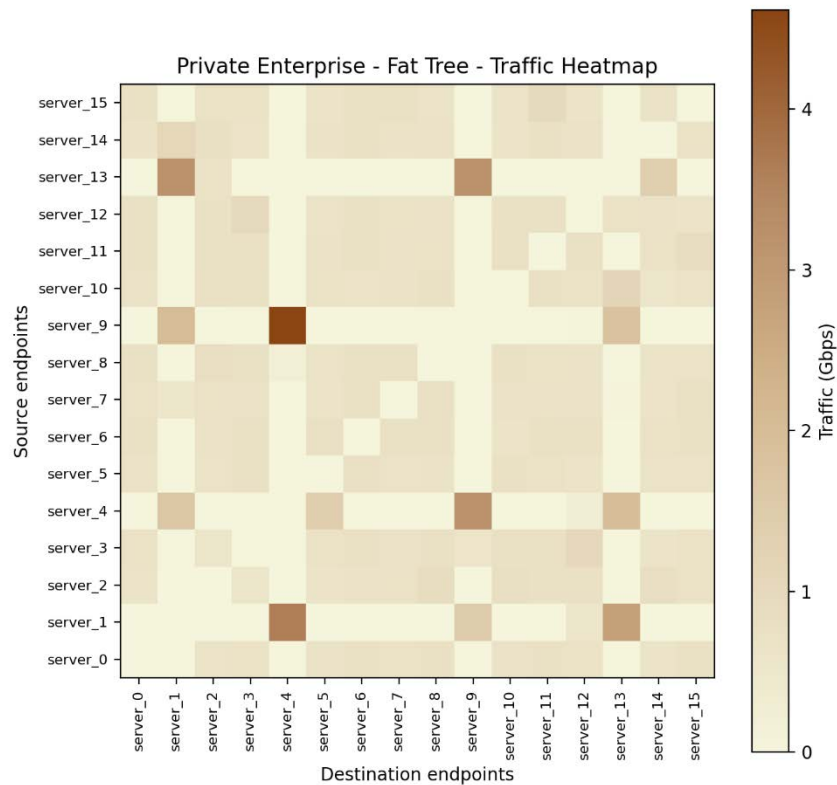
Η CDF στο *Σχήμα 17* ενισχύει αυτή την παρατήρηση, δείχνοντας απότομη αύξηση μεταξύ 10^{-8} και 10^{-7} δευτερολέπτων. Μετά το διάστημα αυτό, η καμπύλη ανεβαίνει πιο ήπια, με περίπου το 90% των ροών να βρίσκεται πριν τα 10^{-6} δευτερόλεπτα. Αυτό υποδηλώνει πως η τοπολογία Fat Tree είναι σε θέση να υποστηρίξει τόσο υψηλής συχνότητας εκρήξεις κίνησης όσο και λιγότερο συχνές, αλλά κρίσιμες επιχειρησιακές ροές, προσφέροντας ένα σταθερό και προσαρμόσιμο προφίλ εξυπηρέτησης. Η δομή της τοπολογίας παρέχει προφανώς την απαραίτητη ευαισθησία για επιχειρηματικές εργασίες, οι οποίες απαιτούν τόσο απόδοση όσο και αξιοπιστία, ειδικά για υπηρεσίες όπως η επαλήθευση ταυτότητας, η αποθήκευση σύννεφων ή η ζωντανή καταγραφή.



Σχήμα 17 Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών και στην Τοπολογία Fat Tree για Private Enterprise Workload

4.1.2.2 Διάγραμμα κατανομής τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας για το Fat Tree για το ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης παρουσιάζει ένα εξαιρετικά συμμετρικό μοτίβο επικοινωνίας, με τα αρκετά κελιά να έχουν ελάχιστη προς μηδενική δραστηριότητα, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 18*. Ορισμένα ζεύγη πηγή-προορισμός κυριαρχούν στην κίνηση, όπως φαίνεται από τα πιο σκούρα κελιά, υποδηλώνοντας ότι ορισμένες υπηρεσίες ή κόμβοι λειτουργούν ως κεντρικά σημεία επικοινωνίας. Τα ζεύγη με πιο έντονη επικοινωνία φτάνουν τα 3 Gbps σε φορτίο, ενώ το ζεύγος με το μέγιστο φορτίο φτάνει τα 4.5 Gbps, δραστηριότητα που οφείλεται στις μεταφορές μεγάλων αρχείων.



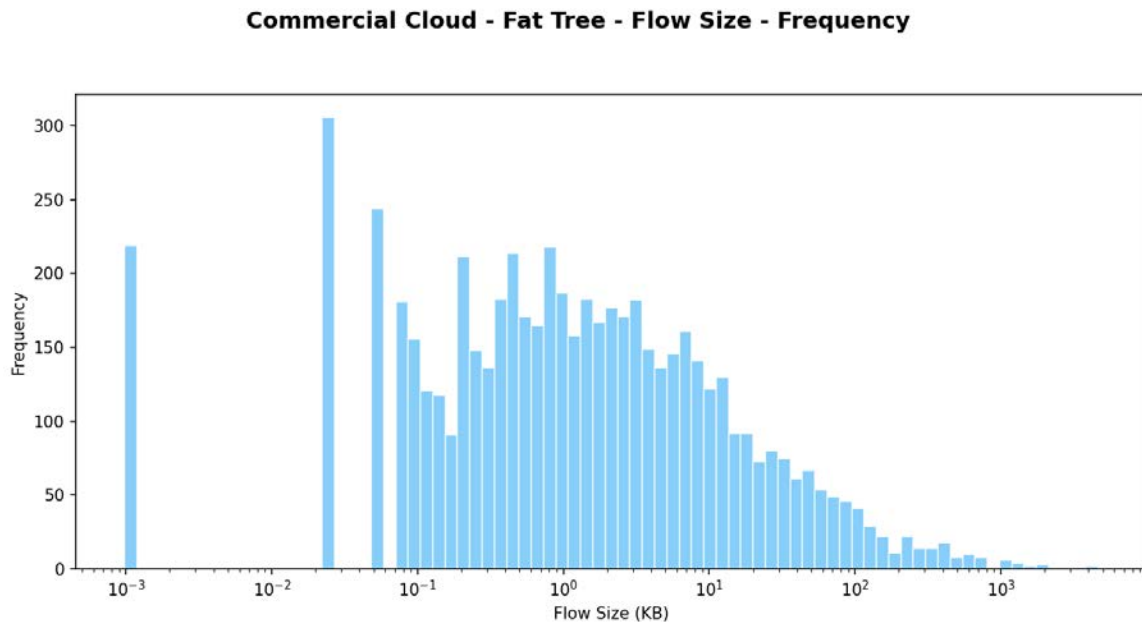
Σχήμα 18 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Fat Tree για Private Enterprise Workload

4.1.3 Κέντρο Δεδομένων Εμπορικής Επιχείρησης (Commercial Cloud)

Το υποκεφάλαιο 4.1.3 παρουσιάζει τα μεγέθη ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση στα ΔΚΔ Εμπορικής Επιχείρησης με αντίστοιχα σχήματα για την τοπολογία Fat Tree.

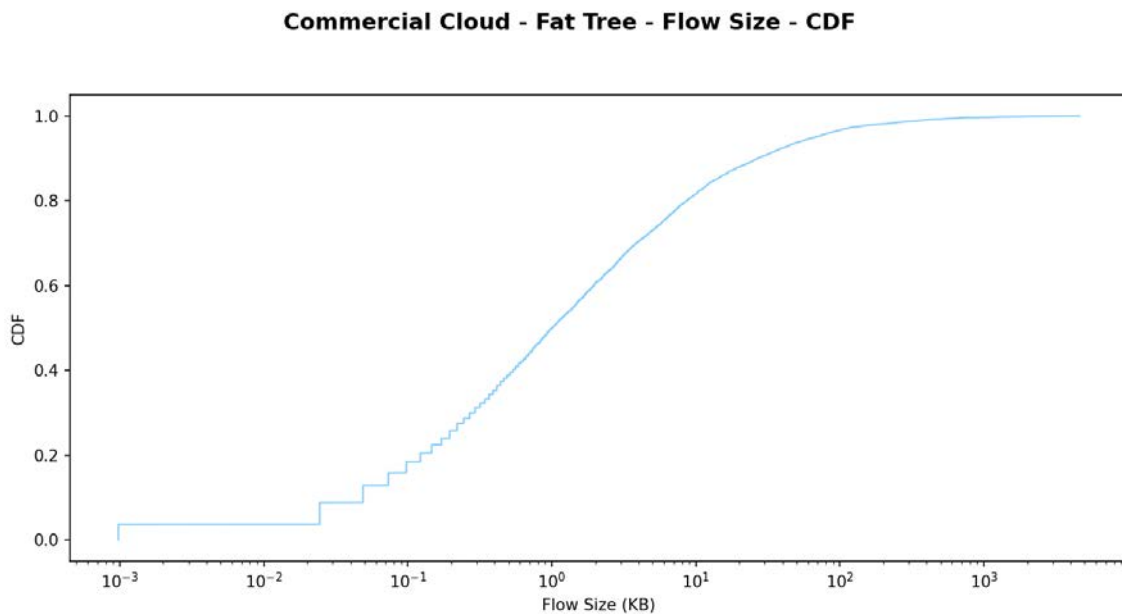
4.1.3.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Η κατανομή των μεγεθών ροής στην τοπολογία Fat Tree ακολουθεί καμπύλη, η οποία επικεντρώνεται έντονα μεταξύ 10^{-2} και 10 KB, με μέτρια παρουσία μεγαλύτερων ροών που επεκτείνονται προς 10^2 KB. Η κατανομή των μεγεθών του *Σχήματος 19* υποδεικνύει ότι οι περισσότερες μεταφορές δεδομένων είναι μετρίου μεγέθους, όπως είναι τυπικό για υπηρεσίες ιστού, συστήματα συναλλαγών ή αλληλεπιδράσεις API cloud. Ωστόσο, η παρουσία μεγαλύτερων ουρών στα δεξιά του διαγράμματος υποδηλώνει την ύπαρξη κίνησης μεγαλύτερων δεδομένων, όπως μεταφόρτωση μέσων, δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας αρχείων ή μαζική ανάλυση.



Σχήμα 19 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για Commercial Cloud Workload

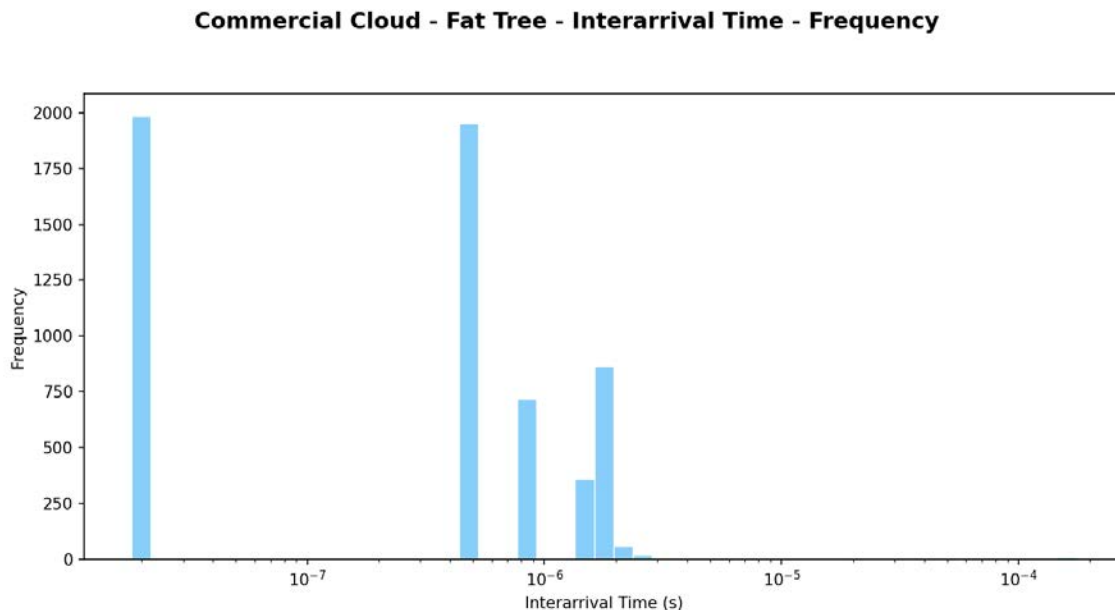
Η CDF επιβεβαιώνει περαιτέρω αυτή την άποψη, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 20*. Περίπου το 80% των ροών είναι κάτω από 10 KB, αλλά υπάρχει μια πιο σταδιακή άνοδος πέρα από αυτό. Αυτό το εκτεταμένο εύρος αντικατοπτρίζει τη μεταβλητότητα και την κλίμακα που αναμένεται σε ΔΚΔ εμπορικών εφαρμογών, όπου η συμπεριφορά των πελατών είναι λιγότερο προβλέψιμη.



Σχήμα 20 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για Commercial Cloud Workload

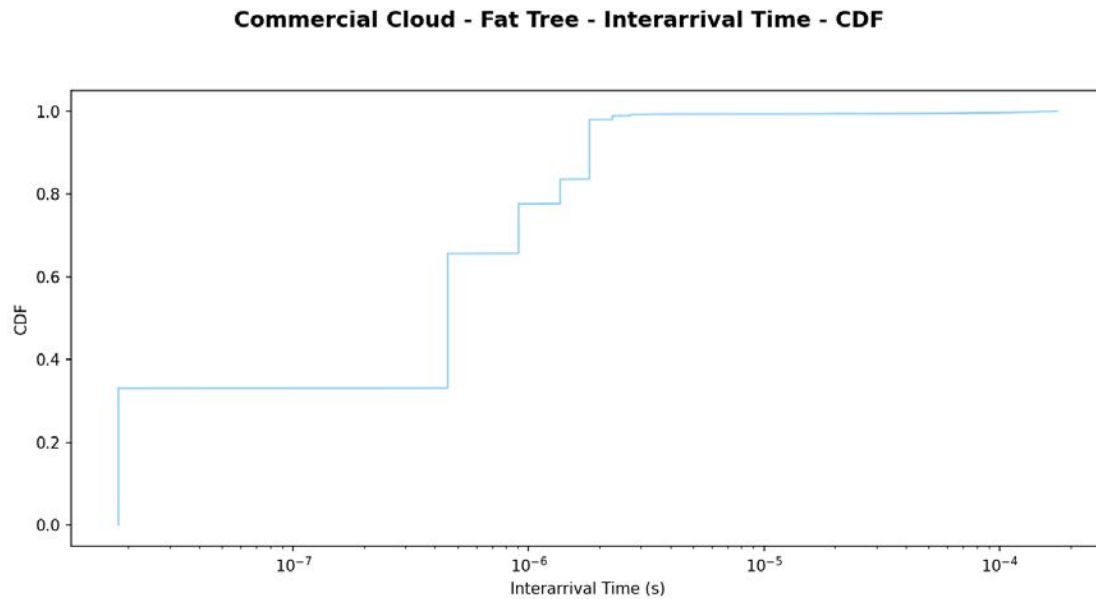
4.1.3.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων για το ΔΚΔ Εμπορικής Επιχείρησης στην τοπολογία Fat Tree δείχνει συσσωρεύσεις σε συγκεκριμένες περιοχές, κυρίως κοντά στις τιμές 10^{-8} και 10^{-6} δευτερολέπτα, υποδεικνύοντας την παρουσία περιόδων έντονης δραστηριότητας που επαναλαμβάνονται με σχετικά σταθερούς χρόνους. Στο Σχήμα 21 παρατηρούνται κενά ανάμεσα στις συσσωρεύσεις τιμών των χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων, η πολυτροπική αυτή κατανομή δημιουργείται από χρονοπρογραμματισμένες διεργασίες με επαναλαμβανόμενα χρονικά μοτίβα ή κυκλική δραστηριότητα εφαρμογών.



Σχήμα 21 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για Commercial Cloud Workload

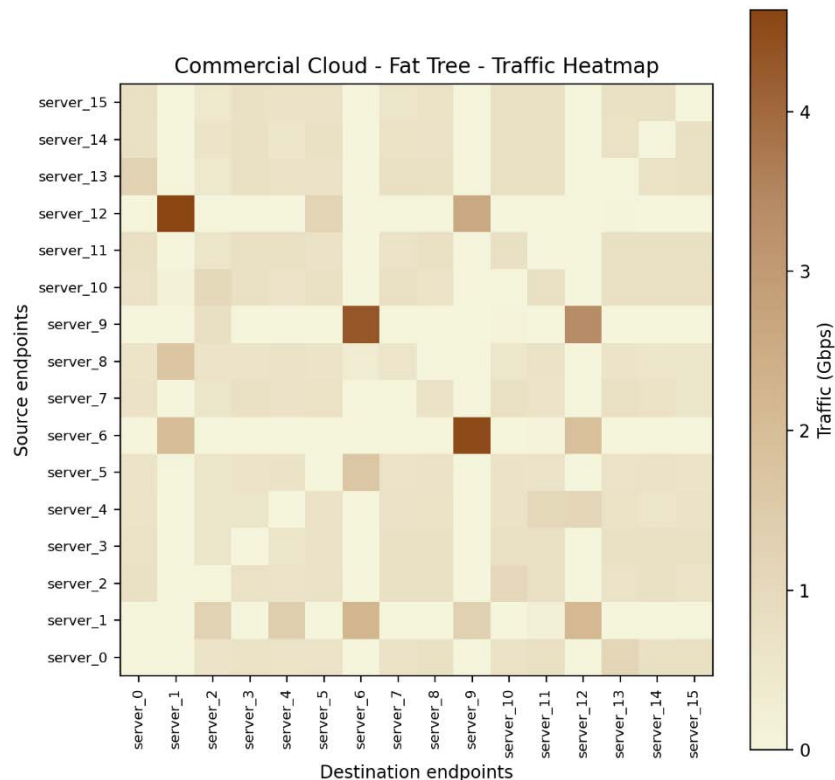
Η αντίστοιχη CDF ανεβαίνει σταδιακά, με το 80% των ροών να φτάνει εντός του διαστήματος των πρώτων 10^{-6} δευτερολέπτων, και ένα πολύ μικρό ποσοστό να φτάνει μετά τα 10^{-5} δευτερόλεπτα. Το Σχήμα 21, επιβεβαιώνει το συμπέρασμα της σταθερότητας των τιμών με την σκαλοειδή μορφή του. Αυτή η κατανομή φανερώνει αυξημένη συχνότητα πακέτων και μικρά χρονικά περιθώρια μεταξύ αφίξεων, κάτι που ταιριάζει σε περιβάλλοντα με ταυτόχρονη δραστηριότητα, όπως τα ΔΚΔ εμπορικών επιχειρήσεων.



Σχήμα 22 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για Commercial Cloud Workload

4.1.3.3 Διάγραμμα κατανομής τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας παρουσιάζει μια ήπια και συμμετρική κατανομή κίνησης, με μεγάλο μέρος των ζευγών πηγής-προορισμού να εμφανίζει πολύ χαμηλή έως μηδενική δραστηριότητα. Ενώ λίγα ζεύγη πηγή-προορισμός αλληλεπιδρούν, κάποια διαγώνια μοτίβα είναι σαφώς πιο εμφανή. Το Σχήμα 23 δείχνει ότι σχετική ομοιομορφία στην κίνηση υποδηλώνει συγγένεια υπηρεσιών ή επανειλημμένη αλληλεπίδραση μεταξύ συγκεκριμένων τερματικών σημείων, πιθανώς λόγω ομαδοποίησης διακομιστών ή μικρο-υπηρεσιών που επικοινωνούν εντός περιοχών. Η κίνηση είναι συμμετρική που υποδηλώνει ότι οι όσοι εξυπηρετητές λειτουργούν ως πηγές, εμφανίζονται και ως προορισμοί. Έτσι η Fat Tree τοπολογία φαίνεται να επιτυγχάνει στην ισοκατανομή του φορτίου με τις πολλαπλές διαδρομές που διαθέτει.



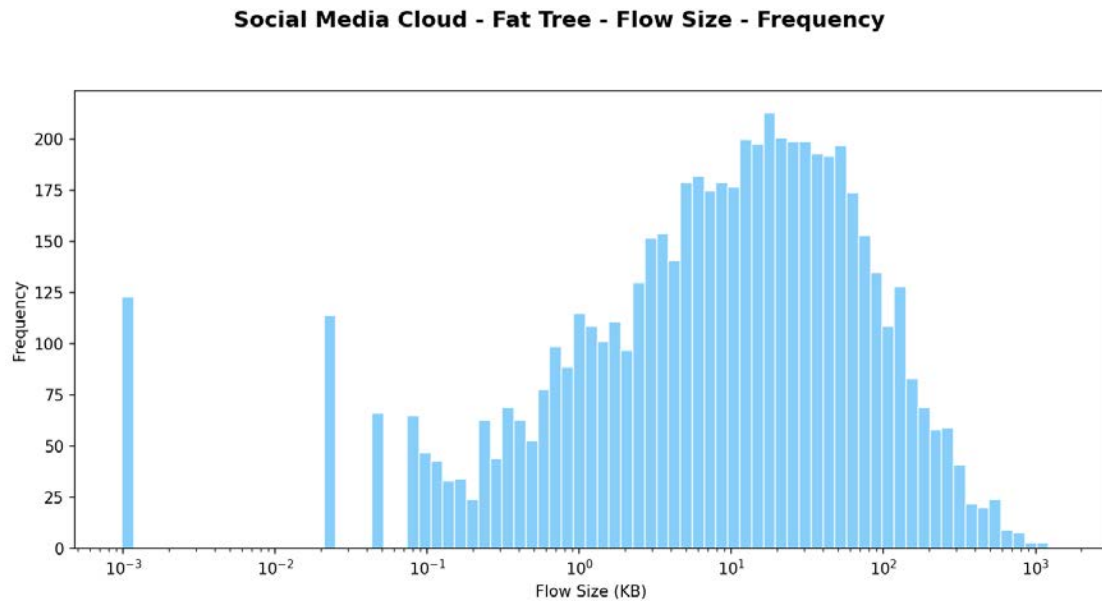
Σχήμα 23 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Fat Tree για Commercial Cloud Workload

4.1.4 Κέντρο Δεδομένων Εφαρμογών Κοινωνική Δικτύωσης (Social Media Cloud)

Στα υποκεφάλαια 4.1.4.1, 4.1.4.2 και 4.1.4.3 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του ΔΚΔ εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης για την τοπολογία Fat Tree με τα μεγέθη ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση αντίστοιχα.

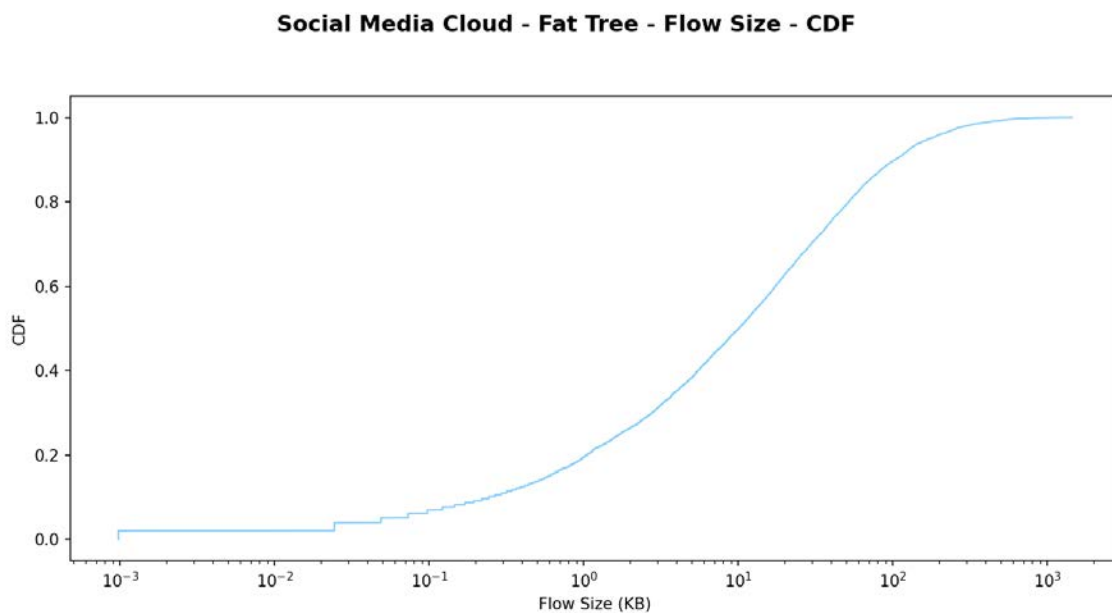
4.1.4.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα μεγέθους ροής για την τοπολογία Fat Tree παρουσιάζει μια μονότονη κατανομή, που επικεντρώνεται έντονα στην περιοχή περίπου 1 έως 10^2 KB. Αυτή η διακύμανση των μεγεθών αντικατοπτρίζει μια υψηλή συχνότητα ροών μεσαίου μεγέθους, η οποία είναι τυπική για πλατφόρμες όπου οι χρήστες ανταλλάσσουν συνεχώς περιεχόμενο πολυμέσων, όπως εικόνες, ενημερώσεις κατάστασης και μεταδεδωμένα αλληλεπίδρασης. Στο Σχήμα 24 βλέπουμε ότι το διάγραμμα εμφανίζει το μέγιστο σημείο πριν τα 50 KB και αποκαλύπτει επίσης μια αξιοσημείωτη ουρά που εκτείνεται προς την ένδειξη 10^3 KB, υποδηλώνοντας την παρουσία περιστασιακών μεγάλων μεταφορών δεδομένων, πιθανώς λόγω μεταφορών πολυμέσων υψηλής ανάλυσης ή διαδικασιών συγχρονισμού δεδομένων.



Σχήμα 24 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για Social Media Cloud Workload

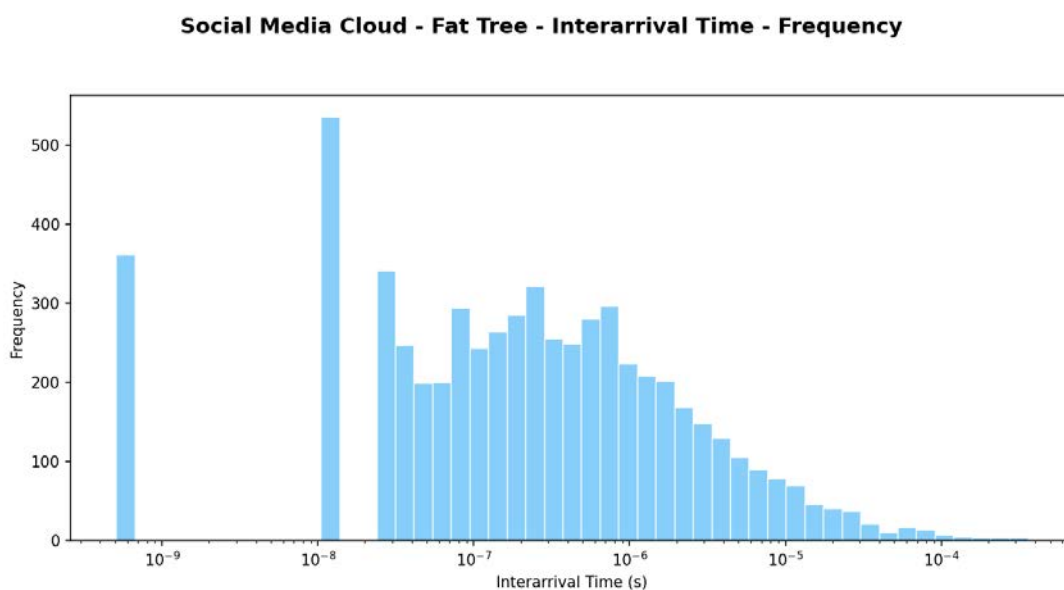
Η CDF για τα μεγέθη ροής επιβεβαιώνει το παραπάνω συμπέρασμα, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 25* δείχνοντας πόσο γρήγορα συσσωρεύονται τα μεγέθη ροής σε όλο το σύνολο δεδομένων. Στη Fat Tree τοπολογία, η CDF ξεκινά με αργή αύξηση περίπου μέχρι το 1 KB, στη συνέχεια αυξάνεται σημαντικά μεταξύ 1 και 10^3 KB, επιβεβαιώνοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος των ροών εμπίπτει σε αυτό το εύρος. Αυτή η απότομη άνοδος υποδηλώνει ότι περίπου το 80% όλων των ροών διαχειρίζονται αποτελεσματικά κάτω από περίπου 10^2 KB. Αυτή η εκτεταμένη ουρά επιβεβαιώνει ότι η πλειονότητα της επικοινωνίας αποτελείται από μικρές έως μεσαίες ροές.



Σχήμα 25 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για Social Media Cloud Workload

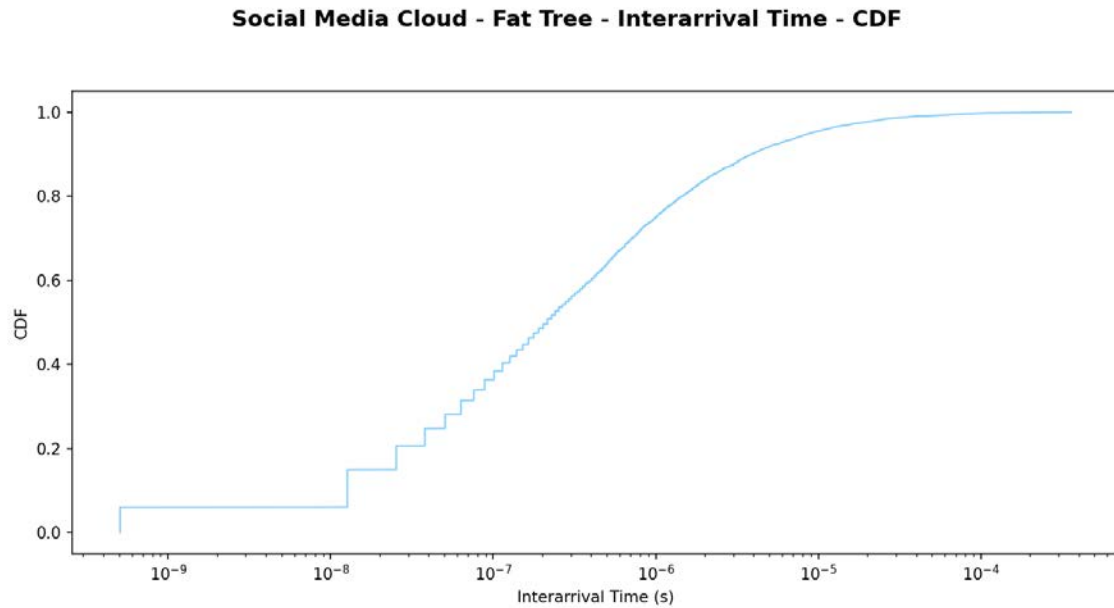
4.1.4.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των χρόνων μεταξύ αφίξεων στην τοπολογία Fat Tree αποκαλύπτει ένα ευρύ φάσμα τιμών, με τη συντριπτική πλειοψηφία των αφίξεων να συγκεντρώνεται μεταξύ 10^{-8} και 10^{-5} δευτερολέπτων. Η κατανομή είναι ασύμμετρη, με αυξημένη συχνότητα στα σύντομα χρονικά διαστήματα και σταδιακή μείωση προς μεγαλύτερους χρόνους, που φτάνουν έως και τα 10^{-4} δευτερόλεπτα. Το Σχήμα 26 υποδηλώνει εντατικές, αλλά και πιο περιοδικές δραστηριότητες, όπως ενημερώσεις κατάστασης, αιτήματα συγχρονισμού ή παθητική παρακολούθηση περιεχομένου, οι οποίες είναι συχνές σε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης. Η παρουσία μεγάλου όγκου ροών σε σύντομα διαστήματα ενισχύει την ικανότητα του δικτύου να ανταποκρίνεται γρήγορα σε γεγονότα πραγματικού χρόνου, ενώ η επιμήκυνση της κατανομής σε μεγαλύτερα χρονικά παράθυρα αποτυπώνει χρήστες ή εφαρμογές που ενεργοποιούνται σποραδικά ή υπό χρονοπρογραμματισμένα σενάρια.



Σχήμα 26 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για Social Media Cloud Workload

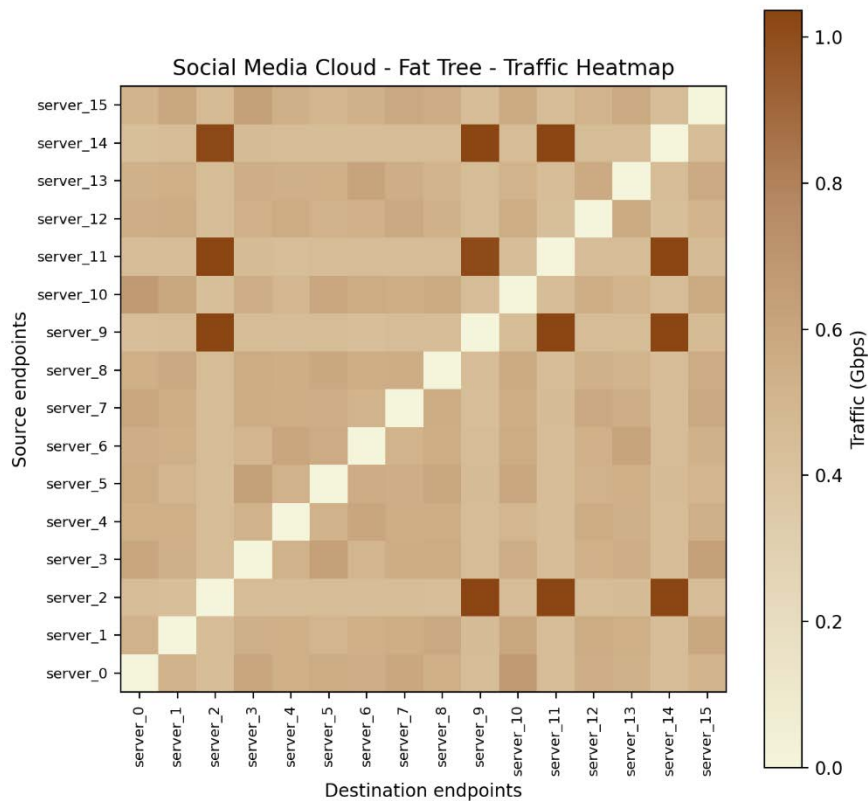
Η CDF επιβεβαιώνει αυτή τη διασπορά, καταγράφοντας απότομη άνοδο μεταξύ 10^{-8} και 10^{-6} δευτερολέπτων. Η καμπύλη τείνει να ισοπεδώνεται μετά τα 10^{-5} δευτερόλεπτα με το 80% των ροών να φτάνουν πριν τα 10^{-6} δευτερόλεπτα και με ελάχιστες καθυστερημένες αφίξεις να φτάνουν έως τα 10^{-4} δευτερόλεπτα. Το Σχήμα 27 δείχνει πως, ενώ το σύστημα ανταποκρίνεται επαρκώς για τον μέσο χρήστη, υπάρχουν επίσης περιθώρια για εξυπηρέτηση λιγότερο συχνών, αλλά ενδεχομένως βαρύτερων λειτουργιών. Η γενική συμπεριφορά αποτυπώνει ένα περιβάλλον κοινωνικής δικτύωσης με έντονη και συνεχή αλληλεπίδραση, υποδηλώνοντας ένα ισορροπημένο μοντέλο επικοινωνίας που ευνοεί την κλιμακωτή εξυπηρέτηση χρηστών και διεργασιών.



Σχήμα 27 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για Social Media Cloud Workload

4.1.4.3 Διάγραμμα κατανομής τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας του δικτύου στη Fat Tree τοπολογία δείχνει ένα μοτίβο επικοινωνίας με ευρεία και συμμετρική κατανομή, που υποδηλώνει την χρήση των εξυπηρετητών ως πηγές αλλά και ως προορισμοί, χαρακτηριστικό των εργασιών των μέσων κοινωνικής δικτύωσης όπου οι αλληλεπιδράσεις των χρηστών είναι απρόβλεπτες και καλύπτουν ολόκληρη τη βάση χρηστών. Στο *Σχήμα 28* παρατηρείται ενεργή επικοινωνία και έντονη ροή πληροφορίας μεταξύ πηγής-προορισμού, με τα περισσότερα κελιά να είναι πιο σκούρα, υποδεικνύοντας εντοπιζόμενα σημεία επικοινωνίας. Έχουμε 12 ζεύγη με την πιο έντονη δραστηριότητα της τάξης των 1 Gbps.



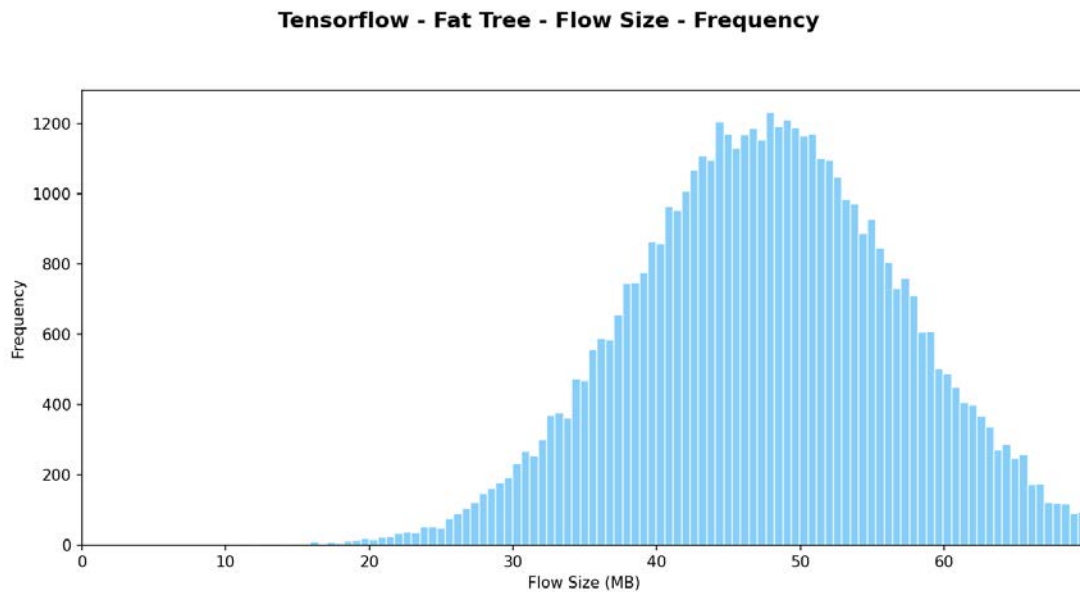
Σχήμα 28 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Fat Tree για Social Media Cloud Workload

4.1.5 Κέντρο Δεδομένων TensorFlow για Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης

Στο υποκεφάλαιο 4.1.5 βλέπουμε τις γραφικές παραστάσεις, που αντιστοιχούν στα ΔΚΔ TensorFlow για εφαρμογές μηχανικής μάθησης, με τα μεγέθη ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση για την τοπολογία Fat Tree.

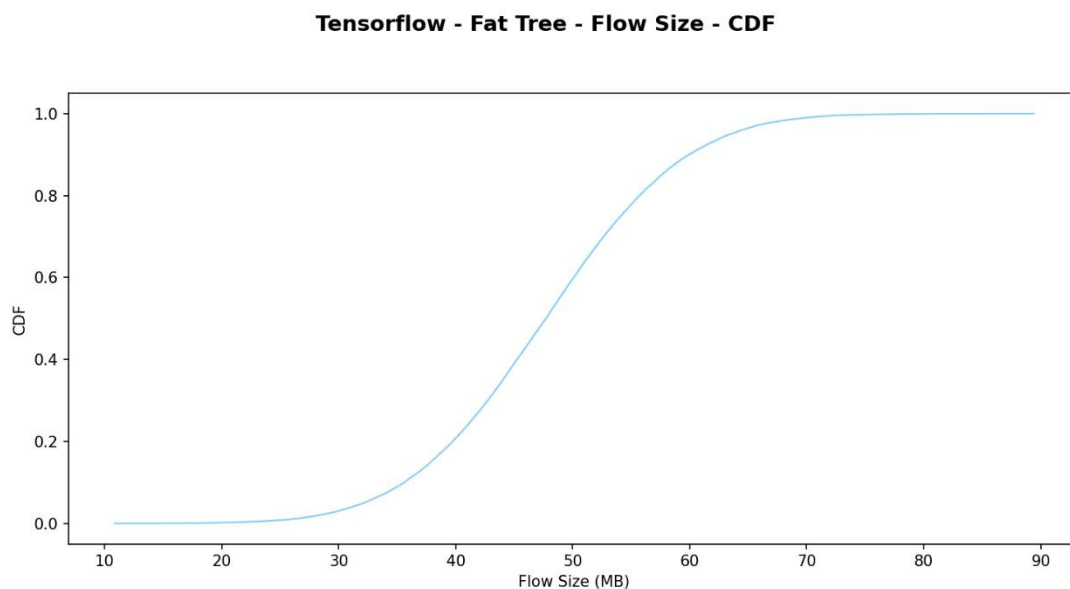
4.1.5.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των μεγεθών ροής στην τοπολογία Fat Tree αποκαλύπτει μια έντονα μονότονη συμπεριφορά που επικεντρώνεται σε μια στενή περιοχή μεγάλων τιμών. Οι περισσότεροι ροές δεδομένων συγκεντρώνονται μεταξύ 40 και 60 MB, υποδεικνύοντας εξαιρετικά ομοιόμορφες διαστάσεις ροών σε ολόκληρο το δίκτυο. Το μέγιστο του διαγράμματος εμφανίζεται κοντά στα 50 MB, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 29*, γεγονός που ευθυγραμμίζεται με τα αναμενόμενα πρότυπα φόρτου εργασίας του TensorFlow. Η έλλειψη μιας ορατής ουρά και οι ελάχιστες περιπτώσεις μικρότερων ροών υποδηλώνουν ότι η εργασία κυριαρχείται από επαναλαμβανόμενες, συγχρονισμένες μεταδόσεις σημαντικού όγκου δεδομένων.



Σχήμα 29 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για TensorFlow Workload

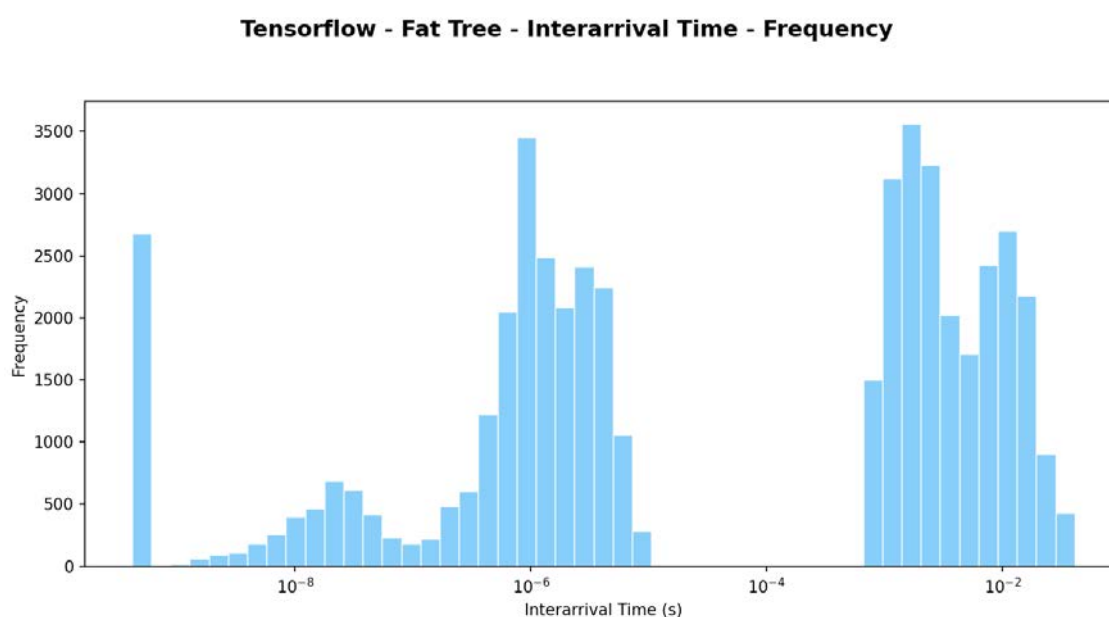
Η CDF στο Σχήμα 30 υποστηρίζει περαιτέρω αυτή την ερμηνεία, παρουσιάζοντας μια απότομη άνοδο που ξεκινά λίγο κάτω από 30 MB και πλησιάζει τον κορεσμό πριν από 60 MB. Αυτή η απότομη κλίση επιβεβαιώνει ότι η συντριπτική πλειοψηφία των ροών εμπίπτει σε ένα στενό εύρος μεγέθους, με την καμπύλη CDF να δείχνει ότι το 80% βρίσκεται κάτω από τα 60 MB. Η μορφή της καμπύλης υποδηλώνει ελάχιστη μεταβλητότητα στο μέγεθος ροής και αντικατοπτρίζει μια συγκεκριμένη δομή επικοινωνίας χαρακτηριστική των σεναρίων εκπαίδευσης μηχανικής μάθησης, όπου επαναλαμβάνονται παρόμοιου μεγέθους ενημερώσεις.



Σχήμα 30 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Fat Tree για TensorFlow Workload

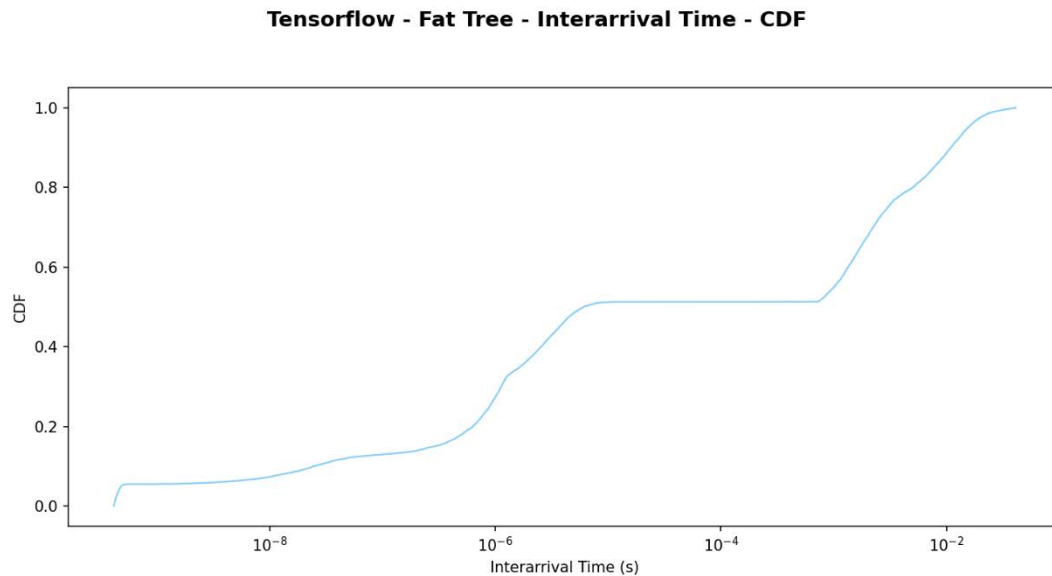
4.1.5.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των διαστημάτων μεταξύ αφίξεων στην τοπολογία Fat Tree εκτείνεται από περίπου 10^{-9} έως και 10^{-2} δευτερόλεπτα. Τα διακριτά μέγιστα, όπως βλέπουμε στο *Σχήμα 31* εμφανίζονται κυρίως γύρω από τις τιμές 10^{-6} και 10^{-2} , υποδεικνύοντας ρυθμικά μοτίβα δραστηριότητας που πιθανότατα σχετίζονται με επαναλαμβανόμενους κύκλους επεξεργασίας και επικοινωνίας. Τα κενά μεταξύ των κορυφών υποδεικνύουν διαστήματα υπολογιστικής αδράνειας, κατά τα οποία δεν παρατηρείται αφίξεις ροών, εναλλάσσοντας περιόδους έντονης κίνησης με φάσεις ηρεμίας. Αυτό συνάδει με την φύση του TensorFlow, όπου η επικοινωνία ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια συγχρονισμού μετά από κάθε ολοκληρωμένο βήμα επεξεργασίας.



Σχήμα 31 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών και CDF στην Τοπολογία Fat Tree για TensorFlow Workload

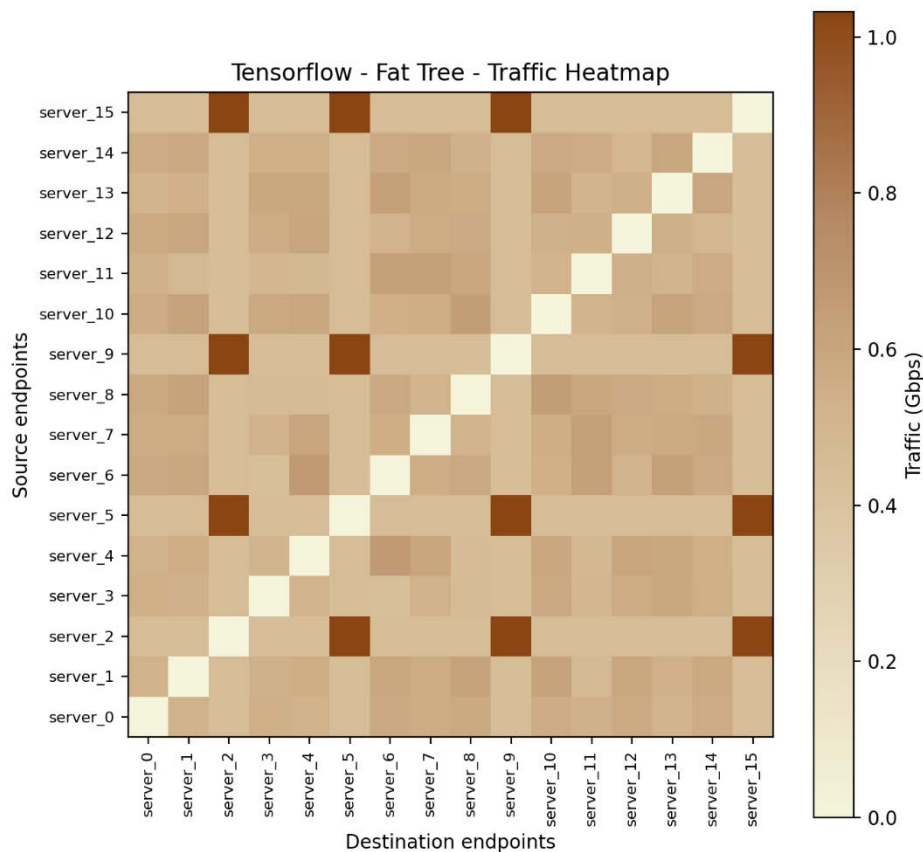
Η αντίστοιχη CDF του *Σχήματος 32* ενισχύει το παραπάνω συμπέρασμα, παρουσιάζοντας μια διακριτά βαθμωτή άνοδο που δεν είναι ομαλή, αλλά σκαλοειδής. Η καμπύλη εμφανίζει χαρακτηριστικά σημεία επιπέδωσης πριν συνεχίσει την άνοδό της, ιδιαίτερα κοντά στην περιοχή 10^{-5} - 10^{-3} δευτερολέπτων. Περίπου το 80% των αφίξεων έχει καταγραφεί πριν από τα 10^{-2} δευτερόλεπτα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η πλειονότητα των πακέτων ακολουθεί την περιοδικότητα που υπαγορεύεται από τα στάδια επεξεργασίας. Το μοτίβο αυτό είναι τυπικό για εφαρμογές τεχνητής μάθησης που βασίζονται σε συγχρονισμένη εκπαίδευση και λειτουργούν με σαφώς ορισμένα χρονικά παράθυρα επικοινωνίας.



Σχήμα 32 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Fat Tree για TensorFlow Workload

4.1.5.3 Διάγραμμα θερμικής έντασης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας για τη τοπολογία Fat Tree εμφανίζει ένα ευρέως κατανομημένο μοτίβο επικοινωνίας, με αρκετά ισχυρή και συμμετρική ένταση σε πολλά ζεύγη πηγή-προορισμός. Ενώ ορισμένες γραμμές και στήλες εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις, πιθανότατα λόγω των κόμβων που έχουν πρόσβαση επανειλημμένα, το συνολικό μοτίβο παραμένει ισορροπημένο. Στο Σχήμα 33 φαίνεται πως 12 ζεύγη είναι πιο ενεργά με την επικοινωνία τους να φτάνει την ταξη των 1 Gbps. Αυτό υποδηλώνει ότι η ιεραρχική δομή του Fat Tree κατανέμει αποτελεσματικά τα φορτία κίνησης στο δίκτυο. Οι κόμβοι συμμετέχουν τόσο σε ρόλο αποστολής όσο και σε ρόλο λήψης, υπονοώντας ένα αμφίδρομο, συνεργατικό πλαίσιο επικοινωνίας όπου τα τμήματα ή οι ενημερώσεις του μοντέλου μοιράζονται και προς τις δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 33 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Fat Tree για TensorFlow Workload

4.1.6 Επίδραση Εφαρμογών στην Κίνηση για την Fat Tree

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της κίνησης που παράχθηκε στα πέντε ΔΚΔ για την τοπολογία Fat Tree με βάση τις εφαρμογές τους.

4.1.6.1 Μέγεθος Ροής

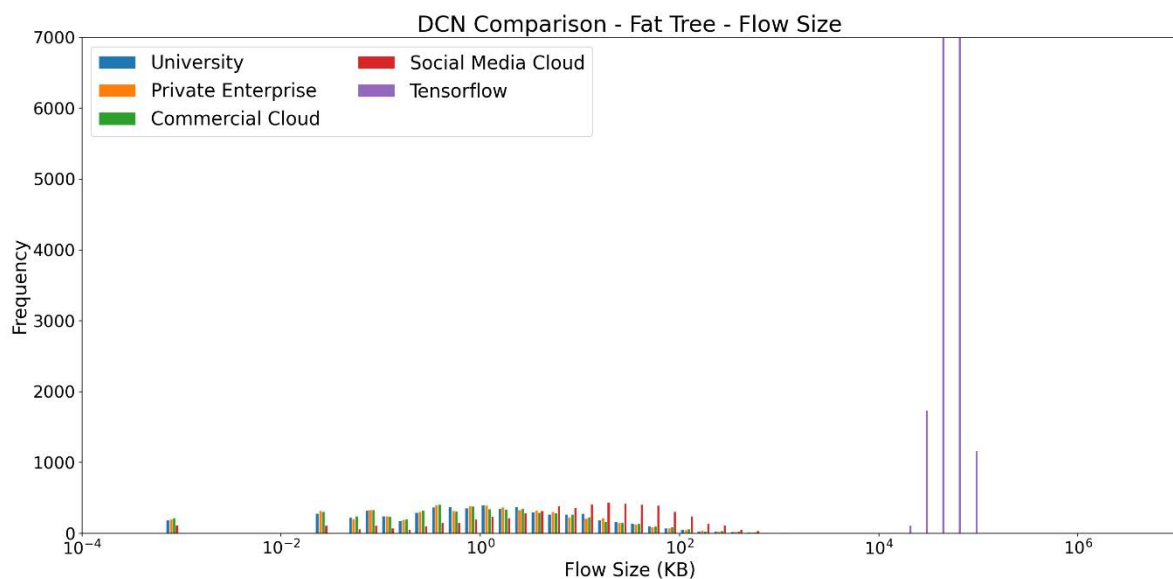
Η ανάλυση του μεγέθους ροής (Σχήμα 34 - Συχνότητα, Σχήμα 35 - CDF) δείχνει ότι τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου, τα κέντρα δεδομένων ιδιωτικών επιχειρήσεων και τα κέντρα δεδομένων εμπορικών επιχειρήσεων εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημο προφίλ. Και στις τρεις περιπτώσεις, η πλειοψηφία των ροών συγκεντρώνεται κάτω από τα 10 KB, με το 80 - 85% να βρίσκεται σε αυτή τη ζώνη. Η μορφή των καμπυλών και η έντονη επικάλυψη στα ιστογράμματα υποδηλώνουν ότι οι ροές αυτών των δικτύων ακολουθούν παρόμοια κατανομή. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι εφαρμογές που εξυπηρετούν έχουν κοινό χαρακτηριστικό την παραγωγή μικρών και σταθερών μεταφορών, δηλαδή στα πανεπιστήμια κυριαρχούν οι εκπαιδευτικές πλατφόρμες, τα emails και οι υπηρεσίες φιλοξενίας περιεχομένου, στις ιδιωτικές επιχειρήσεις, οι ERP και CRM εφαρμογές παράγουν περιοδικές συναλλαγές μικρομεσαίου όγκου, ενώ στις εμπορικές επιχειρήσεις, υπηρεσίες όπως SaaS εφαρμογές, συναλλαγές ηλεκτρονικού εμπορίου και PaaS/API αιτήματα δημιουργούν συνεχείς αλλά μικρές σε μέγεθος ροές για να ανταποκρίνονται σε πλήθος χρηστών ταυτόχρονα.

Το κέντρο δεδομένων εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης φαίνεται να διαφοροποιείται από τα άλλα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 35, η καμπύλη CDF ανέρχεται με μικρότερη κλίση,

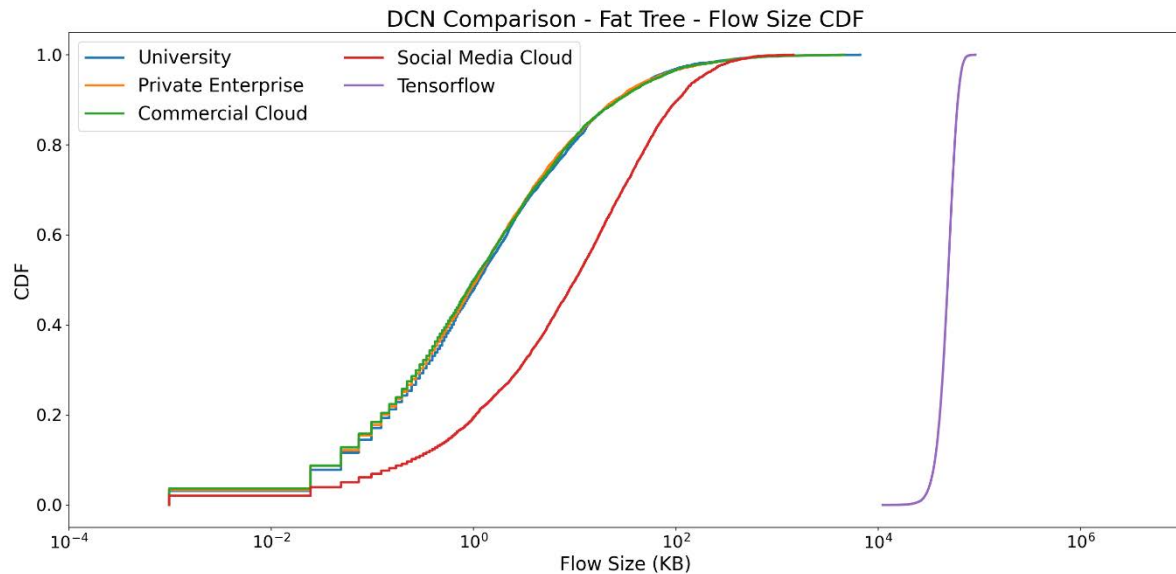
ενώ στο Σχήμα 2 διακρίνονται υψηλότερες συχνότητες για ροές μεσαίου μεγέθους, κυρίως στο εύρος 10 - 100 KB. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις ιδιαιτερότητες των κοινωνικών δικτύων, όπου πέρα από τα μικρά αιτήματα (likes, σχόλια, ενημερώσεις) παρατηρείται έντονη παρουσία πολυμεσικού περιεχομένου, όπως εικόνες και σύντομα βίντεο. Οι απαιτήσεις αυτές αυξάνουν το μέσο μέγεθος των ροών σε σχέση με τα πιο τυποποιημένα και ελαφριά που είδαμε παραπάνω.

Η μεγαλύτερη απόκλιση εντοπίζεται στο κέντρο δεδομένων TensorFlow, το οποίο διαφοροποιείται ριζικά από όλες τις άλλες κατηγορίες. Στο Σχήμα 1 η καμπύλη CDF παρουσιάζει απότομη άνοδο στην περιοχή των 40–60 MB, ενώ το διάγραμμα συχνότητας, στο Σχήμα 35 δείχνει καθαρές κορυφώσεις σε αυτό το εύρος, χωρίς σχεδόν καμία παρουσία μικρών ή μεσαίων ροών. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται άμεσα με τη φύση των εφαρμογών μηχανικής μάθησης, όπου απαιτούνται συνεχείς, μεγάλης κλίμακας μεταφορές παραμέτρων και συνόλων δεδομένων μεταξύ κατανεμημένων κόμβων. Η ομοιομορφία και το πολύ μεγάλο μέγεθος ροών αντικατοπτρίζουν τις απαιτήσεις εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων και την ανάγκη για σταθερή, υψηλής χωρητικότητας επικοινωνία.

Συνοψίζοντας, διακρίνονται τρεις ομάδες με βάση τα δεδομένα των σχημάτων. Η πρώτη περιλαμβάνει τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου, ιδιωτικών και εμπορικών επιχειρήσεων, που συγκλίνουν στις μικρές και περιοδικές ροές λόγω της φύσης των εφαρμογών τους. Η δεύτερη αφορά τα κοινωνικά δίκτυα, τα οποία διατηρούν παρόμοιο προφίλ αλλά με εντονότερη παρουσία μεσαίων ροών λόγω της χρήσης πολυμεσικού περιεχομένου. Η τρίτη κατηγορία αφορά το TensorFlow, το οποίο διαφοροποιείται πλήρως, καθώς παράγει μόνο μεγάλες και ομοιόμορφες ροές, χαρακτηριστικό των workloads εκπαίδευσης τεχνητής νοημοσύνης.



Σχήμα 34 Σύγκριση Συχνότητας Μεγέθους Ροής των 5 ΔΚΔ για την Fat Tree



Σχήμα 35 Σύγκριση Συχνότητας Μεγέθους Ροής των 5 ΔΚΔ για την Fat Tree

4.1.6.2 Χρονικά Διαστήματα μεταξύ αφίξεων Ροών

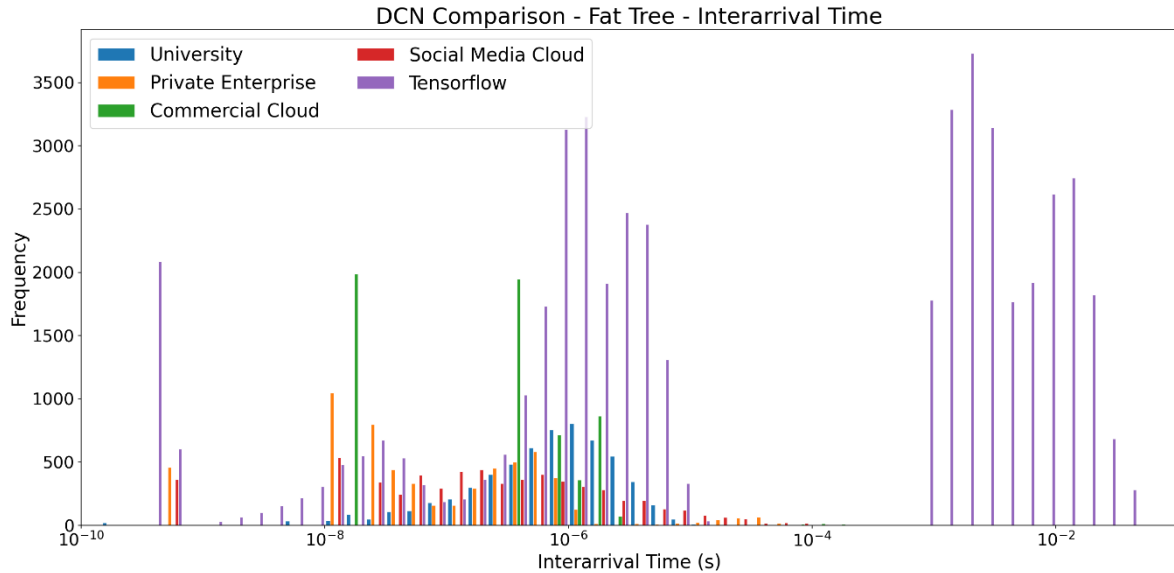
Η εξέταση των χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων ροών (Σχήμα 36 - Συχνότητα, Σχήμα 37 – CDF) δείχνει ότι το κέντρο δεδομένων ιδιωτικών επιχειρήσεων (πορτοκαλί) και το κέντρο δεδομένων εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης (κόκκινο) εμφανίζουν πιο συγγενή προφίλ. Και στις δύο περιπτώσεις, οι περισσότερες αφίξεις συγκεντρώνονται σε εξαιρετικά μικρά χρονικά παράθυρα, με κύρια δραστηριότητα στο εύρος 10^{-8} έως 10^{-6} δευτερολέπτων. Αυτή η ομοιότητα οφείλεται στη φύση των εφαρμογών: στις ιδιωτικές επιχειρήσεις, τα ERP και CRM δημιουργούν συνεχείς, προγραμματισμένες ροές μικρού μεγέθους, ενώ στα κοινωνικά δίκτυα η συνεχής αλληλεπίδραση των χρηστών (likes, ενημερώσεις, caching) οδηγεί σε παρόμοια συχνότητα πακέτων. Το γεγονός ότι οι δύο καμπύλες ακολουθούν σχεδόν παράλληλη πορεία στη CDF δείχνει την εγγύτητα αυτών των workloads.

Αντίθετα, το πανεπιστημιακό κέντρο δεδομένων (μπλε) διαφοροποιείται με εμφανή μεγαλύτερη διασπορά στα interarrival times. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 37, οι αφίξεις εκτείνονται σε πιο ευρύ φάσμα από 10^{-9} έως 10^{-5} δευτερόλεπτα, κάτι που αντικατοπτρίζει τη μη προβλέψιμη συμπεριφορά των χρηστών. Η φύση των πανεπιστημιακών εφαρμογών (e-class, απομακρυσμένη πρόσβαση, web hosting) δημιουργεί συνθήκες έντονης ασυμμετρίας, όπου ήπιες περιόδους δραστηριότητας διαδέχονται στιγμιαίες εκρήξεις κίνησης.

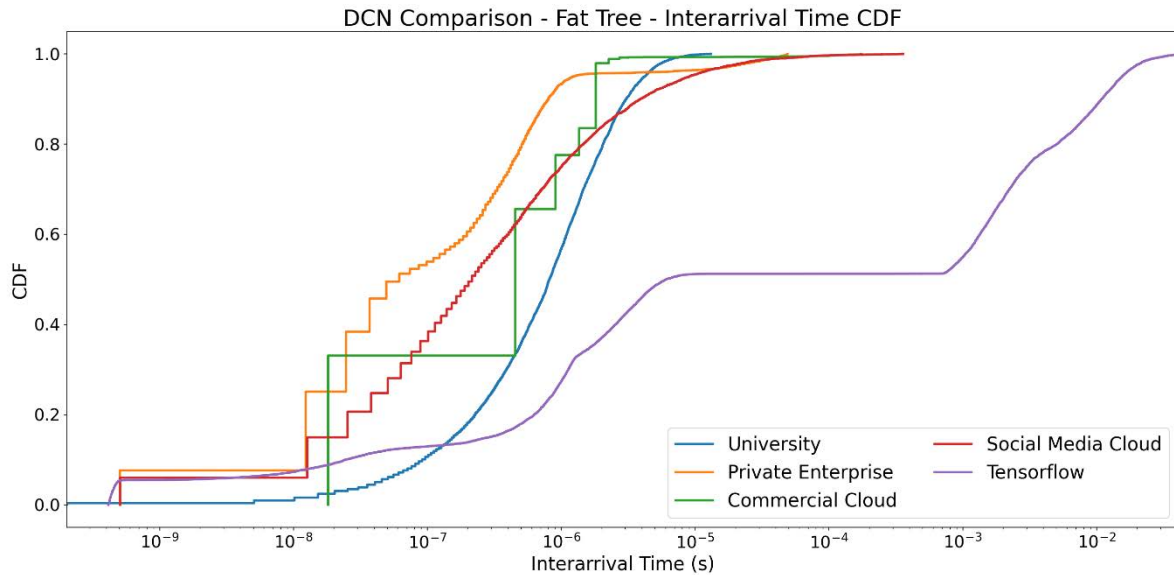
Το κέντρο δεδομένων εμπορικών επιχειρήσεων (πράσινο) επίσης παρουσιάζει διαφορετικό προφίλ, με εντονότερη συγκέντρωση γύρω από τα 10^{-8} και 10^{-7} δευτερόλεπτα. Οι υπηρεσίες SaaS, e-commerce και video streaming, που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, παράγουν ένα μοτίβο με έντονες αιχμές στα πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, κάτι που διαχωρίζει το εμπορικό cloud από τις πιο περιοδικές ροές των πανεπιστημίων ή το μικτό προφίλ των κοινωνικών δικτύων.

Τέλος, το κέντρο δεδομένων TensorFlow (μωβ) διαφέρει ριζικά από όλα τα υπόλοιπα. Το ιστόγραμμα του Σχήματος 4 καταγράφει ροές σε ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα, από 10^{-9} έως και 10^{-2} δευτερόλεπτα, με πολλαπλές κορυφές που αντικατοπτρίζουν την περιοδικότητα της εκπαίδευσης μοντέλων μηχανικής μάθησης. Στο Σχήμα 37 η CDF παρουσιάζει σκαλοειδή άνοδο, με περιόδους έντονης επικοινωνίας να εναλλάσσονται με περιόδους σχετικής αδράνειας, όπου εκτελούνται οι υπολογισμοί. Η ιδιαιτερότητα αυτή ξεχωρίζει καθαρά το TensorFlow από κάθε άλλη κατηγορία.

Συνολικά, τα δεδομένα αποκαλύπτουν ότι το Social Media Cloud και οι Ιδιωτικές Επιχειρήσεις συγκλίνουν λόγω μικρών και συχνών αφίξεων, το Πανεπιστήμιο και το Εμπορικό Cloud διαφοροποιούνται με πιο ετερογενή και απαιτητικά πρότυπα αφίξεων, ενώ το TensorFlow ξεχωρίζει πλήρως με την περιοδικότητα και το ευρύ φάσμα των interarrival times.



Σχήμα 36 Σύγκριση Χρονικών Διαστημάτων μεταξύ Αφίξεων Ροών των 5 ΔΚΔ για την Fat Tree



Σχήμα 37 Σύγκριση CDF Χρονικών Διαστημάτων μεταξύ Αφίξεων Ροών των 5 ΔΚΔ για την Fat Tree

4.1.6.3 Θερμική Ένταση

Η ανάλυση των θερμικών χαρτών προσφέρει σαφή εικόνα για τη χωρική κατανομή της κίνησης στα διαφορετικά δίκτυα κέντρων δεδομένων, αποτυπώνοντας πώς οι εφαρμογές καθορίζουν τη διάχυση ή τη συγκέντρωση των ροών.

Στα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου και στα κέντρα δεδομένων ιδιωτικών επιχειρήσεων παρατηρείται ισορροπημένη κατανομή της κίνησης σε αρκετά ζεύγη πηγής-προορισμού. Στα πανεπιστήμια, αυτό οφείλεται στη φύση των εφαρμογών (e-class, web hosting, διαμοιρασμός αρχείων), που οδηγούν σε διάχυτη αλλά μέτρια ένταση, με μέγιστες τιμές γύρω στα 7 Gbps. Στις ιδιωτικές επιχειρήσεις, η κυκλοφορία φτάνει περίπου τα 4,5 Gbps σε ορισμένα ζεύγη, κυρίως λόγω μεγάλων μεταφορών δεδομένων (backup, συγχρονισμοί), αλλά εξακολουθεί να κατανέμεται συμμετρικά, χωρίς ακραίες αιχμές.

Το ΔΚΔ εμπορικών επιχειρήσεων και το κέντρο δεδομένων εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά, καθώς και τα δύο συνδέονται με εφαρμογές που βασίζονται σε πλήθος ταυτόχρονων χρηστών (ηλεκτρονικό εμπόριο, SaaS, κοινωνικά δίκτυα). Στα εμπορικά κέντρα δεδομένων, οι θερμικοί χάρτες δείχνουν μέτρια και διαχεόμενη κυκλοφορία, με τιμές έως περίπου 4,5 Gbps, που υποδηλώνουν εξισορρόπηση μέσω των πολλαπλών διαδρομών της αρχιτεκτονικής. Στα κοινωνικά δίκτυα, αν και η μέση ένταση είναι χαμηλότερη (μέχρι περίπου 1 Gbps), η δραστηριότητα κατανέμεται σε μεγάλο αριθμό κόμβων, με συμμετρικά μοτίβα που αντικατοπτρίζουν τη συνεχή και αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ χρηστών.

Το κέντρο δεδομένων TensorFlow διαφοροποιείται έντονα, με θερμικούς χάρτες που καταγράφουν πολύ υψηλή και συμμετρική επικοινωνία σε συγκεκριμένα ζεύγη, όπου η ένταση αγγίζει περίπου το 1 Gbps σε πολλαπλά σημεία ταυτόχρονα. Αυτό εξηγείται από τη φύση των εφαρμογών μηχανικής μάθησης, οι οποίες απαιτούν συνεχή ανταλλαγή παραμέτρων και δεδομένων εκπαίδευσης μεταξύ κόμβων. Η ισορροπημένη διάχυση της κίνησης δείχνει την ανάγκη του δικτύου για υψηλή συνεργατικότητα και αντοχή σε παράλληλες μεταδόσεις μεγάλης κλίμακας.

Συνολικά, τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου και ιδιωτικών επιχειρήσεων εμφανίζουν παρόμοια ισορροπία με εντονότερη παρουσία μεγάλων ροών σε λίγα ζεύγη, τα κέντρα δεδομένων εμπορικών επιχειρήσεων και εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης μοιράζονται την κοινή τάση για ομοιόμορφη και συμμετρική επικοινωνία, ενώ το κέντρο δεδομένων TensorFlow ξεχωρίζει για την υψηλή ένταση και την καθολική κατανομή της κίνησης, αντανakλώντας τις εξαιρετικά απαιτητικές εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης.

4.1.6.4 Συμπέρασμα

Με την ανάλυση της κίνησης στα πέντε δίκτυα κέντρων δεδομένων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η φύση των εφαρμογών επηρεάζει άμεσα το προφίλ των ροών για την τοπολογία Fat Tree. Παρά τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα πέντε κέντρα δεδομένων, παρατηρούνται σαφείς ομοιότητες που οφείλονται στη φύση των εφαρμογών που εξυπηρετούν. Τα πανεπιστήμια και οι ιδιωτικές επιχειρήσεις εμφανίζουν συγγένεια λόγω των περιοδικών και μεσαίων ροών που συνδέονται με εκπαιδευτικές και επιχειρησιακές υπηρεσίες. Οι εμπορικές επιχειρήσεις και τα κοινωνικά δίκτυα συγκλίνουν στα μικρά και συχνά αιτήματα, χαρακτηριστικά της διαδραστικής χρήσης και της ανάγκης για χαμηλή καθυστέρηση. Αντίθετα, το TensorFlow διαφοροποιείται πλήρως, καθώς οι εφαρμογές μηχανικής μάθησης δημιουργούν αποκλειστικά μεγάλες και ομοιόμορφες ροές με περιοδικότητα. Συνολικά, το τηλεπικοινωνιακό προφίλ κάθε κατηγορίας διαμορφώνεται πρωτίστως από τον τύπο των εφαρμογών που φιλοξενεί.

4.2 Παραγόμενη Κίνηση για την Τοπολογία Leaf Spine

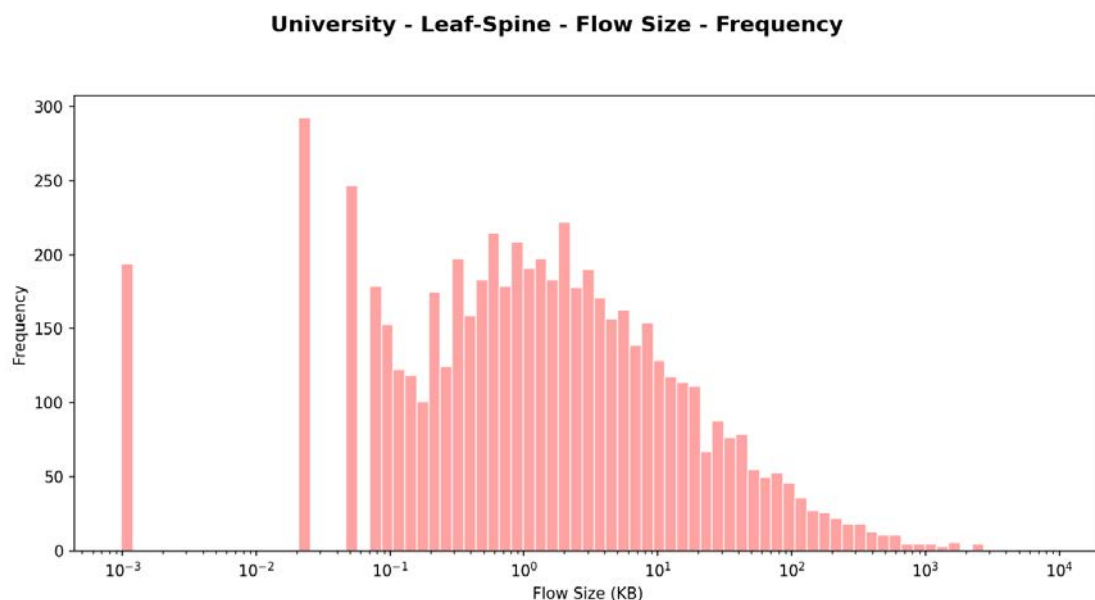
Παρακάτω στο 4.2 αναλύεται η κίνηση που παράχθηκε για τα πέντε δίκτυα κέντρων δεδομένων για την τοπολογία Leaf Spine.

4.2.1 Κέντρο Δεδομένων Πανεπιστημίου (University)

Το υποκεφάλαιο 4.2.1 αναλύει τα χαρακτηριστικά κίνησης μεγέθη ροής, χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και θερμική ένταση για τα ΔΚΔ Πανεπιστημίου για την τοπολογία Leaf Spine.

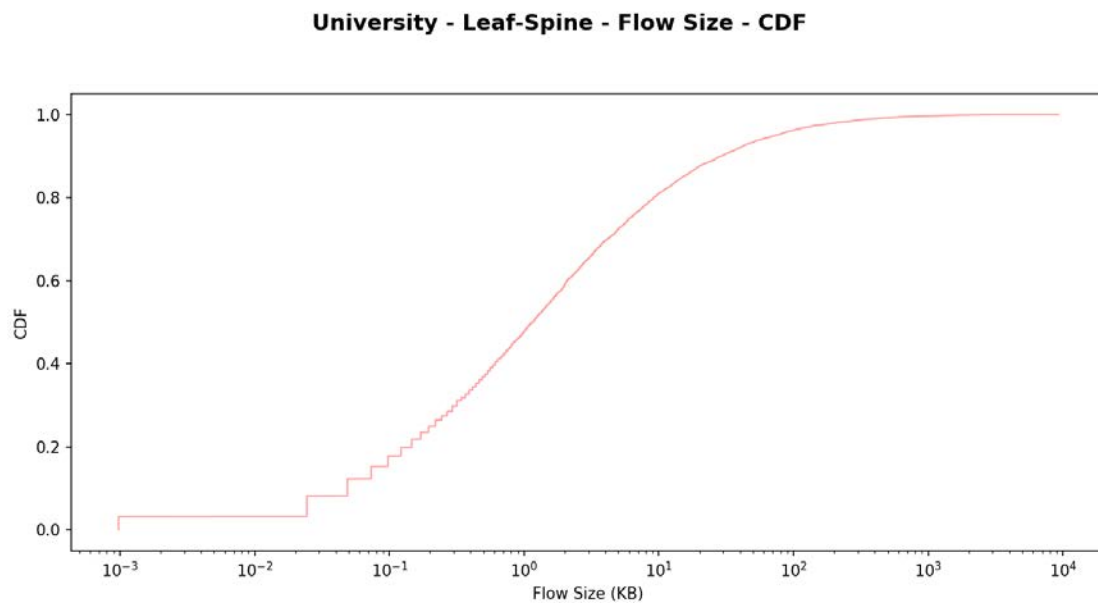
4.2.1.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα μεγέθους ροής στην τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει επίσης αρκετές κορυφές στο εύρος 10^{-2} και 10 KB. Οι περισσότερες ροές βρίσκονται κοντά στο 10^{-2} KB, ενώ πολύ λίγες ξεπερνούν τα 10^2 KB. Το Σχήμα 38 είναι ελαφρώς συμμετρικό, υποδεικνύοντας λιγότερο ποικίλη κατανομή των μεγεθών ροής, με τη ροή πληροφορίας να μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος ροής.



Σχήμα 38 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για University Workload

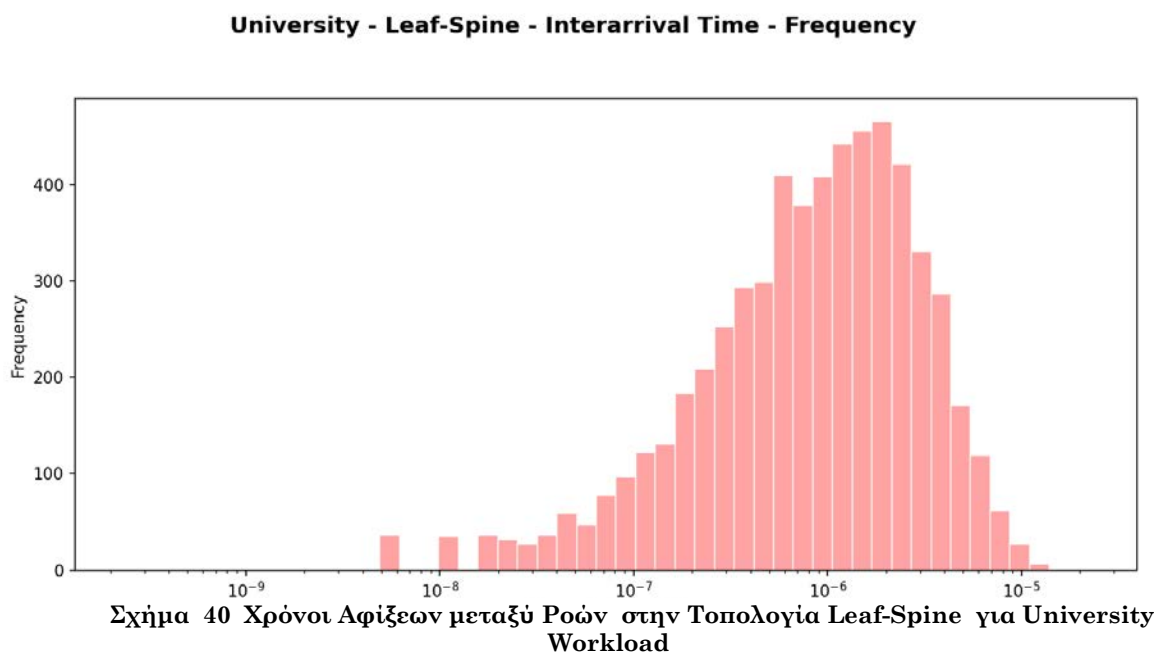
Η CDF ενισχύει αυτή την ανάγνωση, το 80% των ροών φαίνεται να είναι κάτω από 10 KB, δείχνοντας ισχυρή συγκέντρωση μεγέθους ροής σε αυτή τη ζώνη με παρουσία κυρίως ελαφρών επικοινωνιών. Η κατανομή του μεγέθους στο Σχήμα 39 παρουσιάζεται σχετικά προβλέψιμη ήπια με όχι ιδιαίτερες απότομες κλίσεις, το εύρος των τιμών με τα σκαλοειδή σημεία της καμπύλης είναι από τα 10^{-3} έως τα 5 περίπου KB.



Σχήμα 39 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για University Workload

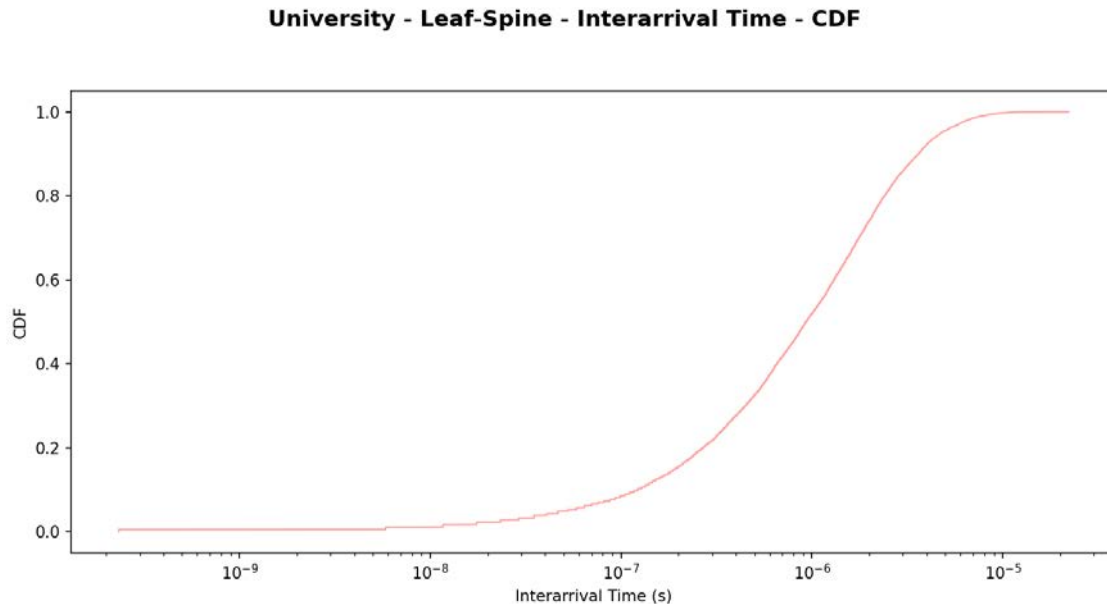
4.2.1.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Σε αντίθεση με την τοπολογία Fat Tree, το διάγραμμα των διαστημάτων μεταξύ αφίξεων για την τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει μια μετατόπιση προς τα χαμηλότερα σημεία του λογαριθμικού άξονα, με τα περισσότερα διαστήματα να κυμαίνονται μεταξύ 10^{-7} και 10^{-5} δευτερολέπτων, υποδεικνύοντας υψηλή συχνότητα αφίξεων και έντονα πυκνή ροή πακέτων. Το Σχήμα 40 έχει σχετικά απότομη κλίση χωρίς απότομες κορυφές που ενδέχεται να σχετίζεται με ασύγχρονες ροές, εσωτερικές λειτουργίες υπηρεσιών backend σε μοντέλα με μικροϋπηρεσίες ή σε συστήματα ανάλυσης πραγματικού χρόνου.



Σχήμα 40 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για University Workload

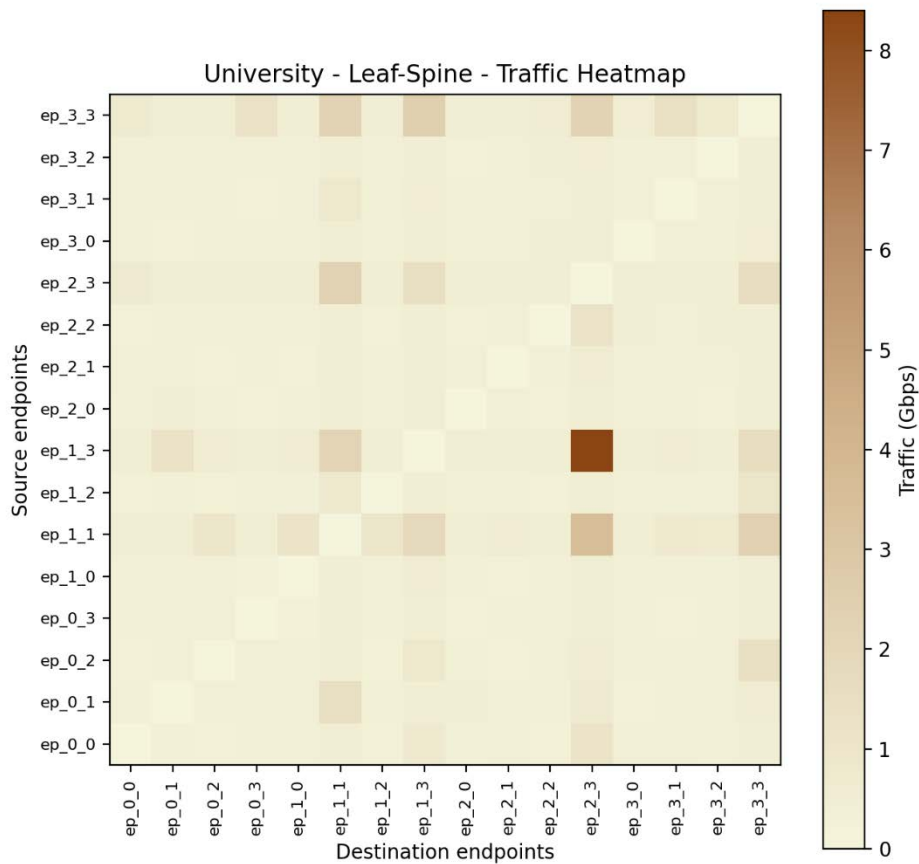
Η CDF στο Σχήμα 41 υπογραμμίζει αυτό το πιο ήπιο μοτίβο, μόνο περίπου το 10% των ροών φτάνει σε διάστημα μικρότερο από 10^{-7} δευτερόλεπτα, ενώ το 60% έχει φτάσει έως τα 10^{-6} δευτερόλεπτα. Η κλίση σηματοδοτεί μια πιο διασκορπισμένη συμπεριφορά στα διαστήματα μεταξύ των αφίξεων, με αυτό να μειώνει τον κίνδυνο συμφόρησης, αλλά ενδέχεται να υποδηλώνει υποεκμετάλλευση ή χαμηλότερη ανταπόκριση σε χρονικά ευαίσθητες καταστάσεις.



Σχήμα 41 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για University Workload

4.2.1.3 Διάγραμμα θερμικής έντασης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο θερμικός χάρτης της Leaf-Spine τοπολογίας παρουσιάζει ένα αραιό και ελάχιστα συμμετρικό μοτίβο κίνησης. Το Σχήμα 42 δείχνει ότι μόνο λίγα ζεύγη πηγής-προορισμού εμφανίζουν σημαντική δραστηριότητα, ενώ η πλειοψηφία του διαγράμματος υποδεικνύει πολύ ελαφριά ή αμελητέα επικοινωνία. Ένα ζεύγος έχει το μέγιστο φορτίο στα 8 Gbps με αυτό να υποδηλώνει ότι η κυκλοφορία είναι σε μεγάλο βαθμό περιορισμένη σε συγκεκριμένους κόμβους, πιθανόν λόγω περιορισμένου αριθμού ταυτόχρονων υπηρεσιών ή εφαρμογών που επικοινωνούν έντονα μόνο με επιλεγμένους προορισμούς.



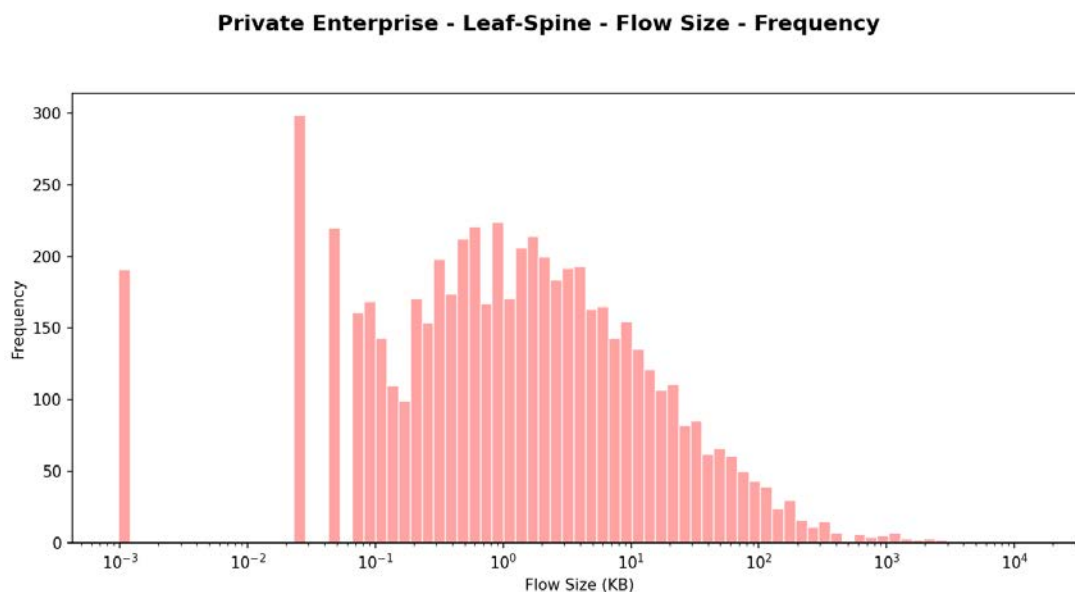
Σχήμα 42 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Leaf-Spine για University Workload

4.2.2 Κέντρο Δεδομένων Ιδιωτικής Επιχείρησης (Private Enterprise)

Στα σχήματα των υποκεφαλαίων 4.2.2.1, 4.2.2.2 και 4.2.2.3 βλέπουμε τις γραφικές παραστάσεις με τα μεγέθη ροής, χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και θερμική ένταση, για την τοπολογία Leaf Spine στο ΔΚΔ Ιδιωτικής Επιχείρησης.

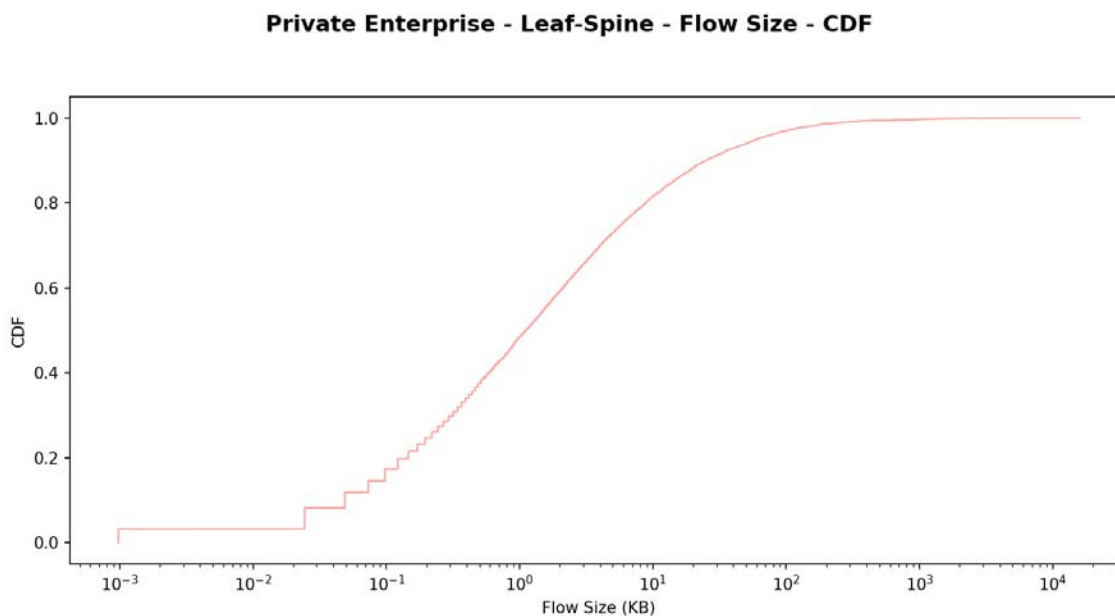
4.2.2.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα της Leaf-Spine τοπολογίας παρουσιάζει, με συγκέντρωση ροών μεταξύ 10^{-1} και 10 KB, με κορυφή ελαφρώς υψηλότερη περίπου στα 5×10^{-2} KB. Το διάγραμμα της Leaf-Spine παρουσιάζει μια ελαφρώς ήπια πτώση πέρα από τα 10 KB, υποδεικνύοντας λιγότερο συχνή διαχείριση μεγάλων ροών. Στο Σχήμα 43 βλέπουμε ότι οι εφαρμογές των ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης ευνοούν μικρές επι το πλείστον ροές, γεγονός που ευθυγραμμίζεται με τη φύση των εφαρμογών που υπάρχουν σε αυτά.



Σχήμα 43 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για Private Enterprise Workload

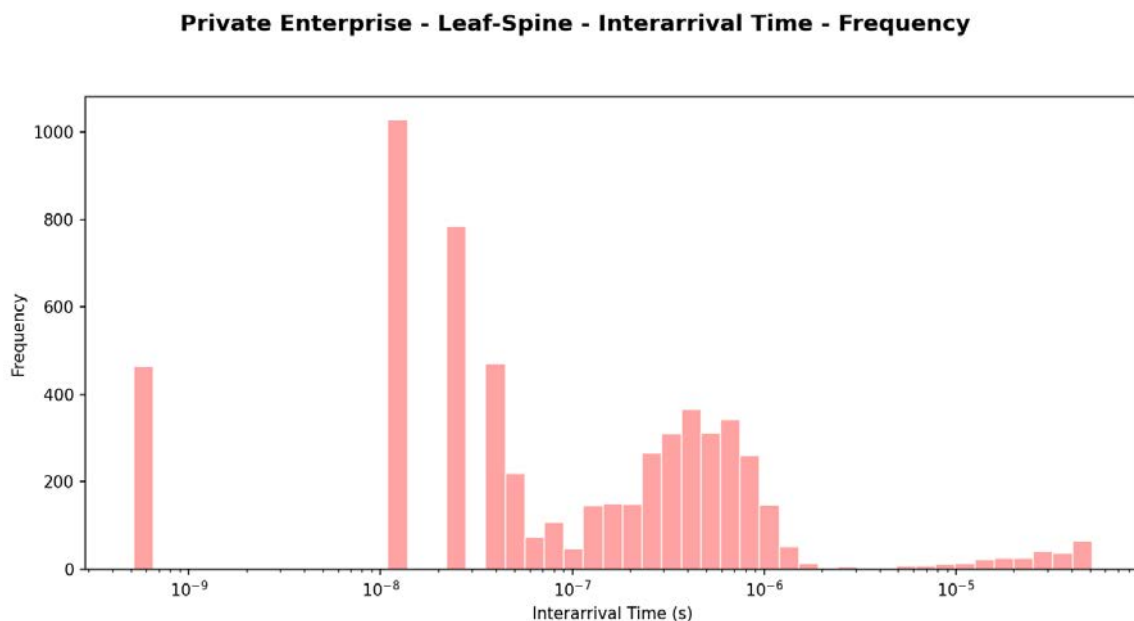
Η CDF για τις διαστάσεις ροής της Leaf-Spine, όπως φαίνεται στο Σχήμα 44, αυξάνεται απότομα 10^{-1} έως 10 KB, δείχνοντας ότι πάνω από το 90% των ροών πέφτει κάτω από το κατώφλι των 10^2 KB. Ωστόσο, η καμπύλη κορυφώνεται λίγο πέρα από αυτό το σημείο, επιβεβαιώνοντας μια χαμηλότερη συχνότητα εμφάνισης μεγαλύτερων ροών μέχρι και τα 10^4 KB.



Σχήμα 44 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για Private Enterprise Workload

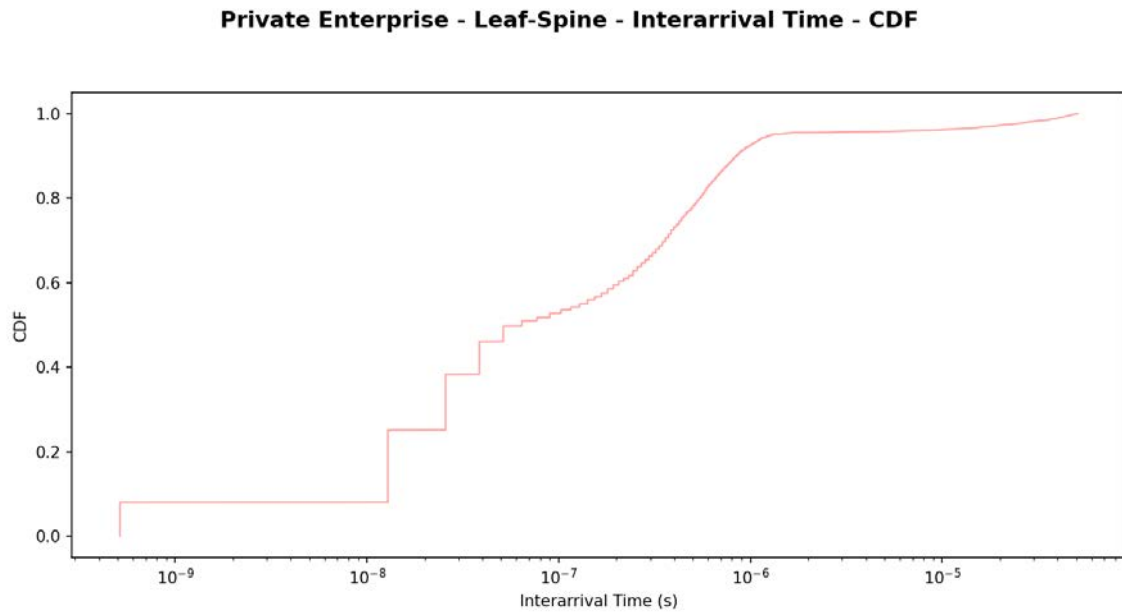
4.2.2.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των διαστημάτων μεταξύ αφίξεων για την τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει ένα σύνθετο και πολυκορυφικό μοτίβο, με τα περισσότερα κινήματα να εμφανίζονται στο φάσμα μεταξύ 10^{-8} και 10^{-6} δευτερολέπτων. Στο Σχήμα 45, οι κύριες κορυφές εντοπίζονται γύρω από τα 10^{-8} και 10^{-6} δευτερόλεπτα, υποδεικνύοντας ότι η πλειονότητα των πακέτων φτάνει σε εξαιρετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτή η διακύμανση των χρόνων υποδεικνύει υψηλή συχνότητα άφιξης και πιθανή παρουσία παραλλήλων και αυτόματων διεργασιών, όπως μικροϋπηρεσίες, real-time analytics ή εντατικές επικοινωνίες μεταξύ εσωτερικών μονάδων του συστήματος. Αν και υπάρχουν μικρότερες κορυφές σε υψηλότερους χρόνους, η κατανομή παραμένει ισχυρά συγκεντρωμένη σε εύρος πολύ μικρών τιμών.



Σχήμα 45 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για Private Enterprise Workload

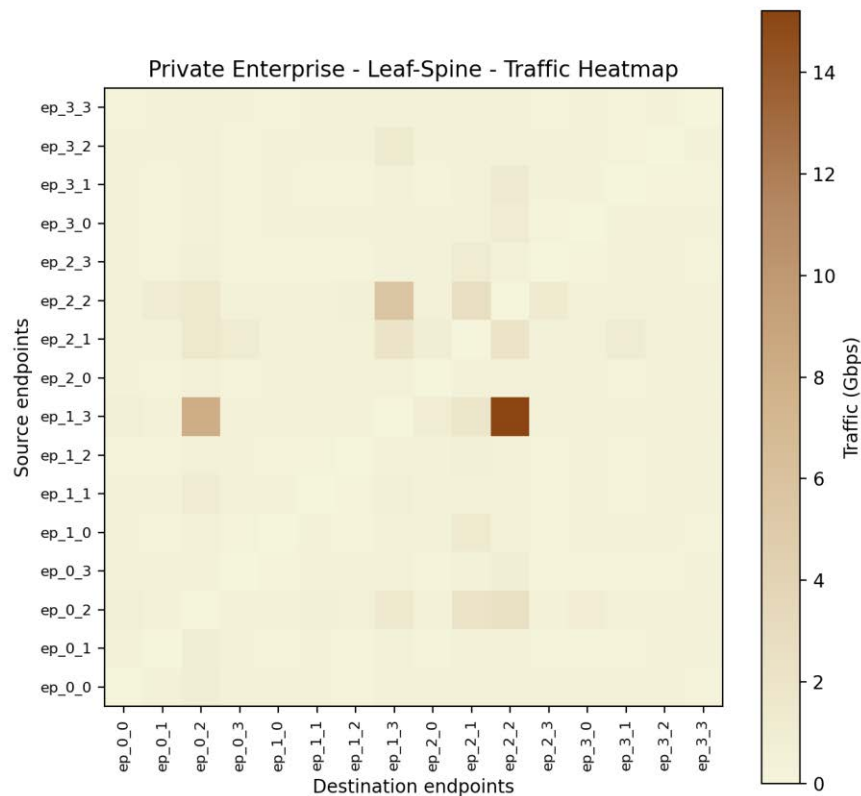
Η αντίστοιχη CDF επιβεβαιώνει αυτή τη συμπεριφορά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 46. Η καμπύλη παρουσιάζει απότομη αύξηση μεταξύ 10^{-8} και 10^{-7} δευτερολέπτων, και προσεγγίζει το 90% πριν τα 10^{-6} δευτερόλεπτα. Αυτό δείχνει πως η κυκλοφορία είναι έντονα ταυτόχρονη, κάτι που περιγράφει την φύση των ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης.



Σχήμα 46 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για Private Enterprise Workload

4.2.2.3 Διάγραμμα θερμικής έντασης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας Leaf-Spine κάτω από αυτό το φορτίο δείχνει ένα πιο αραιό μοτίβο, με μόνο λίγα ζεύγη πηγή-προορισμός να συμμετέχουν σε σημαντική ανταλλαγή κίνησης και τα υπόλοιπα να έχουν ελάχιστη έως και μηδενική κίνηση. Το *Σχήμα 47* δείχνει ότι η δραστηριότητα είναι πιο συγκεντρωτική, με το μέγιστο



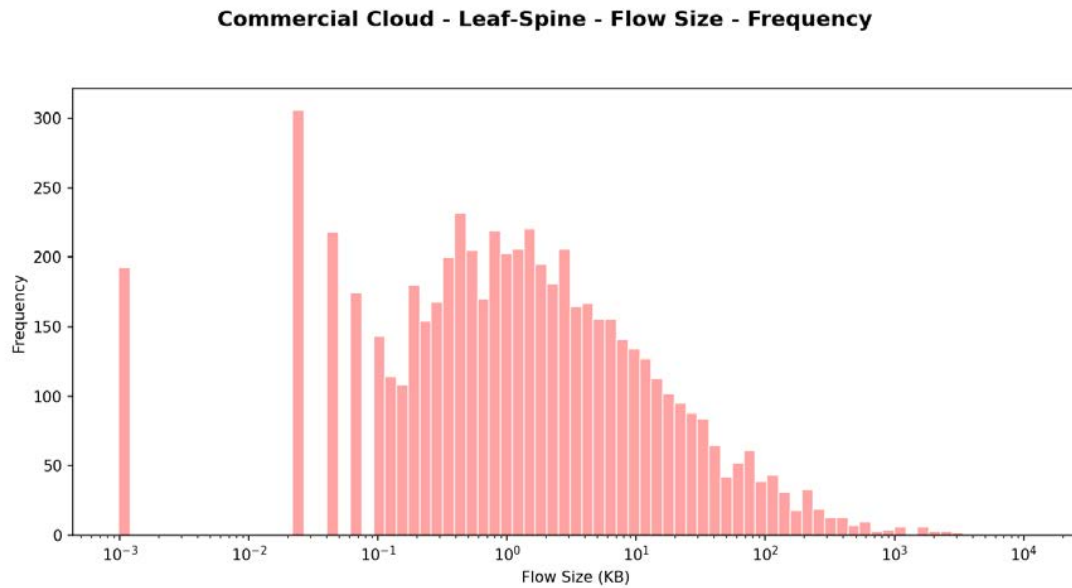
Σχήμα 47 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Leaf-Spine για Private Enterprise Workload

4.2.3 Κέντρο Δεδομένων Εμπορικής Επιχείρησης (Commercial Cloud)

Στο υποκεφάλαιο 4.2.2 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις με τα μεγέθη ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση στο ΔΚΔ Εμπορικής Επιχείρησης στην τοπολογία Leaf Spine.

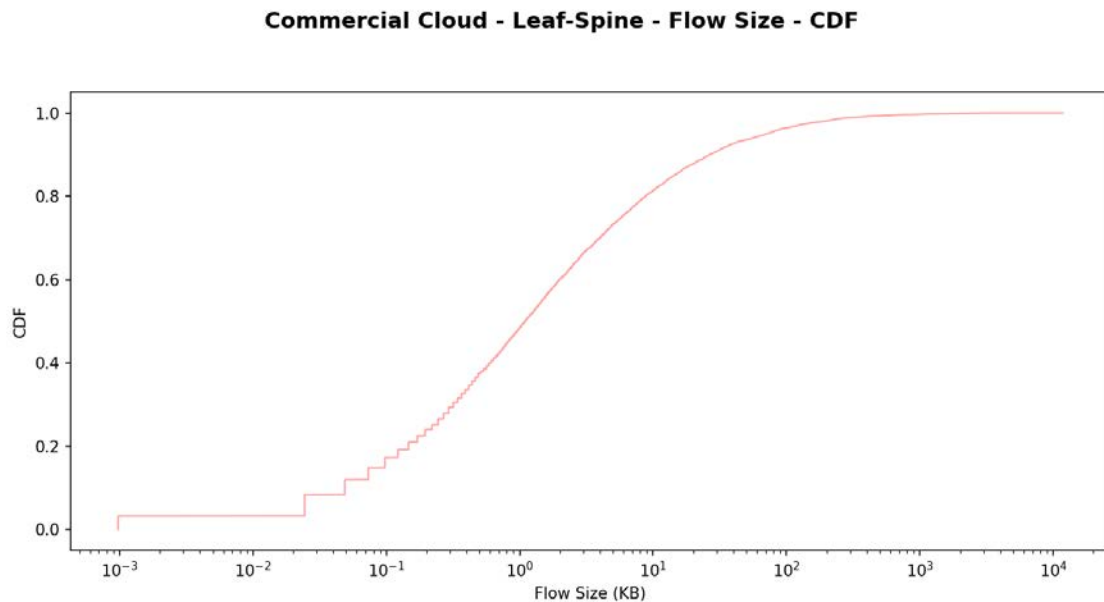
4.2.3.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα μεγέθους ροής στην τοπολογία Leaf Spine εμφανίζει παρόμοιες τιμές με αυτό της Fat Tree, με το μεγαλύτερο μέρος των ροών να συγκεντρώνεται στην περιοχή 10^{-1} έως 10 KB, με πολλές κορυφές στο διάστημα αυτόπου υποδηλώνουν ποικιλία τιμών. Στο Σχήμα 48, βλέπουμε ότι μετά τα 10 KB η συχνότητα των μεγεθών μειώνεται σταδιακά, αν και παραμένουν κάποιες ροές μεγέθους άνω των 10^2 KB, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσίαση υπηρεσιών με ανάγκες μεγαλύτερων μεταφορών.



Σχήμα 48 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για Commercial Cloud Workload

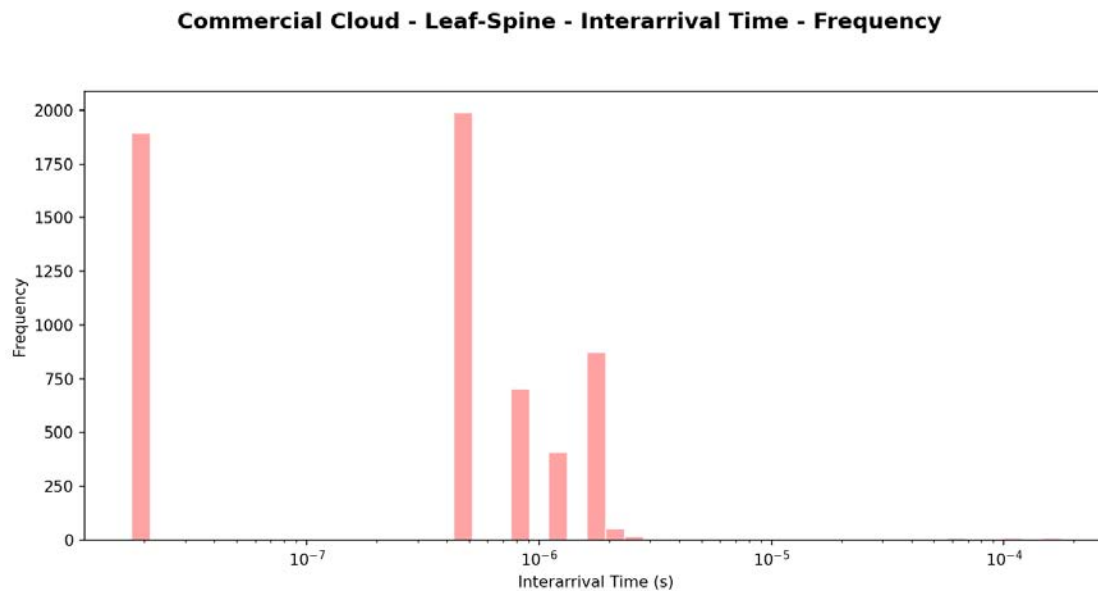
Η CDF παρουσιάζει μια σταθερή άνοδο κυρίως μεταξύ 10^{-1} και 10 KB. Το Σχήμα 49 δείχνει ότι το 80% των ροών εντοπίζεται κάτω περίπου από 10 KB και αντικατοπτρίζει Τα ΔΚΔ εμπορικής επιχείρησης με προφίλ προσανατολισμένο σε πιο σταθερά και τυποποιημένα μοτίβα δεδομένων, με μικρότερη ευελιξία στην αντιμετώπιση εκρήξεων κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας.



Σχήμα 49 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για Commercial Cloud Workload

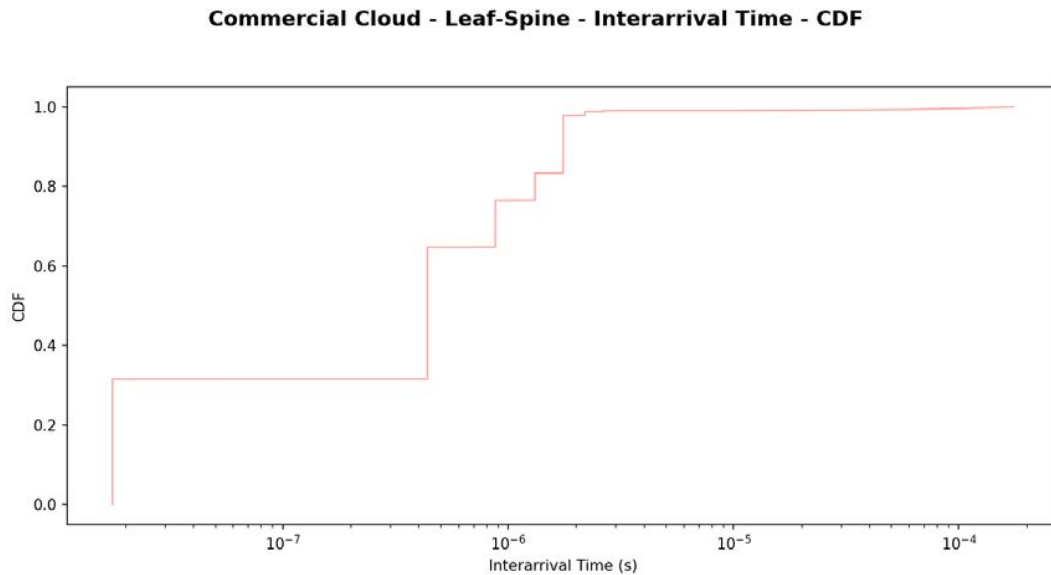
4.2.3.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων στην τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει μια έντονα συμπυκνωμένη και πολυκορυφική κατανομή στο φάσμα των 10^{-8} έως 10^{-6} δευτερολέπτων, υποδεικνύοντας πολύ υψηλή συχνότητα άφιξης πακέτων. Το Σχήμα 50 χαρακτηρίζεται από διακριτές αιχμές σε αυτά τα εξαιρετικά μικρά διαστήματα ενδεχομένως αντανακλούν τις παράλληλες επικοινωνίες μικροϋπηρεσιών.



Σχήμα 50 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για Commercial Cloud Workload

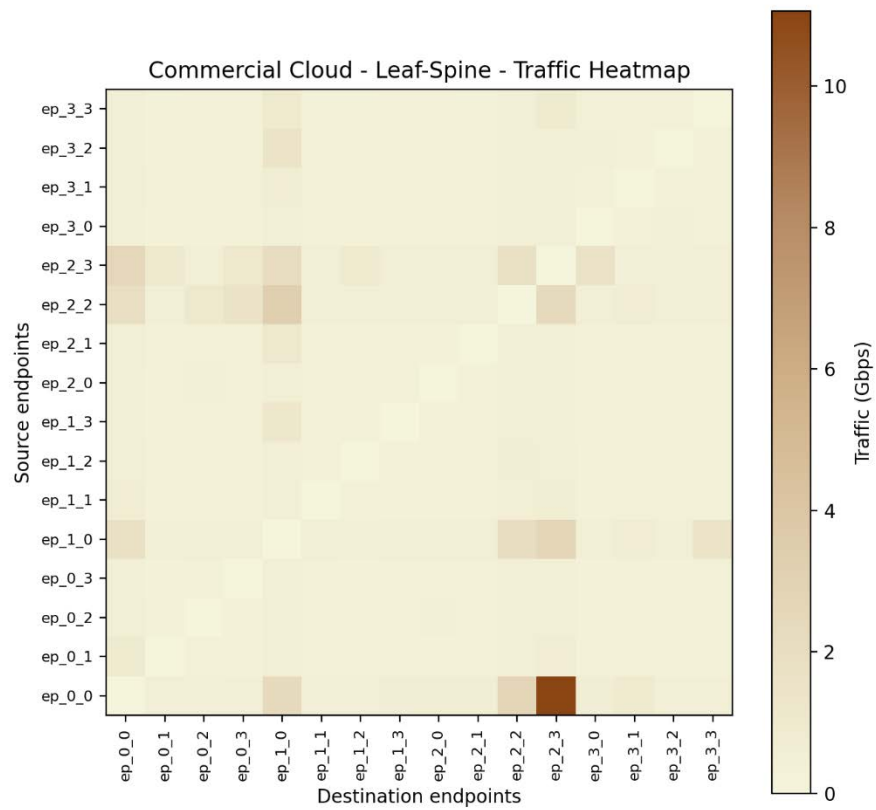
Η CDF παρουσιάζει απότομες αναβάσεις, με περίπου 80% των πακέτων να έχουν φτάσει πριν το όριο του 10^{-6} δευτερολέπτων υποδηλώνοντας συνεχή και πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Το Σχήμα 51 δείχνει την σκαλοειδή μορφή της CDF επιβεβαιώνοντας την ερμηνεία των κενών σημείων. Σε αντίθεση με πιο αραιά, αυτό το μοτίβο υποδηλώνει ένα δίκτυο στο οποίο εντοπίζονται έντονο και ταυτόχρονο φορτίο.



Σχήμα 51 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για Commercial Cloud Workload

4.2.3.3 Διάγραμμα θερμικής έντασης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο θερμικός χάρτης της τοπολογίας Leaf-Spine για το ΔΚΔ εμπορικής επιχείρησης παρουσιάζει μια αραιή και άνισα κατανεμημένη επικοινωνία, με το μεγαλύτερο μέρος των ζευγών πηγής-προορισμού να εμφανίζει πολύ χαμηλή έως μηδενική δραστηριότητα. Οι περιοχές υψηλότερης έντασης συγκεντρώνονται στο κάτω τμήμα του *Σχήματος 52*, υποδηλώνοντας ότι μόνο ένας περιορισμένος αριθμός κόμβων εμπλέκεται σε έντονες μεταδόσεις. Περίπου 8 ζεύγη έχουν φορτίο κοντά στα 4 Gbps αλλά ένα μόνο ζεύγος παρατηρείται πως έχει το μέγιστο φορτίο στα 10 Gbps. Αυτό το μοτίβο φανερώνει τοπικοποιημένη κυκλοφορία, πιθανώς και πιθανής συγκέντρωσης υπηρεσιών.



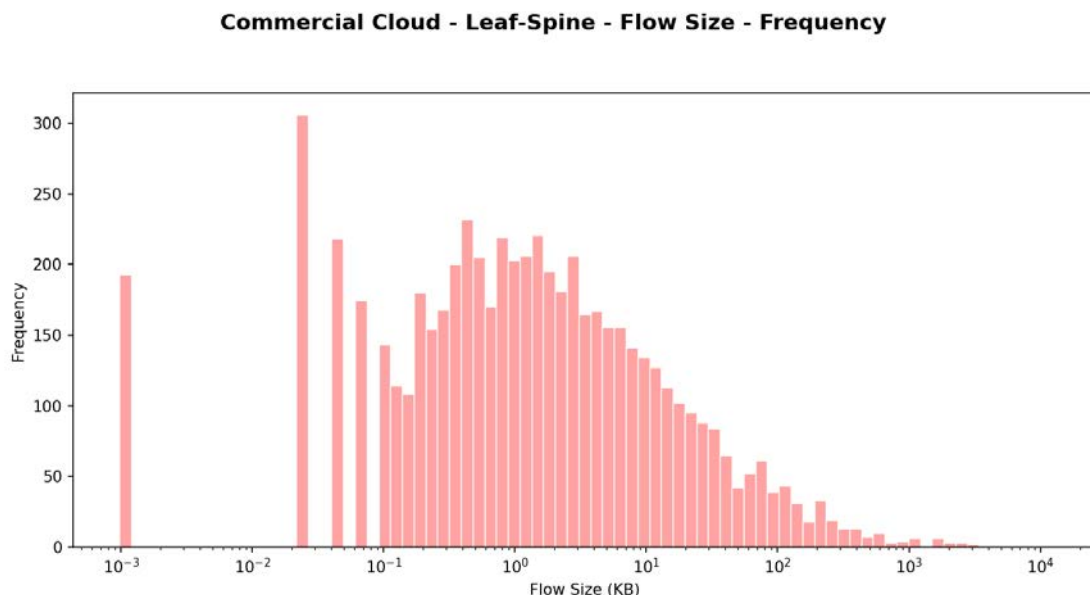
Σχήμα 52 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Leaf-Spine για Commercial Cloud Workload

4.2.4 Κέντρο Δεδομένων Εφαρμογών Κοινωνική Δικτύωση (Social Media Cloud)

Στο 4.2.4., 4.2.2.2 και 4.2.2.3 βλέπουμε τις γραφικές παραστάσεις με τα μεγέθη ροής, χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και θερμική ένταση, για την τοπολογία Leaf Spine στο ΔΚΔ Ιδιωτικής Επιχείρησης.

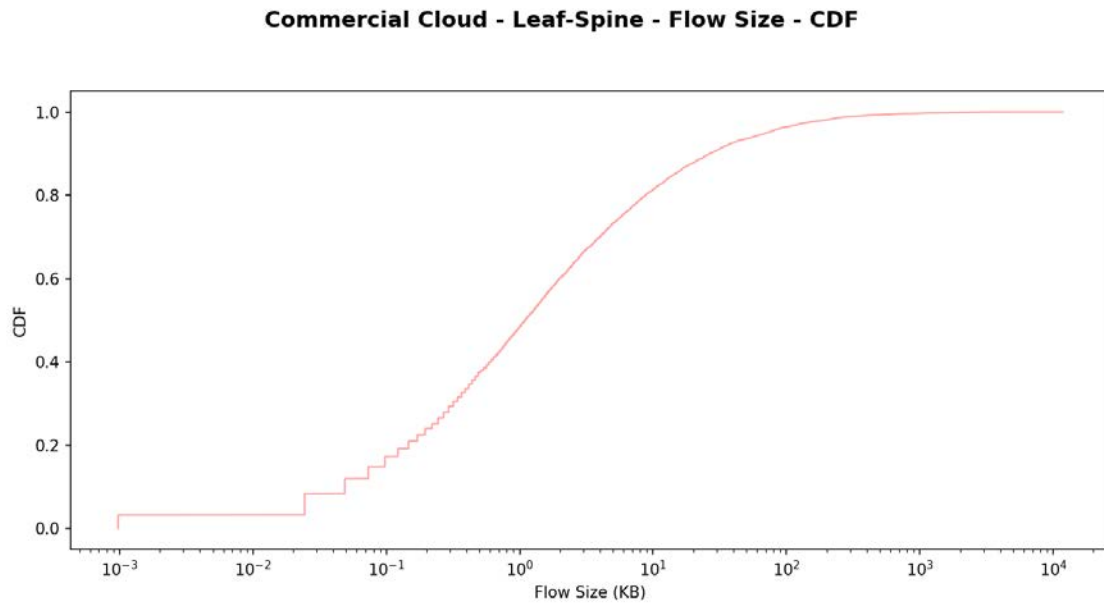
4.2.4.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Η τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει ένα πολύ παρόμοιο διάγραμμα μεγέθους ροής με εκείνο του Fat Tree, με σαφή συγκέντρωση ροών στην περιοχή μεταξύ 1 και 10^2 KB. Το διάγραμμα είναι μονόκορφο και το κέντρο συγκεντρώνεται κοντά στα 10 KB, αντανακλώντας και πάλι τις τυποποιημένες ανταλλαγές δεδομένων που συναντώνται συχνά σε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης. Το *Σχήμα 53* υποδεικνύει ελαφρώς μικρότερη διασπορά, με περιορισμένο αριθμό ροών πέραν των 10^2 KB. Αυτό ενδέχεται να υποδηλώνει είτε περιορισμένη δυνατότητα διαχείρισης πολύ μεγάλων μεταφορών είτε μια πολιτική δρομολόγησης που ευνοεί πιο συνεπείς, μικρότερες ροές. Η μείωση των ροών στην ουρά δείχνει πως η Leaf-Spine ενδέχεται να έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε σενάρια μέσης κατανάλωσης και όχι για απαιτητικές μεταφορές τύπου burst ή μεγάλων αρχείων.



Σχήμα 53 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για Social Media Cloud Workload

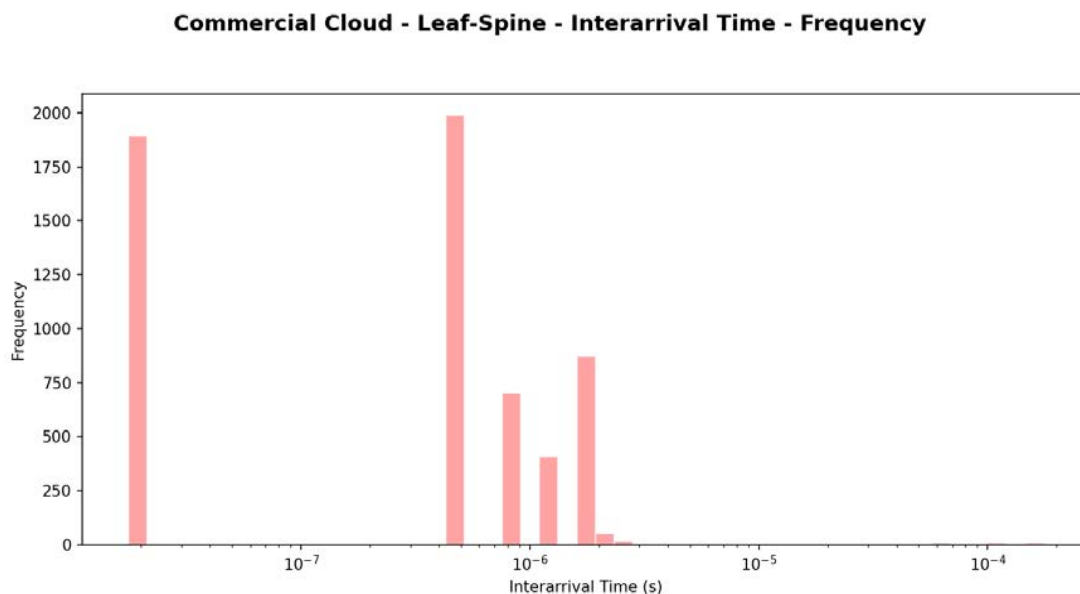
Η CDF της Leaf-Spine επιβεβαιώνει το παραπάνω μοτίβο, καταγράφοντας σκαλοειδή αύξηση του ποσοστού ροών στο εύρος των 10^{-3} έως 1 KB. Η κλίση της καμπύλης είναι ιδιαίτερα έντονη στο διάστημα 1 έως 10^2 KB, γεγονός που δείχνει πως η πλειοψηφία των ροών είναι πυκνά συγκεντρωμένη γύρω από τον μέσο όρο. Το *Σχήμα 54* φανερώνει ότι έχουμε μικρή παρουσία ροών άνω των 10^2 KB, με το 80% των ροών να φτάνει γρήγορα στα 10^2 KB, γεγονός που αντικατοπτρίζει χαμηλότερη επικράτηση ροών μεγάλης κλίμακας.



Σχήμα 54 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για Social Media Cloud Workload

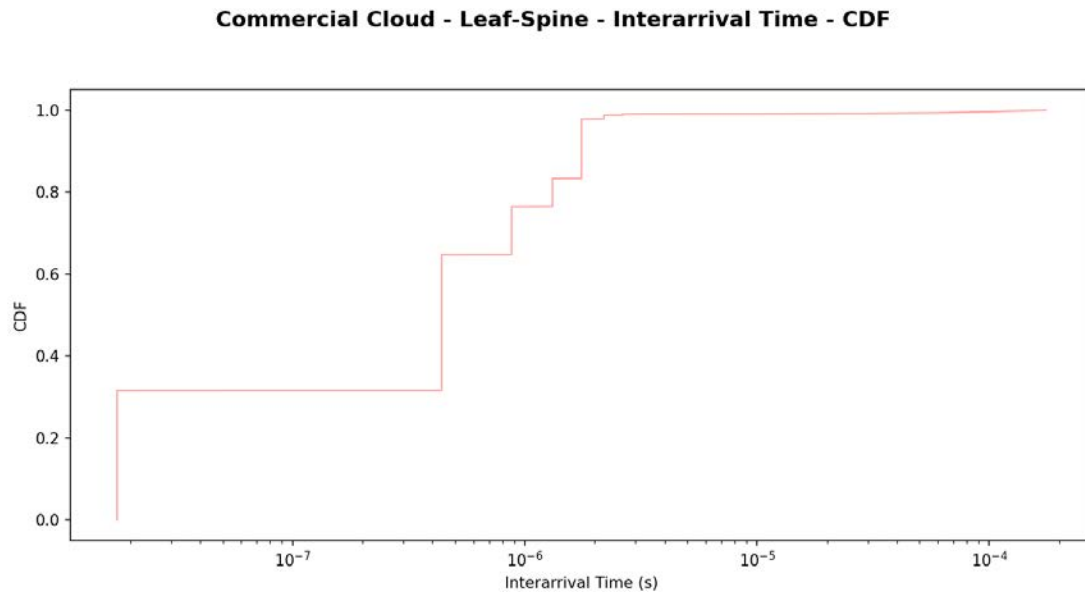
4.2.4.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα της Leaf-Spine τοπολογίας παρουσιάζει μια συμπαγή και έντονα συγκεντρωμένη κατανομή διαστημάτων μεταξύ αφίξεων, η οποία εκτείνεται κυρίως μεταξύ 10^{-8} και 10^{-5} δευτερολέπτων. Ο πολλαπλές κορυφές του *Σχήματος 55* στο διάστημα αυτό υποδεικνύουν υψηλή συχνότητα και εξαιρετικά μικρούς χρόνους άφιξης μεταξύ ροών. Αυτή η πυκνή συσσώρευση είναι ενδεικτική παράλληλης επεξεργασίας γεγονότων, όπως επικοινωνίες μεταξύ μικροϋπηρεσιών, real-time analytics ή συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ πελάτη και διακομιστή, όπως απαιτείται σε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης.



Σχήμα 55 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για Social Media Cloud Workload

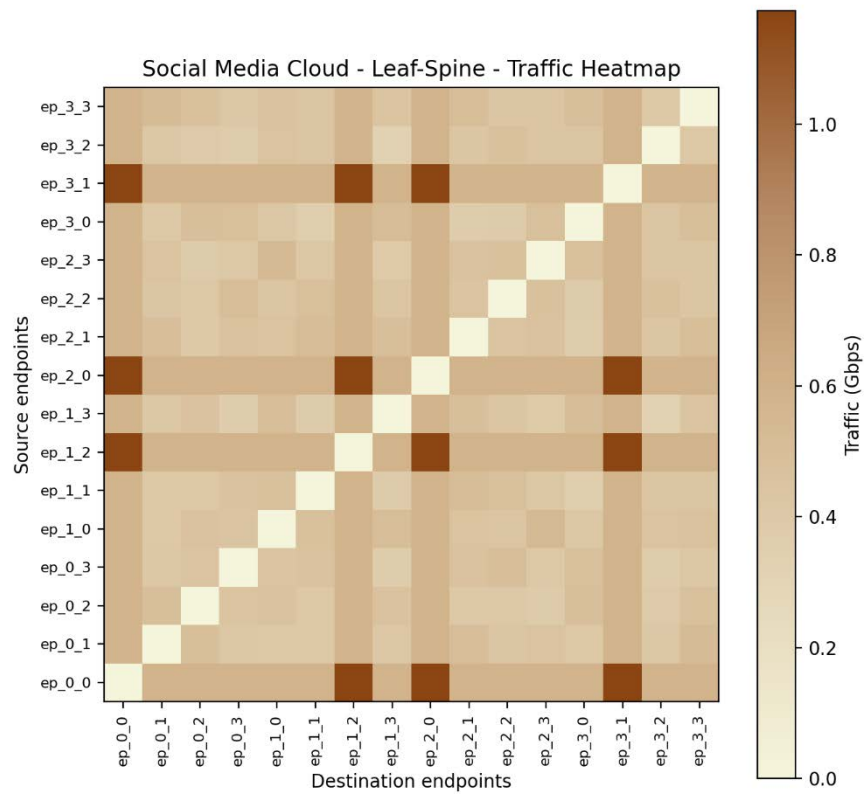
Η CDF για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων της Leaf-Spine δείχνει ταχεία, απότομη και σκαλοειδή άνοδο, με περίπου το 80% των ροών φτάνει πριν τα 10^{-6} δευτερόλεπτα, ενώ το 90% πριν από τα 10^{-5} δευτερόλεπτα. Το Σχήμα 56 αποκαλύπτει ότι σχεδόν το σύνολο της κυκλοφορίας πραγματοποιείται μέσα σε ελάχιστα microsecond, χωρίς αξιοσημείωτη ουρά προς μεγαλύτερους χρόνους. Η συνολική κατανομή υποδεικνύει ότι τα ΔΚΔ εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης απντούν ιδιαίτερα ταυτόχρονες και έντονες δραστηριότητες.



Σχήμα 56 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για Social Media Cloud Workload

4.2.4.3 Διάγραμμα κατανομής τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο χάρτης θερμότητας της Leaf-Spine τοπολογίας αποκαλύπτει μια ελαφρώς πιο περιορισμένη σε φορτίο επικοινωνία, με συγκεκριμένα ζεύγη πηγής-προορισμού να κυριαρχούν. Το Σχήμα 57 παρουσιάζει σημεία με αξιοσημείωτη συσσώρευση δραστηριότητας, με 12 ζεύγη να έχουν το μέγιστο φορτίο κοντά στα 1 Gbps. Αυτό το χαρακτηριστικό, υποδηλώνει ποικιλομορφία διαδρομών, με κατανεμημένη κίνηση. Τα ΔΚΔ εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης φαίνεται να παρουσιάζουν ήπια ροή κλυκλοφορίας με τα ζεύγη πηγής-προορισμού να έχουν χαμηλό φορτίο.



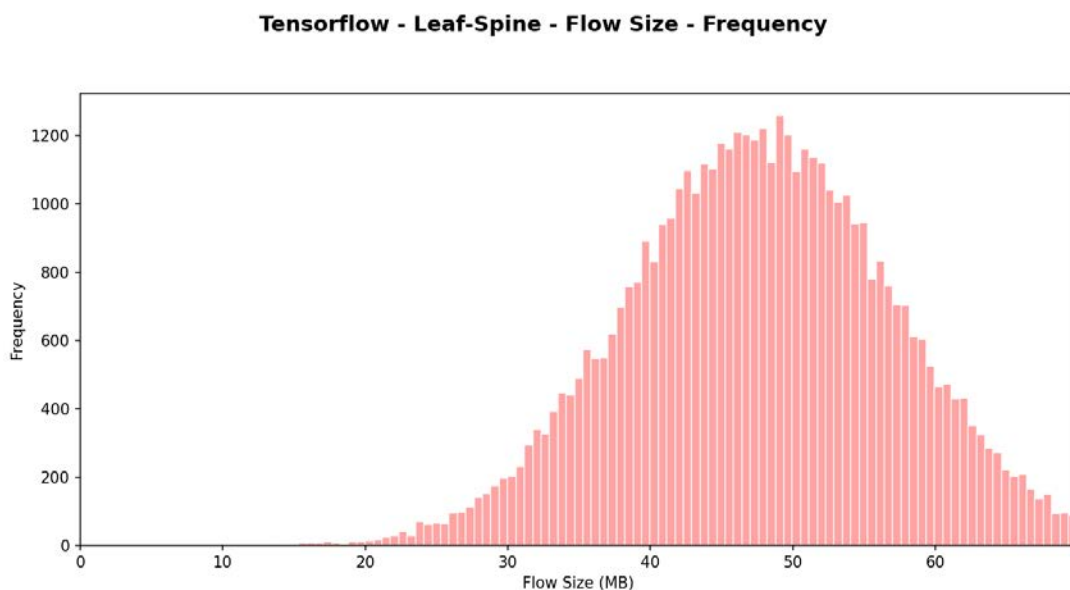
Σχήμα 57 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Leaf-Spine για Social Media Cloud Workload

4.2.5 Κέντρο Δεδομένων TensorFlow για Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης

Το 4.2.5 παρουσιάζει τα μεγέθη ροής, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών και την θερμική ένταση στο ΔΚΔ TensorFlow για Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης για την τοπολογία Leaf Spine.

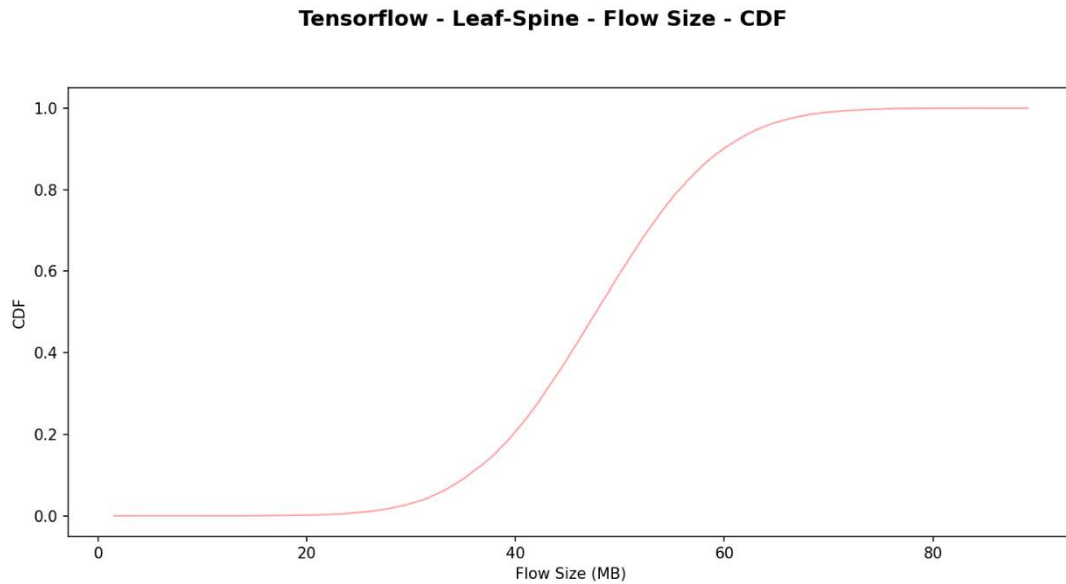
4.2.5.1 Διάγραμμα μεγέθους ροής - Flow Size (Histogram & CDF)

Όπως και στο Fat Tree, το ιστογράμματα μεγέθους ροής κάτω από την τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει μια στενή κορυφή στην ίδια περιοχή 40 έως 60 MB, με την υψηλότερη κορυφή πριν από τα 50 MB. Το Σχήμα 58 αντανακλά και πάλι το καθοριστικό μέγεθος των ανταλλαγών δεδομένων που σχετίζονται με το TensorFlow καθώς και την ύπαρξη σταθερού προφίλ μετάδοσης δεδομένων, όπως είναι συνήθως αναμενόμενο σε εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης, όπου κάθε κόμβος αποστέλλει πακέτα σταθερού όγκου. Το διάγραμμα υποδεικνύει ότι ητα ΔΚΔ TensorFlow χειρίζεται αυτές τις μαζικές μεταφορές ομοιόμορφα.



Σχήμα 58 Μέγεθος Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για TensorFlow Workload

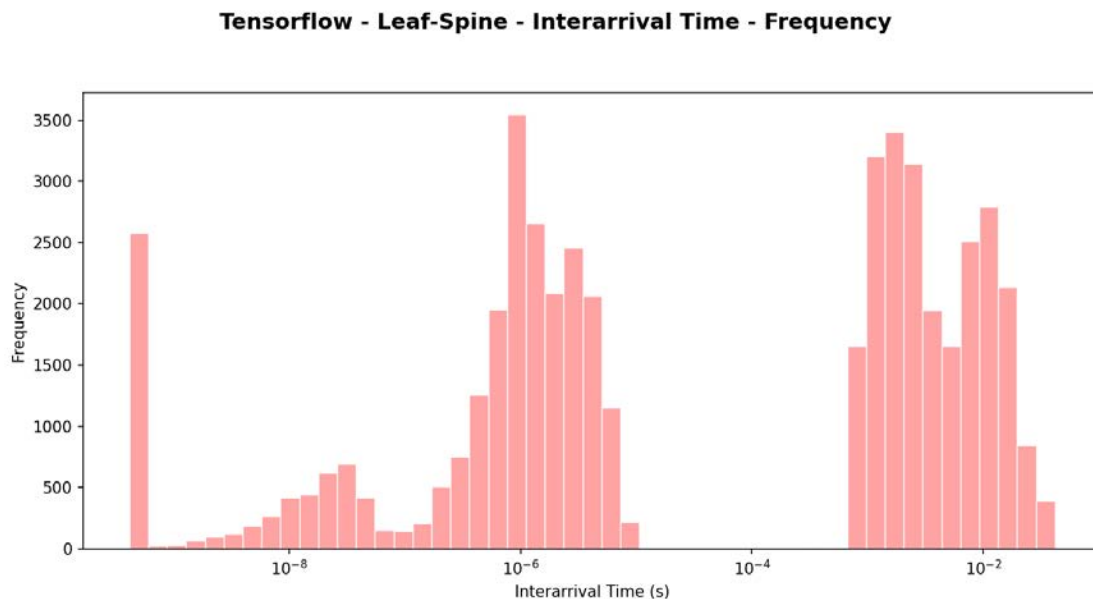
Η CDF της Leaf-Spine τοπολογίας παρουσιάζει μια παρόμοια απότομη αύξηση όπως και στο Fat Tree, ξεκινώντας λίγο πριν από 30 MB και φτάνοντας σχεδόν στο 90% στα 60 MB. Αυτή η συμπεριφορά επιβεβαιώνει την περιορισμένη διακύμανση και την ισχυρή ομοιογένεια του μεγέθους των ροών στο συγκεκριμένο workload. Το Σχήμα 59 παρουσιάζει ταχεία άνοδο που επιβεβαιώνει ότι σχεδόν όλοι οι ρυθμοί ανήκουν σε μια τάξη με στενές σχέσεις όσον αφορά τον όγκο δεδομένων, με μικρή απόκλιση. Ένα τέτοιο είδος συμπεριφοράς υπογραμμίζει την προβλέψιμη φύση της κίνησης ML σε πλαίσια διανεμημένης μάθησης και δείχνει ότι η τοπολογία Leaf-Spine διατηρεί αυτή την ομοιογένεια κατά τη διάρκεια ανταλλαγής δεδομένων.



Σχήμα 59 CDF Μεγέθους Ροής στην Τοπολογία Leaf-Spine για TensorFlow Workload

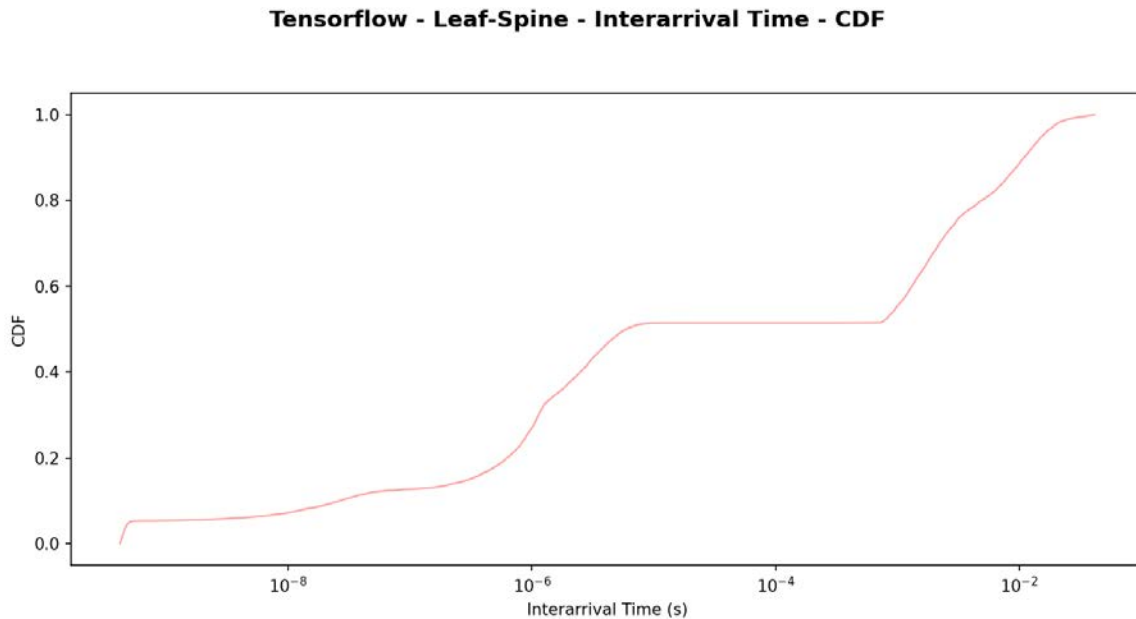
4.2.5.2 Διάγραμμα διαστημάτων μεταξύ αφίξεων πακέτων – Interarrival Times (Histogram & CDF)

Το διάγραμμα των διαστημάτων άφιξης για την τοπολογία Leaf-Spine παρουσιάζει τρεις κύριες περιοχές συγκέντρωσης: γύρω από 10^{-9} , 10^{-6} και μεταξύ 10^{-3} και 10^{-2} δευτερολέπτων. Η ύπαρξη διακριτών κορυφών υποδηλώνει μια μικτή συμπεριφορά επικοινωνίας, που περιλαμβάνει τόσο εξαιρετικά σύντομες παλμικές εκρήξεις όσο και πιο αραιές, επαναλαμβανόμενες ροές. Αυτή η διακύμανση, στο Σχήμα 60, ενδεχομένως αντανακλά διαφορετικά μοτίβα φόρτου, όπως στιγμιαίες ανταλλαγές δεδομένων μεταξύ μικροϋπηρεσιών, καθώς και επαναλαμβανόμενες φάσεις επικοινωνίας σε συγχρονισμένους υπολογισμούς.



Σχήμα 60 Χρόνοι Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για TensorFlow Workload

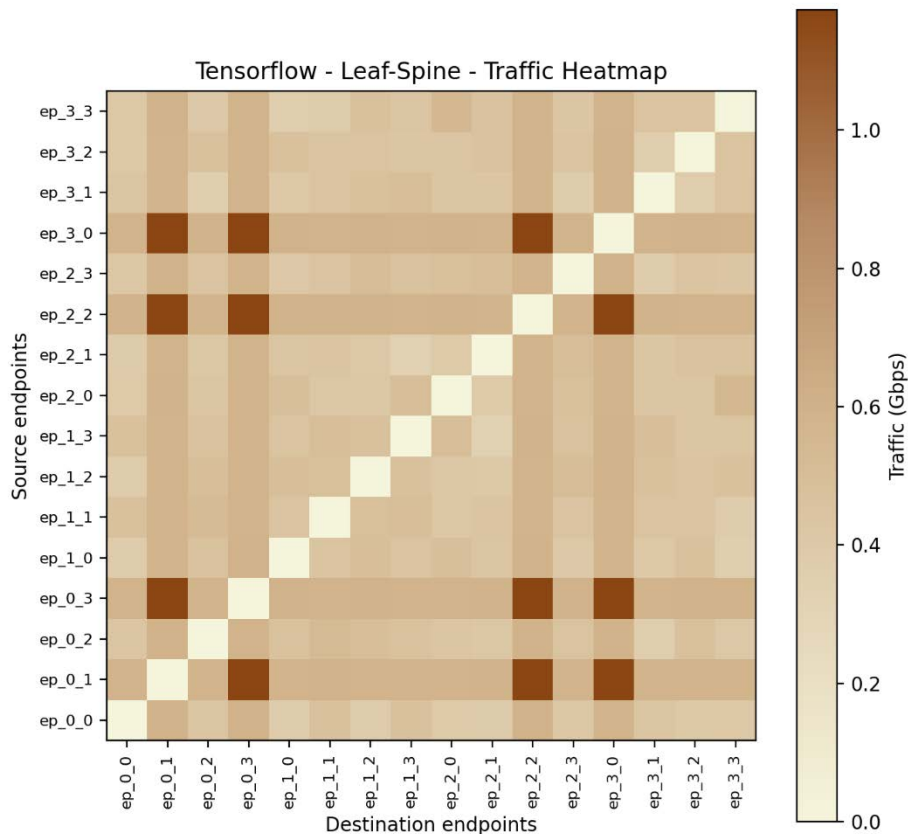
Η CDF του Leaf-Spine αυξάνεται σταδιακά από περίπου 10^{-9} έως 10^{-2} δευτερόλεπτα, χωρίς απότομες αυξήσεις, αλλά με σταθερό ρυθμό, φτάνοντας το 90% λίγο πριν τα 10^{-2} δευτερόλεπτα. Το Σχήμα 61 φανερώνει μια πιο απλωμένη χρονικά επικοινωνιακή συμπεριφορά, με σταθερό ρυθμό αφίξεων σε ευρύ φάσμα καθυστερήσεων. Παρόλο που δεν κυριαρχούν οι πολύ σύντομοι χρόνοι, η παρουσία ροών στις τιμές αυτές δείχνει ότι η αρχιτεκτονική παραμένει ικανή για πραγματικού χρόνου ανταπόκριση. Η ήπια άνοδος της CDF υποδεικνύει ότι οι ροές δεν συγκεντρώνονται σε στενά χρονικά παράθυρα, κάτι που ενδεχομένως υποδηλώνει προγραμματισμένη εκτέλεση ή ισοκατανεμημένες επεξεργασίες.



Σχήμα 61 CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στην Τοπολογία Leaf-Spine για TensorFlow Workload

4.2.5.3 Διάγραμμα θερμικής έντασης τηλεπικοινωνιακής κίνησης – Traffic Heatmap

Ο θερμικός χάρτης της τοπολογίας Leaf-Spine για το TensorFlow αποκαλύπτει συγκεντρωμένα σημεία κινητικότητας σε συγκεκριμένες περιοχές πηγής-προορισμού, που πιθανότατα αντιστοιχούν σε πολύ-χρησιμοποιούμενους διαύλους επικοινωνίας. Το Σχήμα 62 παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, με ορισμένα κελιά να φτάνουν σε μέγιστη ένταση ενώ άλλα παραμένουν σχετικά αχρησιμοποίητα. Αυτό υποδηλώνει ένα κεντρικό πρότυπο κυκλοφορίας, το οποίο είναι κοινό σε συστήματα μηχανικής μάθησης όπου ορισμένα κόμβοι είναι υπεύθυνα για τη συγκέντρωση που παρατηρείται με 12 ζεύγη πηγής-προορισμού να έχουν το πιο έντονο φορτίο στα 1 Gbps.



Σχήμα 62 Θερμικός Χάρτης στην Τοπολογία Leaf-Spine για TensorFlow Workload

4.2.6 Επίδραση Εφαρμογών στην Κίνηση για την Fat Tree

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της κίνησης που παράχθηκε στα πέντε ΔΚΔ για την τοπολογία Leaf Spine με βάση τις εφαρμογές τους.

4.2.6.1 Μέγεθος Ροής

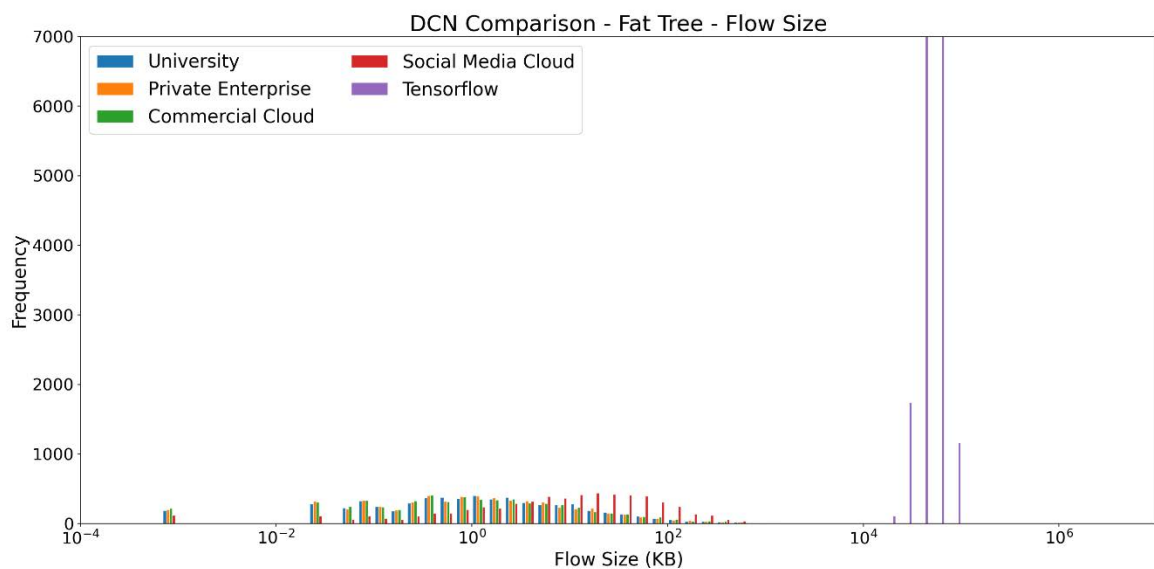
Η ανάλυση των μεγεθών ροών στην τοπολογία Leaf Spine, με βάση τα διαγράμματα το διάγραμμα συχνοτήτων των μεγεθών (Σχήμα 63) και της CDF (Σχήμα 64), δείχνει ότι τρεις κατηγορίες κέντρων δεδομένων παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημο προφίλ. Πρόκειται για τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου, ιδιωτικών επιχειρήσεων και εμπορικών επιχειρήσεων, στα οποία πάνω από το 80% των ροών εντοπίζεται κάτω από τα 10^2 KB. Η ομοιότητα αυτή εξηγείται από το είδος των εφαρμογών τους. Στα πανεπιστήμια, οι περισσότερες ροές δημιουργούνται από εκπαιδευτικές πλατφόρμες, υπηρεσίες ηλεκτρονικής αλληλογραφίας και φιλοξενία ιστοσελίδων, με κυρίαρχες μικρές και περιοδικές επικοινωνίες. Στα κέντρα δεδομένων ιδιωτικών επιχειρήσεων, οι ροές αντίστοιχου μεγέθους παράγονται από εφαρμογές ERP και CRM, που δημιουργούν συχνές συναλλαγές χαμηλού ή μεσαίου όγκου, ενώ μεγαλύτερες μεταφορές σχετίζονται με προγραμματισμένα αντίγραφα ασφαλείας. Στα εμπορικά κέντρα δεδομένων, υπηρεσίες SaaS, ηλεκτρονικού εμπορίου και web APIs βασίζονται σε μεγάλο αριθμό μικρών αιτημάτων με άμεση απόκριση, γεγονός που επίσης κρατά τα μεγέθη χαμηλά.

Σε αντιπαράθεση, το κέντρο δεδομένων εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης εμφανίζει διαφοροποίηση. Η CDF (Σχήμα 64) ανεβαίνει πιο αργά, ενώ το ιστόγραμμα (Σχήμα 4) αποτυπώνει πιο βαρύ ουραίο τμήμα, με ροές να φτάνουν έως και τα 10^3 KB. Η συμπεριφορά

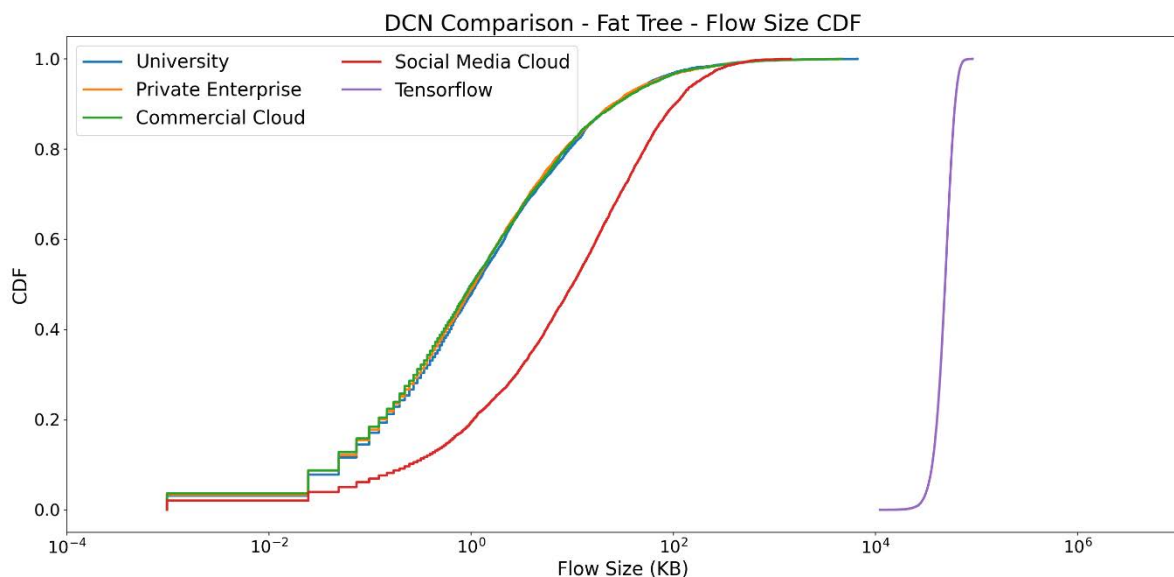
αυτή προέρχεται από την έντονη χρήση πολυμεσικού περιεχομένου (εικόνες, βίντεο μικρής διάρκειας, μεταδεδομένα), που αυξάνει τον όγκο και οδηγεί σε παρουσία μεσαίων ροών, χωρίς όμως να αλλάζει ριζικά το συνολικό μοτίβο.

Το κέντρο δεδομένων TensorFlow διαφοροποιείται πλήρως από όλες τις άλλες κατηγορίες. Τα σχήματα δείχνουν ότι οι ροές του συγκεντρώνονται σε εύρος μεταξύ 40 και 60 MB, με ελάχιστη διασπορά. Αυτή η σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή μεγάλων ροών αντικατοπτρίζει την περιοδική μεταφορά παραμέτρων και συνόλων δεδομένων κατά την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης, η οποία απαιτεί σταθερό και υψηλό όγκο επικοινωνίας.

Συνοψίζοντας, οι παραγόμενη ροές στα κέντρα δεδομένων διαμορφώνεται κυρίως από τις εφαρμογές τους. Στην τοπολογία Leaf Spine, τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου, ιδιωτικών και εμπορικών επιχειρήσεων παρουσιάζουν παρόμοια προφίλ με μικρές έως μεσαίες ροές, ενώ το κοινωνικής δικτύωσης διαφοροποιείται με εντονότερη παρουσία μεσαίων ροών λόγω πολυμεσικού περιεχομένου. Το TensorFlow ξεχωρίζει πλήρως με μεγάλες και ομοιόμορφες ροές, αποτέλεσμα των εφαρμογών μηχανικής μάθησης.



Σχήμα 63 Σύγκριση Συχνότητας Μεγέθους Ροής των 5 ΔΚΔ για την Leaf Spine



Σχήμα 64 Σύγκριση Συχνότητας Μεγέθους Ροής των 5 ΔΚΔ για την Leaf Spine

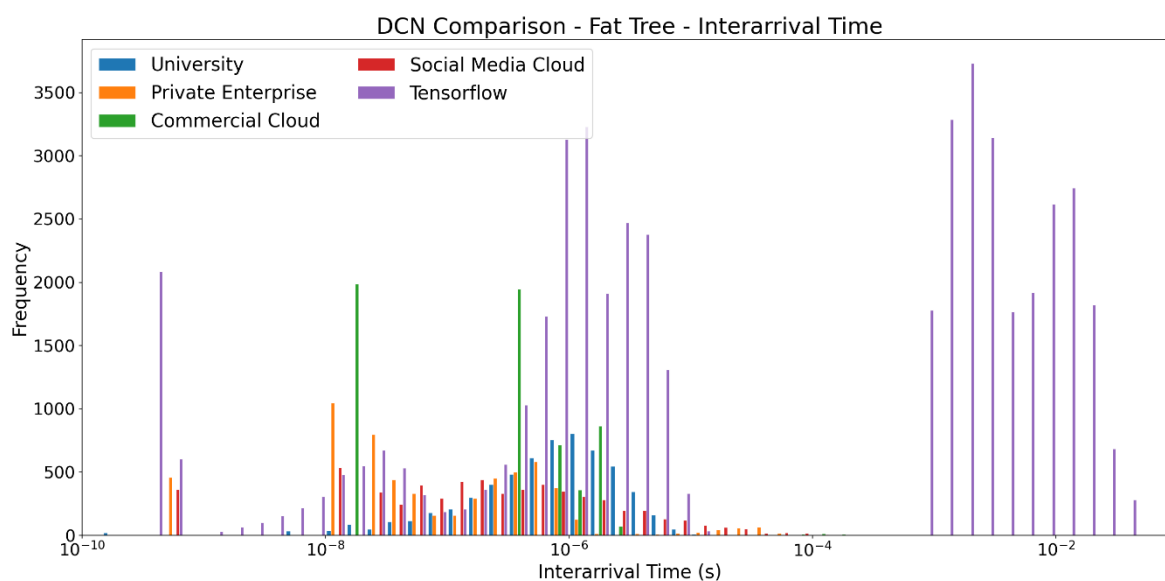
4.2.6.2 Χρονικά Διαστήματα μεταξύ αφίξεων Ροών

Η μελέτη των χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων στην τοπολογία Leaf Spine, όπως φαίνεται στα διαγράμματα CDF (Σχήμα 1) και ιστογράμματος συχνότητας (Σχήμα 2), αναδεικνύει και εδώ κοινά πρότυπα. Τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου, ιδιωτικών και εμπορικών επιχειρήσεων παρουσιάζουν σχεδόν όμοια συμπεριφορά, με την πλειονότητα των αφίξεων να καταγράφεται σε διαστήματα μικροδευτερολέπτων, κυρίως μεταξύ 10^{-8} και 10^{-6} δευτερολέπτων. Αυτή η συγκέντρωση εξηγείται από την περιοδική και προβλέψιμη φύση των εφαρμογών τους: στις πανεπιστημιακές υποδομές η ασύμμετρη αλλά σταθερή δραστηριότητα χρηστών, στις ιδιωτικές επιχειρήσεις τα ERP και CRM συστήματα με προγραμματισμένα πρότυπα, και στις εμπορικές επιχειρήσεις οι συνεχείς συναλλαγές SaaS και e-commerce οδηγούν σε μικρά, σταθερά διαστήματα αφίξεων.

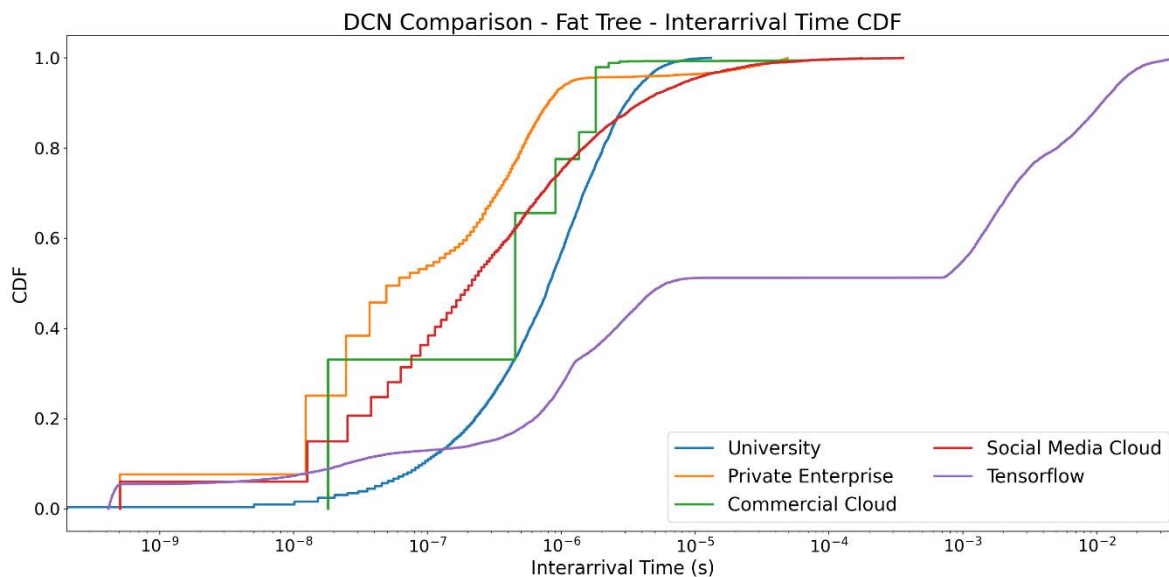
Το κέντρο δεδομένων κοινωνικής δικτύωσης καταγράφει παρόμοια μικρά χρονικά διαστήματα, αλλά με ελαφρώς μεγαλύτερη διασπορά, έως και 10^{-5} δευτερόλεπτα. Το γεγονός αυτό αντανakλά τη συνεχή αλλά ασύγχρονη φύση των αλληλεπιδράσεων σε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, όπου πολλοί χρήστες δημιουργούν περιεχόμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, προκαλώντας διαφοροποίηση στη συχνότητα των αφίξεων.

Αντίθετα, το κέντρο δεδομένων TensorFlow ξεχωρίζει με ένα ευρύ φάσμα χρονικών διαστημάτων, από 10^{-9} έως και 10^{-2} δευτερόλεπτα, καθώς και με πολυτροπική κατανομή. Τα σχήματα δείχνουν σκαλοειδή μορφή στην CDF (Σχήμα 1) και διακριτές κορυφώσεις στο ιστόγραμμα (Σχήμα 2), γεγονός που προκύπτει από την εναλλαγή περιόδων εντατικής επικοινωνίας και υπολογιστικής αδράνειας κατά την εκπαίδευση των μοντέλων. Η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική των εφαρμογών μηχανικής μάθησης και δεν συναντάται στα άλλα περιβάλλοντα.

Συνοψίζοντας, τα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου, ιδιωτικών και εμπορικών επιχειρήσεων εμφανίζουν παρόμοια μοτίβα με μικρά και περιοδικά χρονικά διαστήματα αφίξεων, γεγονός που συνδέεται με την προβλέψιμη φύση των εφαρμογών τους. Το κοινωνικής δικτύωσης διαφοροποιείται ελαφρώς, καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά λόγω της ασύγχρονης και συνεχούς αλληλεπίδρασης των χρηστών. Το TensorFlow ξεχωρίζει πλήρως, με ευρύ και πολυτροπικό φάσμα διαστημάτων αφίξεων, αποτέλεσμα της περιοδικότητας και της έντασης που χαρακτηρίζει τις εφαρμογές μηχανικής μάθησης.



Σχήμα 65 Σύγκριση Χρονικών Διαστημάτων μεταξύ Αφίξεων Ροών των 5 ΔΚΔ για την Leaf Spine



Σχήμα 66 Σύγκριση CDF Χρονικών Διαστημάτων μεταξύ Αφίξεων Ροών των 5 ΔΚΔ για την Leaf Spine

4.2.6.3 Θερμική Ένταση

Η ανάλυση των θερμικών χαρτών προσφέρει μια σαφή εικόνα της χωρικής κατανομής της κυκλοφορίας στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Μέσα από αυτούς γίνεται φανερό πού συγκεντρώνεται η μεγαλύτερη ένταση και σε ποιο βαθμό η κίνηση κατανέμεται ισορροπία ή παραμένει περιορισμένη σε ορισμένα ζεύγη πηγής–προορισμού.

Οι θερμικοί χάρτες στα κέντρα δεδομένων πανεπιστημίου και ιδιωτικών επιχειρήσεων αποκαλύπτουν συγκεντρωμένα σημεία δραστηριότητας σε περιορισμένο αριθμό ζευγών πηγής–προορισμού, με τις μέγιστες τιμές να φτάνουν τα 8 Gbps στα πανεπιστήμια και τα 4,5 Gbps στις επιχειρήσεις. Η εικόνα αυτή εξηγείται από τη φύση των εφαρμογών: στα πανεπιστημιακά δίκτυα η κυκλοφορία κατευθύνεται κυρίως σε εξυπηρετητές μαθημάτων, web υπηρεσιών και πλατφορμών αποθήκευσης, ενώ στα επιχειρησιακά περιβάλλοντα κυριαρχούν οι επικοινωνίες με βάσεις δεδομένων, κόμβους ERP και διαδικασίες backup. Και στις δύο περιπτώσεις, λίγοι κόμβοι αναλαμβάνουν τον ρόλο «κόμβων συγκέντρωσης», γύρω από τους οποίους οργανώνεται μεγάλο μέρος της κίνησης.

Στα κέντρα δεδομένων εμπορικών επιχειρήσεων και κοινωνικής δικτύωσης παρατηρείται έντονη τοπικοποίηση της κυκλοφορίας. Στα εμπορικά περιβάλλοντα η μέγιστη ένταση φτάνει τα 10 Gbps, συγκεντρωμένη σε λίγους κόμβους που εξυπηρετούν κρίσιμες υπηρεσίες όπως e-commerce πλατφόρμες ή υπηρεσίες streaming. Στα κοινωνικά δίκτυα οι τιμές είναι χαμηλότερες, περίπου 1 Gbps, αλλά και εδώ διαπιστώνεται ανισοκατανομή με συγκεκριμένες λειτουργίες όπως προσωποποίηση περιεχομένου, caching και διαχείριση δημοφιλών εφαρμογών να δεσπόζουν στην κίνηση. Το υπόλοιπο δίκτυο εμφανίζει σαφώς περιορισμένη δραστηριότητα, γεγονός που φανερώνει συγκέντρωση αιτημάτων σε λίγες «καυτές» υπηρεσίες.

Στο κέντρο δεδομένων TensorFlow οι θερμικοί χάρτες καταγράφουν επαναλαμβανόμενα μοτίβα έντονης επικοινωνίας ανάμεσα σε λίγα ζεύγη κόμβων, με κορυφώσεις που φτάνουν το 1 Gbps. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τις φάσεις συγχρονισμού των παραμέτρων κατά την εκπαίδευση των μοντέλων, όπου μεγάλοι όγκοι δεδομένων ανταλλάσσονται περιοδικά μεταξύ επλεγμένων κόμβων. Η συγκεντρωτική αυτή φύση αποτελεί άμεση αντανάκλαση

του τρόπου λειτουργίας των workloads μηχανικής μάθησης, τα οποία απαιτούν επαναλαμβανόμενη και εντατική επικοινωνία μεταξύ συγκεκριμένων σημείων.

Συνολικά, οι θερμικοί χάρτες δείχνουν ότι η φύση των εφαρμογών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το πώς κατανέμεται η κυκλοφορία. Τα πανεπιστημιακά και επιχειρησιακά δίκτυα εστιάζουν σε λίγες βασικές υπηρεσίες, τα εμπορικά και κοινωνικά δίκτυα συγκεντρώνουν το φορτίο γύρω από δημοφιλείς λειτουργίες, ενώ τα TensorFlow workloads κατευθύνουν τη ροή στις φάσεις συγχρονισμού. Έτσι, η αρχιτεκτονική Leaf-Spine αποτυπώνει την τάση για συγκεντρωτική κυκλοφορία, γεγονός που καθιστά τη συμπεριφορά της έντονα εξαρτημένη από τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

4.2.6.4 Συμπέρασμα

Η ανάλυση της τοπολογίας Leaf-Spine δείχνει ότι η παραγόμενη κίνηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εφαρμογές κάθε κέντρου δεδομένων. Τα πανεπιστημιακά και τα ιδιωτικών επιχειρήσεων κέντρα δεδομένων κέντρα παρουσιάζουν κοινό προφίλ με μικρού έως μεσαίου μεγέθους ροές και περιοδικότητα, αν και η κίνηση συγκεντρώνεται σε λίγα ζεύγη πηγής-προορισμού. Τα κέντρα δεδομένων εμπορικών επιχειρήσεων και των εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης χαρακτηρίζονται από μικρές και συχνές ροές, αποτέλεσμα της έντονης διαδραστικότητας των εφαρμογών τους, με τη δραστηριότητα να συγκεντρώνεται σε επιλεγμένους κόμβους. Το κέντρο TensorFlow διαφοροποιείται πλήρως, καθώς κυριαρχείται από πολύ μεγάλες και ομοιόμορφες ροές με περιοδικότητα και υψηλή συγκέντρωση κίνησης. Συνολικά, αποτυπώνεται ξεκάθαρα η εξάρτηση της κίνησης από τη φύση των εφαρμογών, με διαφορετικά μοτίβα να προκύπτουν σε κάθε κατηγορία δικτύου.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

5.1 Συμπεράσματα για τη Σύγκριση των Τοπολογιών Fat Tree και Leaf Spine

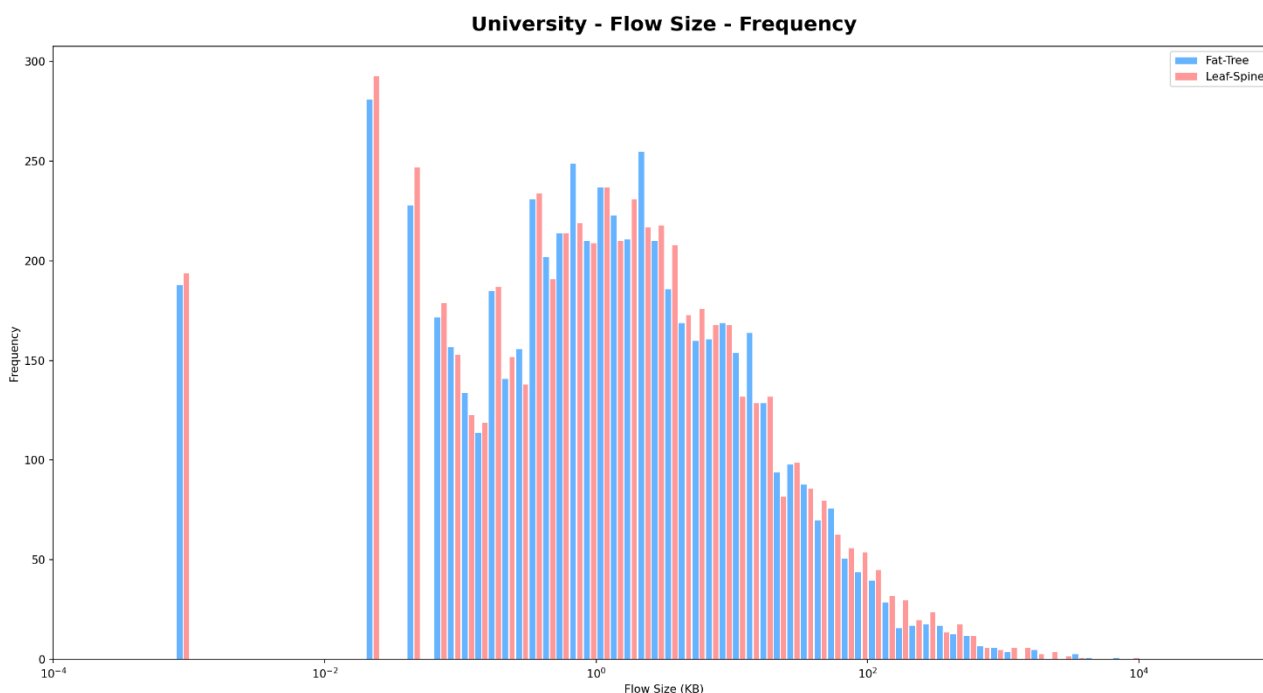
Παρακάτω αναλύονται τα συμπεράσματα της σύγκρισης των δύο τοπολογιών Fat Tree και Leaf Spine για κάθε έναν από τους πέντε τύπους Δικτύων Κέντρων Δεδομένων - Πανεπιστημίου, Ιδιωτική Επιχείρησης, Εμπορικής Επιχείρησης, Εφαρμογές Κοινωνικής Δικτύωσης και TensorFlow για μηχανική μάθηση.

5.1.1 Επίδραση της τοπολογίας στην κίνηση των δικτύων κέντρων δεδομένων

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζονται συγκριτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των ροών δεδομένων στις δύο τοπολογίες. Η ανάλυση βασίζεται σε τρεις βασικούς δείκτες: το μέγεθος των ροών, τους χρόνους μεταξύ των αφίξεων, και την κατανομή της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Τα δεδομένα αντλούνται από την πειραματική αξιολόγηση που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

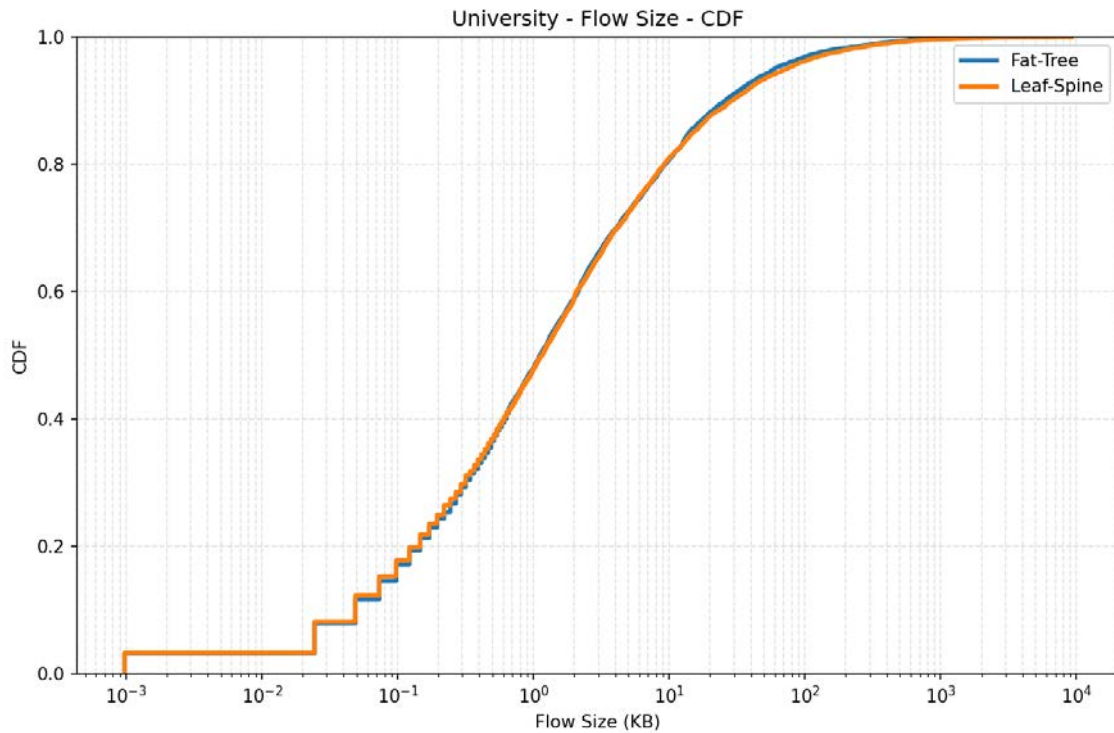
5.1.1.1 Κέντρο Δεδομένων Πανεπιστημίου (University)

Το ΔΚΔ Πανεπιστημίου χαρακτηρίζεται μικρές ροές από απλές διαδικτυακές εφαρμογές με μεγαλύτερες μεταφορές δεδομένων από ακαδημαϊκές υπηρεσίες. Οι δύο τοπολογίες παρουσιάζουν παρόμοια μοτίβα στις κατανομές μεγέθους ροής, με το μεγαλύτερο εύρος τιμών να επικεντρώνεται στην περιοχή 10-1 και 10 KB και για τις δύο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 67. Οπτικά, η Leaf-Spine (κόκκινο) έχει ελαφρώς μεγαλύτερη παρουσία προς τα δεξιά δηλαδή με μεγαλύτερα μεγέθη σε σχέση με τη Fat-Tree, ιδίως από το 1 KB. Η σύγκριση των CDF μεταξύ των δύο τοπολογιών ενισχύει αυτές τις παρατηρήσεις και φαίνεται ότι η αθροιστική κατανομή των τιμών του μεγέθους έχουν ίδια καμπύλη. Στις δύο τοπολογίες, σχεδόν το 80% των ροών εντοπίζεται κάτω από περίπου 10 KB, δείχνοντας μια έντονη παρουσία μικρών και ελαφριών επικοινωνιών.



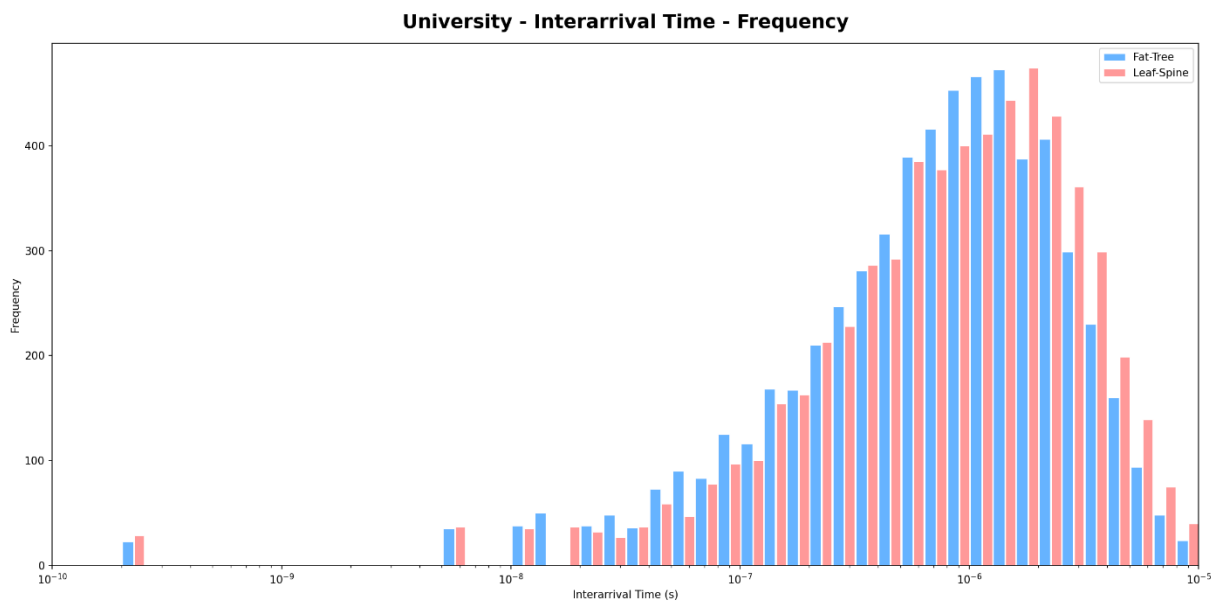
Σχήμα 67 Σύγκριση Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για University Workload

Η Leaf-Spine τοπολογία μπορεί να δίνει προτεραιότητα στην απλότητα αλλά η Fat-Tree έχει μεγαλύτερη ικανότητα διάχυσης κίνησης λόγω μεγαλύτερης ποικιλίας διαδρομών. Επίσης, η Leaf-Spine στο συγκεκριμένο workload εμφανίζει ελαφρώς περισσότερες μεγάλες ροές, αλλά αυτό δεν είναι δομικό χαρακτηριστικό της τοπολογίας οφείλεται στην στοχαστική φύση του προσομοιωτή και της διαφορετικής εξισορρόπησης φορτίου. Η διαφορά είναι μικρή και δεν επηρεάζει το γενικό συμπέρασμα ότι οι δύο τοπολογίες έχουν σχεδόν ταυτόσημο προφίλ στα μεγέθη ροής για το ΔΚΔ Πανεπιστημίου.

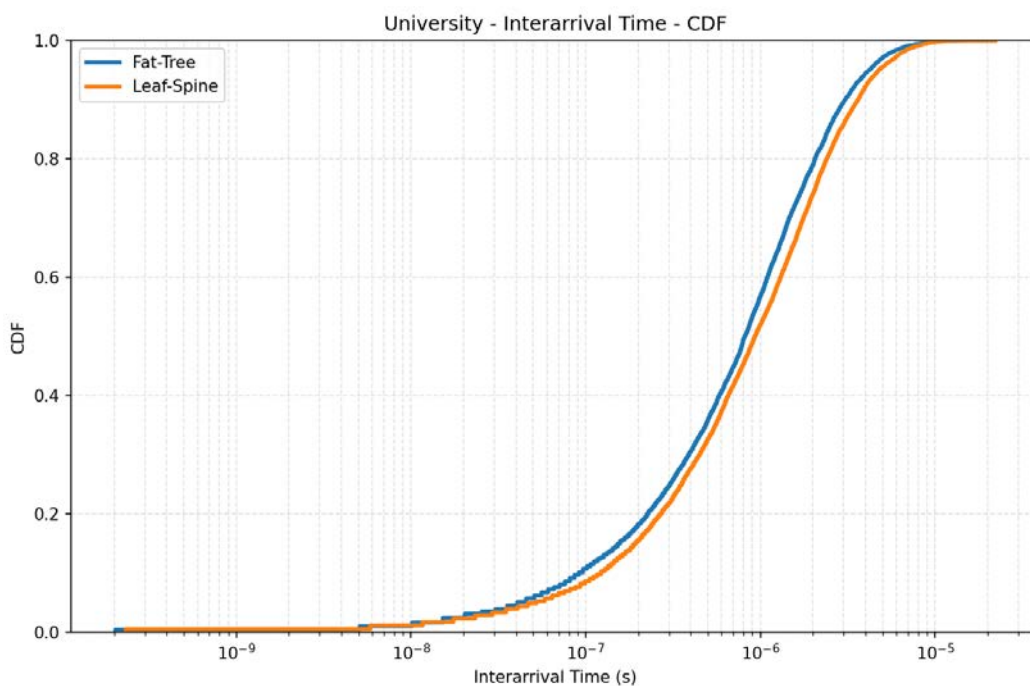


Σχήμα 68 Σύγκριση CDF Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για University Workload

Οι δυο τοπολογίες εμφανίζουν χρονικά διαστήματα μεταξύ των ροών στο φάσμα 10^{-8} με 10^{-5} δευτερόλεπτα, αποκαλύπτοντας ιδιαίτερα υψηλή συχνότητα αφίξεων. Στα δίκτυα των πανεπιστημίων η πυκνότητα αυτή μπορεί να εξυπηρετεί ανάγκες χαμηλής καθυστέρησης, αλλά και να προκαλεί προβλήματα συμφόρησης όταν η ροή δεν είναι ισορροπημένα κατανομημένη. Στο δεξιότερο τμήμα, προς τα 10^{-5} δευτερόλεπτα, οι κόκκινες μπάρες της Leaf-Spine του Σχήματος 69 είναι υψηλότερες από αυτές της Fat-Tree. Παρατηρείται ότι η Fat Tree εμφανίζει οριακά μικρότερα χρονικά διαστήματα μεταξύ των ροών στα πανεπιστημιακά δίκτυα. Η σύγκριση των CDF επιβεβαιώνει ότι οι δύο τοπολογίες παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημο προφίλ, γεγονός που δείχνει ότι ως προς τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών η Fat Tree φαίνεται να υπερτερεί με μικρή διαφορά.



Σχήμα 69 Σύγκριση Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για University Workload



Σχήμα 70 Σύγκριση CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για University Workload

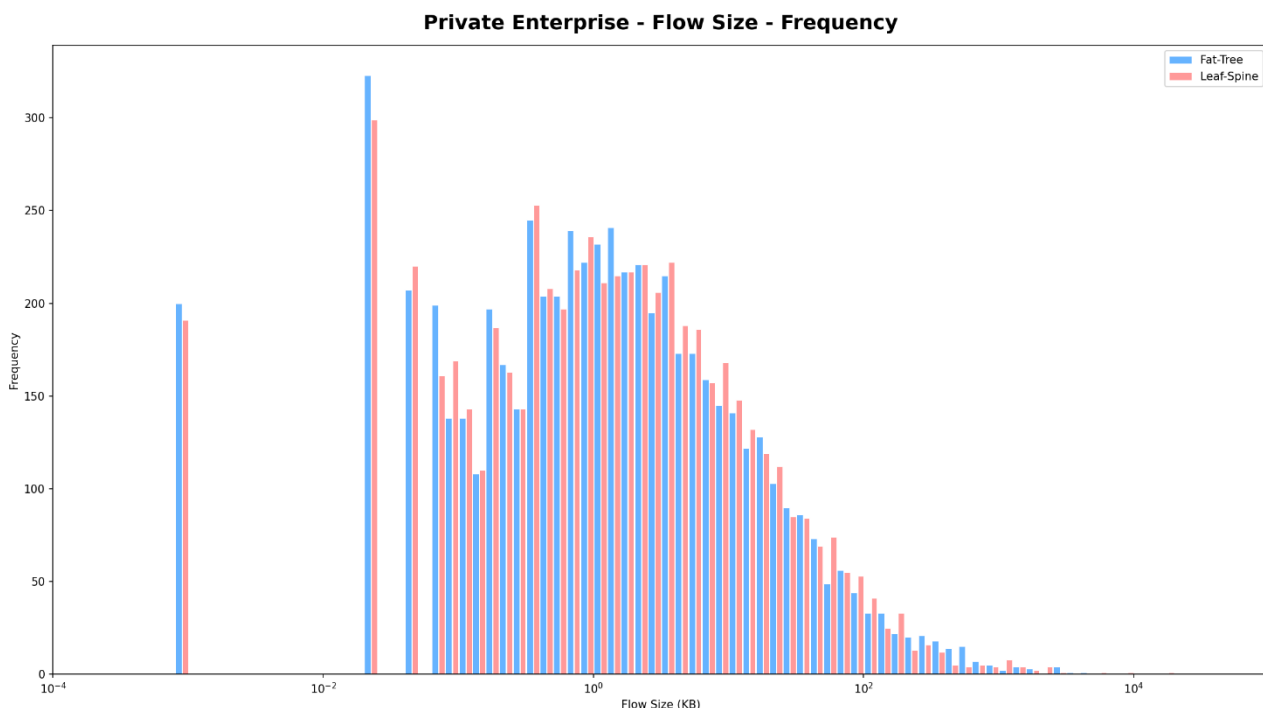
Ο θερμικός χάρτης της τοπολογίας Fat Tree, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 13*, δείχνει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης, με μέγιστη ένταση περίπου 7 Gbps και πολλούς κόμβους να συμμετέχουν ενεργά στις ροές. Παρά την ύπαρξη ορισμένων hotspots, το φορτίο διαχέεται σε περισσότερα ζεύγη πηγής-προορισμού, γεγονός που αναδεικνύει την ικανότητα της τοπολογίας να υποστηρίζει σενάρια πολλαπλής αλληλεπίδρασης. Αντίθετα, στην τοπολογία Leaf Spine, όπως παρατηρείται στο *Σχήμα 38*, καταγράφεται μέγιστη ένταση περίπου 8 Gbps, αλλά η κίνηση είναι πιο συγκεντρωμένη σε λίγα ζεύγη, με μεγάλα τμήματα του δικτύου να παραμένουν σχετικά ανενεργά. Αυτό δείχνει ότι η Leaf Spine

μπορεί να ευνοεί εντατικές ροές μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων, αλλά δεν κατανέμει το φορτίο με την ίδια ισορροπία όπως η Fat-Tree.

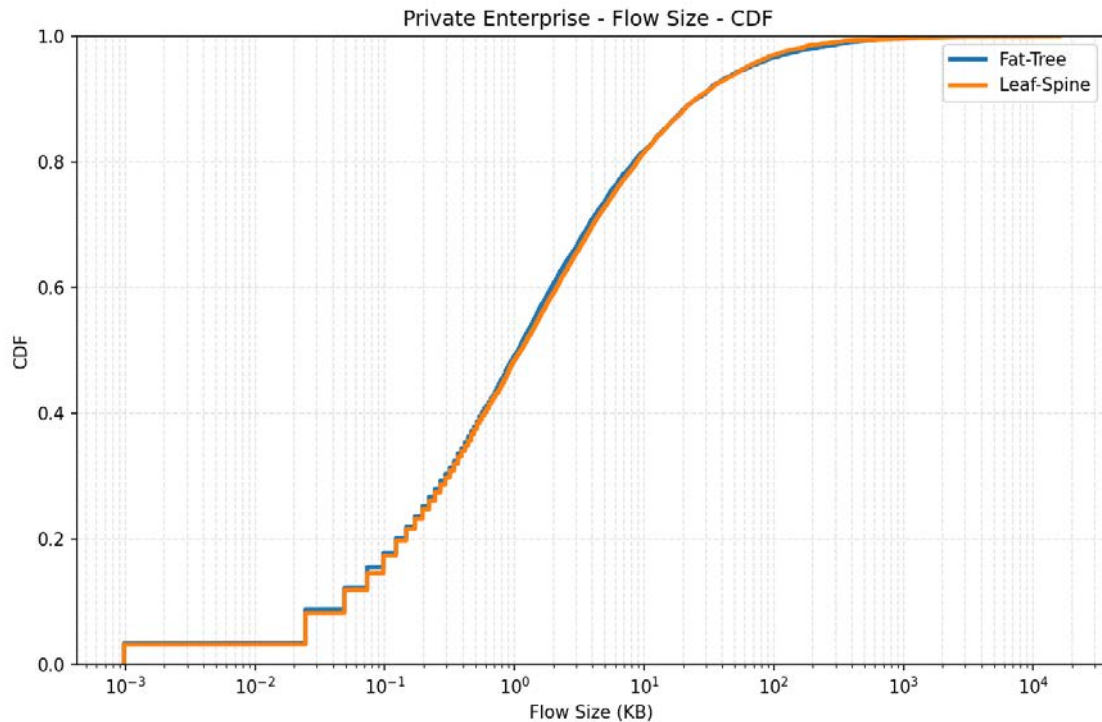
Η ανάλυση των διαγραμμάτων μεγέθους ροών και χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων δείχνει ότι οι δύο τοπολογίες, Fat-Tree και Leaf-Spine, παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά, χωρίς ουσιαστικές διαφορές που να αποδίδονται στην αρχιτεκτονική. Η διαφοροποίηση προκύπτει κυρίως από τους θερμικούς χάρτες έντασης, όπου η Fat Tree εμφανίζει πιο ισορροπημένη διάχυση της κίνησης σε περισσότερα ζεύγη πηγής-προορισμού, με μέγιστη ένταση περίπου 7 Gbps. Αντίθετα, η Leaf Spine καταγράφει υψηλότερη μέγιστη τιμή, περίπου 8 Gbps, αλλά με συγκέντρωση του φορτίου σε περιορισμένο αριθμό ζευγών, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας hotspots. Συνεπώς, για τα πανεπιστημιακά workloads, η Fat Tree μπορεί να θεωρηθεί καταλληλότερη, καθώς εξασφαλίζει μεγαλύτερη ισορροπία στην κατανομή της κίνησης και καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων διαδρομών.

5.1.1.2 Κέντρο Δεδομένων Ιδιωτικής Επιχείρησης (Private Enterprise)

Το Σχήμα 71 για τη σύγκριση των δύο τοπολογιών στα ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης χαρακτηρίζεται από σταθερή και σχετικά προβλέψιμη κίνηση, με έμφαση στη συνέχεια και την ασφάλεια των επιχειρησιακών λειτουργιών. Οι δύο τοπολογίες παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη κατανομή ως προς τα μεγέθη ροών, με τη συντριπτική πλειονότητα να συγκεντρώνεται στο εύρος 10^{-1} έως 10^2 KB, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο μέρος του φόρτου αφορά μικρές έως μεσαίες μεταφορές δεδομένων. Οι όποιες διαφορές περιορίζονται σε τοπικές κορυφές της κατανομής, χωρίς να επηρεάζουν το συνολικό προφίλ. Η αντίστοιχη απεικόνιση της CDF επιβεβαιώνει το παραπάνω, καθώς περίπου το 90% των ροών βρίσκεται κάτω από τα 10^2 KB, με τις δύο τοπολογίες να ακολουθούν πολύ παρόμοια ανοδική πορεία.

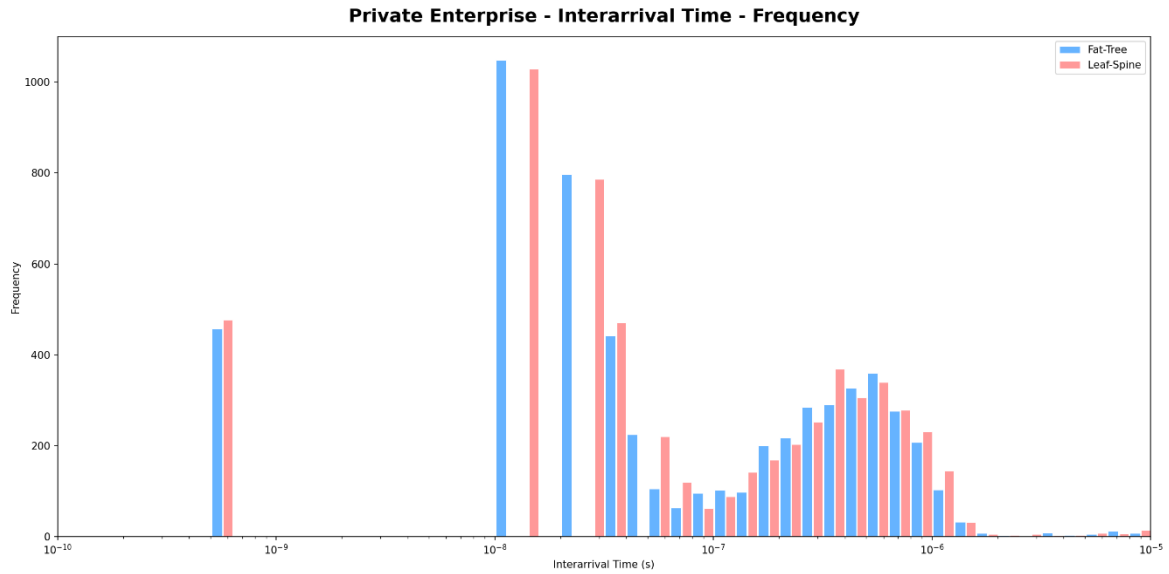


Σχήμα 71 Σύγκριση Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Private Enterprise Workload

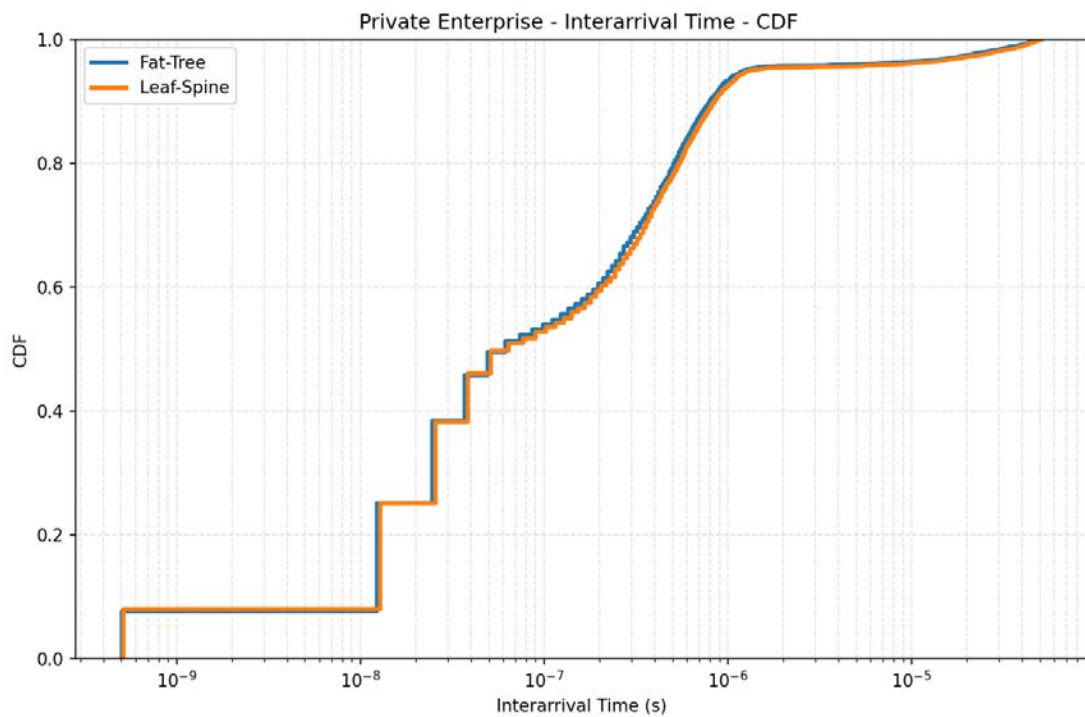


Σχήμα 72 Σύγκριση CDF Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Private Enterprise Workload

Στα ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης, τόσο η Fat Tree όσο και η Leaf Spine παρουσιάζουν χρόνους μεταξύ αφίξεων στο εύρος περίπου 10^{-9} έως 10^{-5} δευτερόλεπτα, με την πλειονότητα των αφίξεων, περίπου 90%, να πραγματοποιείται πριν τα 10^{-6} δευτερόλεπτα, όπως παρατηρείται στα *Σχήμα 73* και *Σχήμα 74*. Η κατανομή αυτή φανερώνει υψηλή ταυτόχρονη δραστηριότητα και επαναλαμβανόμενα μοτίβα λειτουργίας, χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου περιβάλλοντος. Οι δύο τοπολογίες εμφανίζουν παρόμοιο προφίλ, γεγονός που υποδεικνύει ότι η συμπεριφορά των αφίξεων στο workload καθορίζεται κυρίως από τις ιδιαιτερότητες του ίδιου του φόρτου εργασίας και όχι από την υποκείμενη αρχιτεκτονική.



Σχήμα 73 Σύγκριση Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Private Enterprise Workload



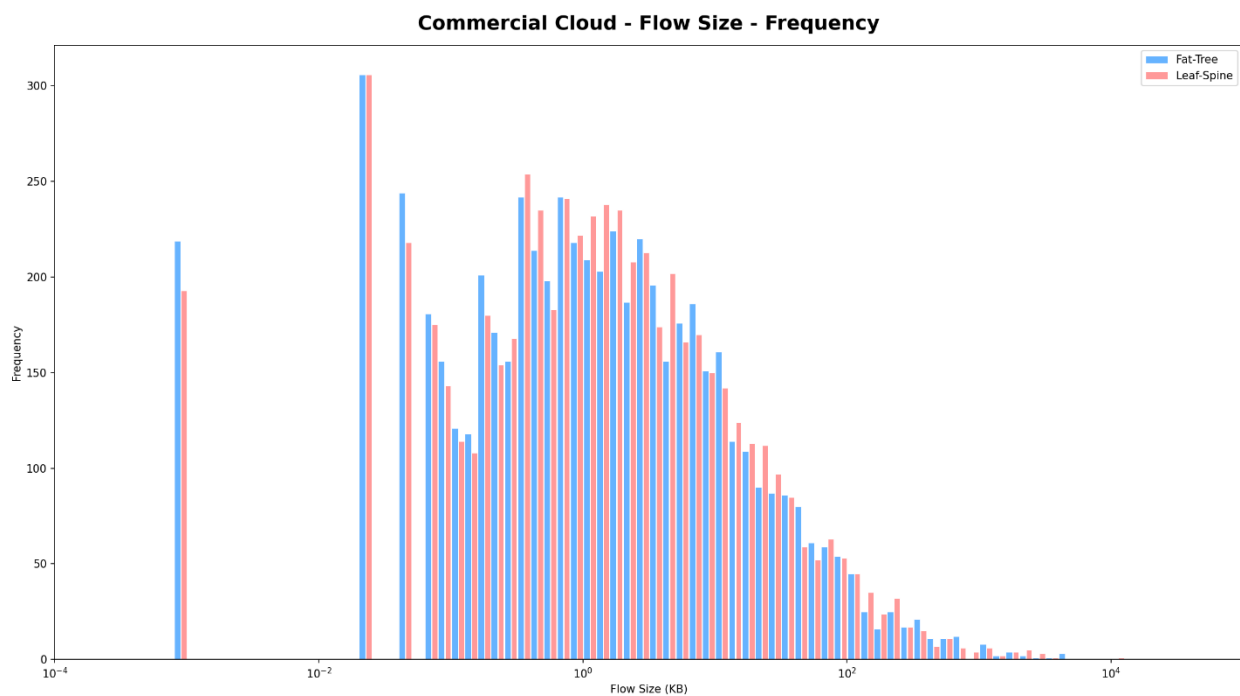
Σχήμα 74 Σύγκριση CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Private Enterprise Workload

Στα ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης η τοπολογία Fat Tree εμφανίζει μέγιστη ένταση περίπου 4,5 Gbps και πιο ισορροπημένη κατανομή της κυκλοφορίας σε περισσότερα ζεύγη πηγής-προορισμού, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 18*. Παρότι καταγράφονται τοπικές συγκεντρώσεις, η γενικότερη εικόνα υποδηλώνει καλύτερη διάχυση του φορτίου και αποφυγή ακραίων κορυφώσεων. Αντίθετα, στο *Σχήμα 43* βλέπουμε ότι η τοπολογία Leaf Spine φτάνει σε υψηλότερες μέγιστες τιμές, άνω των 14 Gbps, αλλά με την κίνηση να συγκεντρώνεται σε λίγες διαδρομές, αφήνοντας το υπόλοιπο δίκτυο σε χαμηλά επίπεδα δραστηριότητας. Συνεπώς, η Fat Tree διαχειρίζεται αποτελεσματικότερα την πολυδιάστατη κυκλοφορία ενός επιχειρησιακού περιβάλλοντος, ενώ η Leaf Spine τείνει να ενισχύει τοπικές ροές, με μεγαλύτερο κίνδυνο εμφάνισης hotspots.

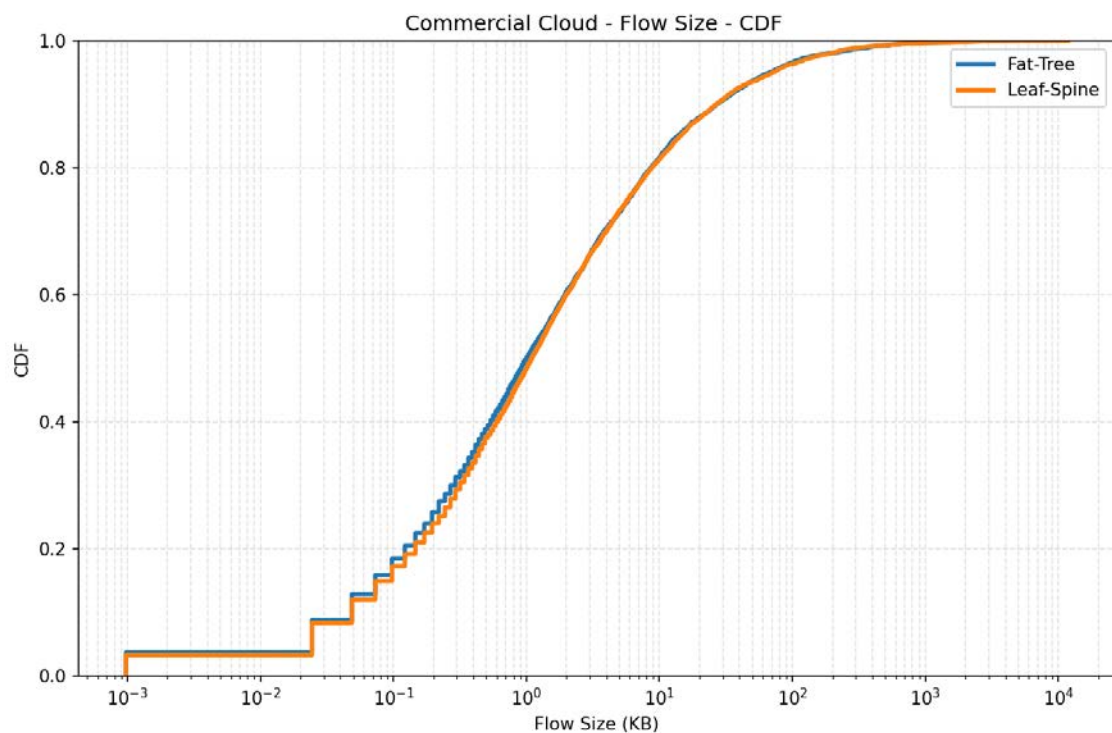
Στα ΔΚΔ ιδιωτικής επιχείρησης οι δύο τοπολογίες, Fat Tree και Leaf Spine, παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή μεγεθών ροών, με τη συντριπτική πλειονότητα να βρίσκεται κάτω από τα 10^2 KB. Αντίστοιχα, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων ροών κινούνται στο ίδιο εύρος για τις δύο αρχιτεκτονικές, γεγονός που δείχνει ότι το προφίλ των αφίξεων καθορίζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του φόρτου και όχι από την τοπολογία. Η ουσιαστική διαφοροποίηση προκύπτει από την ένταση της κυκλοφορίας, όπου η Fat Tree φτάνει έως περίπου 4,5 Gbps, διαχέοντας την κίνηση σε περισσότερα ζεύγη και αποφεύγοντας ακραίες συγκεντρώσεις, ενώ η Leaf Spine καταγράφει μέγιστες τιμές άνω των 14 Gbps, αλλά με την κυκλοφορία να συγκεντρώνεται σε περιορισμένα σημεία του δικτύου. Συνολικά, η Fat Tree προσφέρει πιο ισορροπημένη κατανομή και μεγαλύτερη σταθερότητα για επιχειρησιακά περιβάλλοντα, ενώ η Leaf Spine ευνοεί τοπικές ροές υψηλής έντασης με αυξημένο κίνδυνο δημιουργίας hotspots.

5.1.1.3 Κέντρο Δεδομένων Εμπορικής Επιχείρησης (Commercial Cloud)

Στα ΔΚΔ εμπορικής επιχείρησης, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 75*, τόσο η τοπολογία Fat Tree όσο και η Leaf Spine εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά κατανομής μεγέθους ροών. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται σαφής συγκέντρωση στο εύρος 0,1 έως 10 KB, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης αφορά ροές μεσαίου μεγέθους, χαρακτηριστικό που συνδέεται με τη φύση των εμπορικών cloud υπηρεσιών. Στο *Σχήμα 76* οι καμπύλες CDF επιβεβαιώνουν την παρατήρηση αυτή, καθώς περίπου το 80% των ροών εντοπίζεται σε αυτό το εύρος και για τις δύο τοπολογίες. Συνεπώς, το προφίλ κίνησης στο commercial cloud εμφανίζεται σταθερό και ομοιόμορφο, ανεξαρτήτως αρχιτεκτονικής.



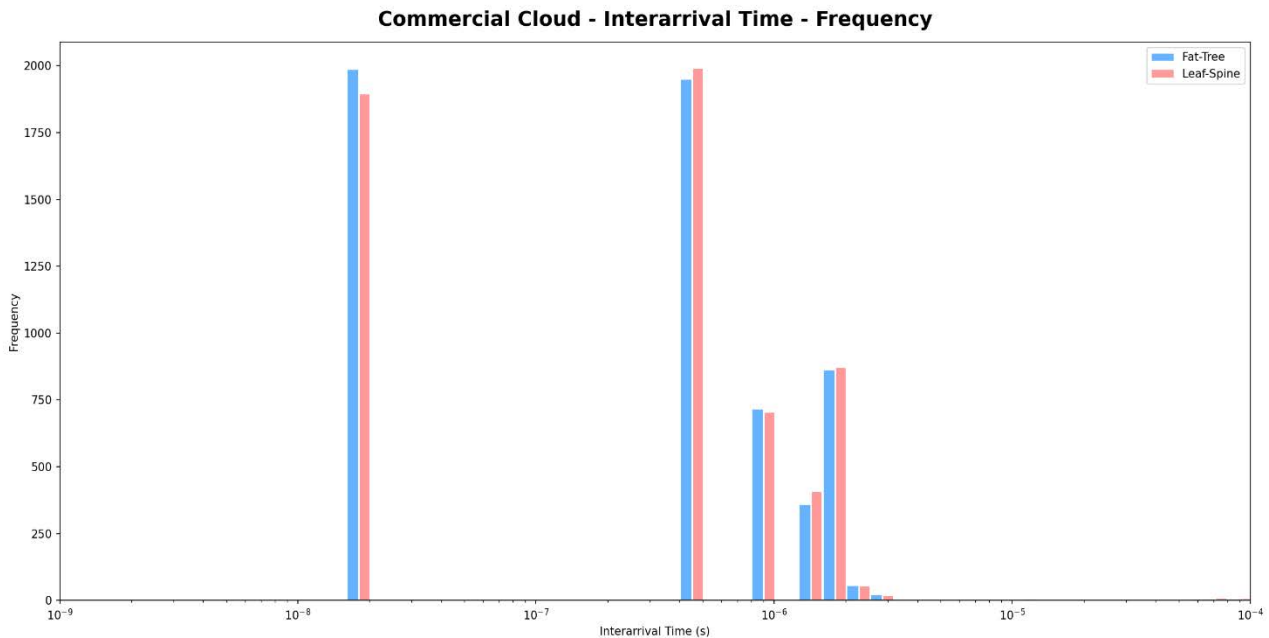
Σχήμα 75 Σύγκριση Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Commercial Cloud



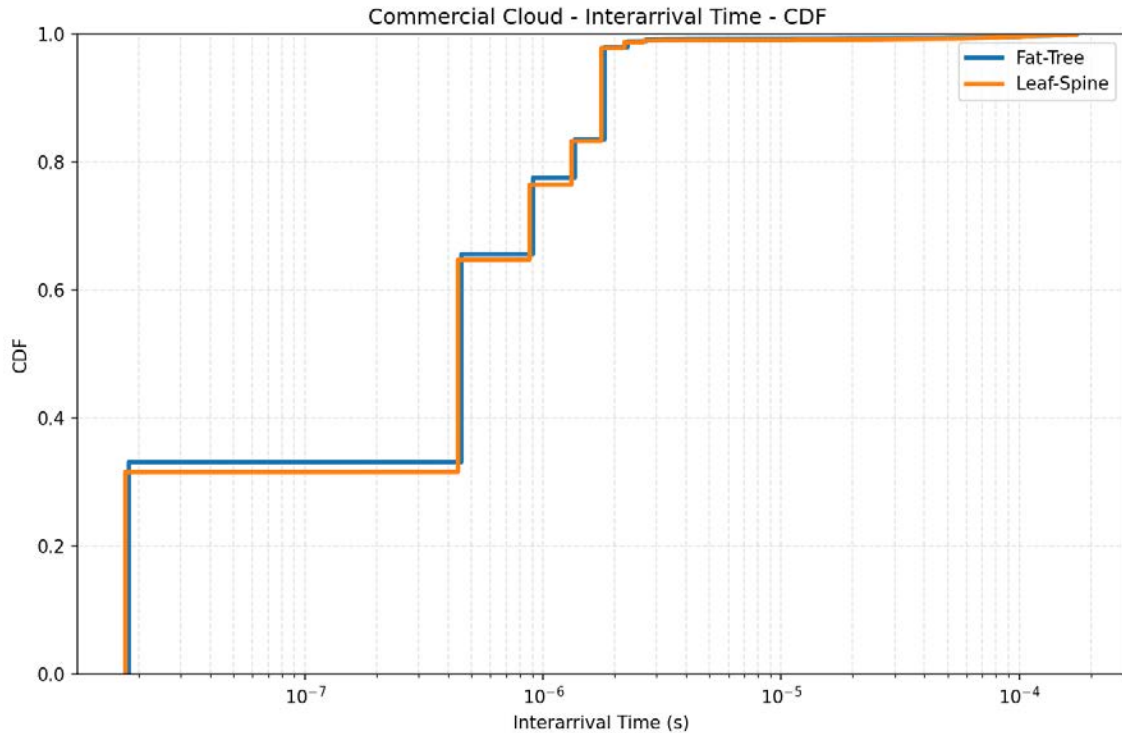
Σχήμα 76 Σύγκριση CDF Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Commercial Cloud

Οι δύο τοπολογίες, Fat Tree και Leaf Spine, του δικτύου εμπορικής επιχείρησης εμφανίζουν παρόμοιο φάσμα τιμών για τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων, κυρίως μεταξύ 10^{-8} και 10^{-5} δευτερολέπτων. Το Σχήμα 77 καταγράφει διακριτές αιχμές στις τιμές

αυτές, γεγονός που συνδέεται με περιοδικά μοτίβα κίνησης, όπως χρονοπρογραμματισμένες διεργασίες ή εντατικές επικοινωνίες μικροϋπηρεσιών. Η σύγκριση των CDF, του Σχήματος 78, επιβεβαιώνει ότι και οι δύο τοπολογίες παρουσιάζουν παρόμοιο προφίλ, με το μεγαλύτερο μέρος των αφίξεων να ολοκληρώνεται πριν τα 10^{-6} δευτερόλεπτα. Συνεπώς, οι διαφορές δεν αποδίδονται στην τοπολογία, αλλά στο ίδιο το workload, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα αφίξεων και έντονη ταυτόχρονη δραστηριότητα.



Σχήμα 77 Σύγκριση Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Commercial Cloud



Σχήμα 78 Σύγκριση CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Social Media Cloud

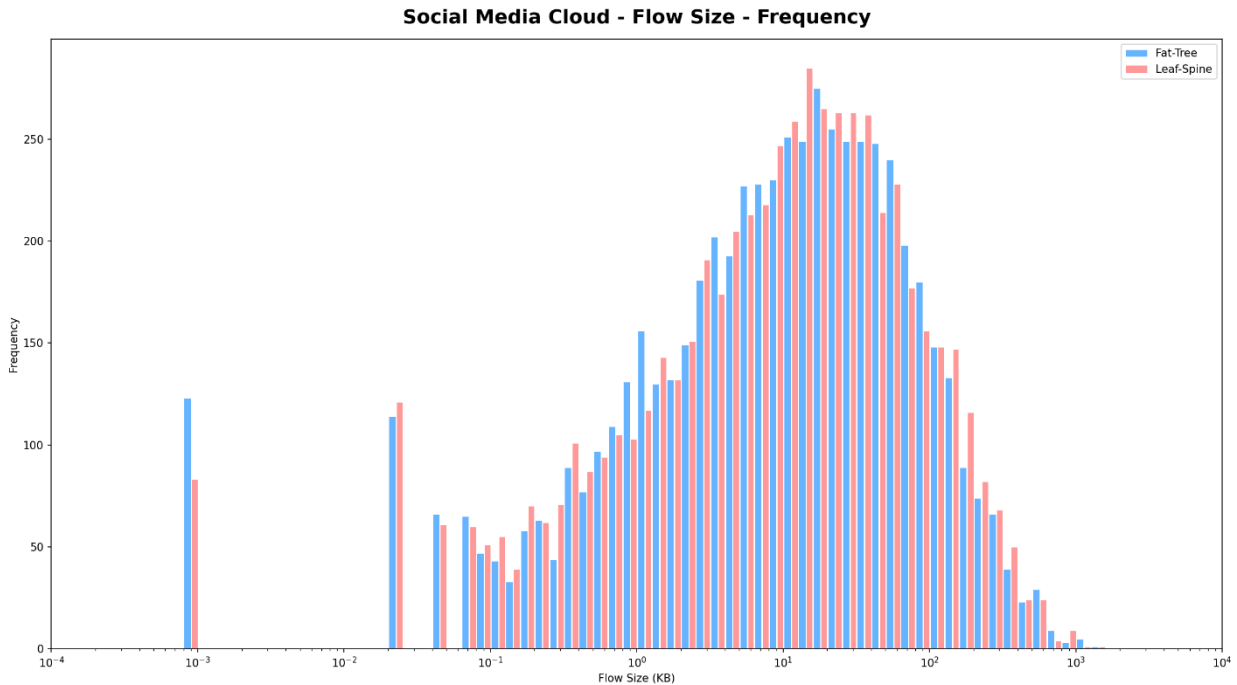
Η ανάλυση του ΔΚΔ εμπορικής επιχείρησης αποκαλύπτει διαφοροποιήσεις στον τρόπο με τον οποίο οι δύο τοπολογίες κατανέμουν την κυκλοφορία. Στην Fat Tree η μέγιστη ένταση φτάνει περίπου τα 4,5 Gbps, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 33* με την κίνηση να κατανέμεται πιο ισορροπημένα σε πολλά ζεύγη πηγής-προορισμού, αξιοποιώντας εναλλακτικές διαδρομές και μειώνοντας τον κίνδυνο συμφόρησης. Αντίθετα, στο *Σχήμα 48* η Leaf Spine παρουσιάζει κορυφώσεις άνω των 10 Gbps, οι οποίες περιορίζονται σε λίγα ενεργά ζεύγη, αφήνοντας το υπόλοιπο δίκτυο με χαμηλή δραστηριότητα. Η διαφορά αυτή δείχνει ότι η Fat Tree ευνοεί πιο διάχυτα και πολυδιάστατα πρότυπα επικοινωνίας, ενώ η Leaf Spine χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ένταση αλλά συγκεντρωμένη σε συγκεκριμένα σημεία.

Η παραπάνω ανάλυση στα δίκτυα εμπορικής επιχείρησης στα Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων Εμπορικής Επιχείρησης, δείχνει ότι η Fat Tree καταφέρνει να διανέμει πιο ομοιόμορφα την κυκλοφορία, οι οποίες όμως κατανέμονται σε περισσότερα μονοπάτια, εξασφαλίζοντας καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης και μειώνοντας την πιθανότητα συμφόρησης. Η Leaf Spine, αντίθετα, εμφανίζει μεγαλύτερες αιχμές που συγκεντρώνονται σε λίγα ζεύγη πηγής-προορισμού, αφήνοντας το υπόλοιπο δίκτυο με χαμηλή δραστηριότητα, αυτό την καθιστά πιο ευάλωτη στη δημιουργία τοπικών σημείων συμφόρησης, ιδίως υπό υψηλό φορτίο. Συνεπώς, η Fat Tree αποδεικνύεται πιο ισορροπημένη επιλογή για το συγκεκριμένο workload, ενώ η Leaf Spine προσφέρει υψηλές επιδόσεις σε συγκεκριμένα μονοπάτια αλλά με λιγότερη συνολική ανθεκτικότητα.

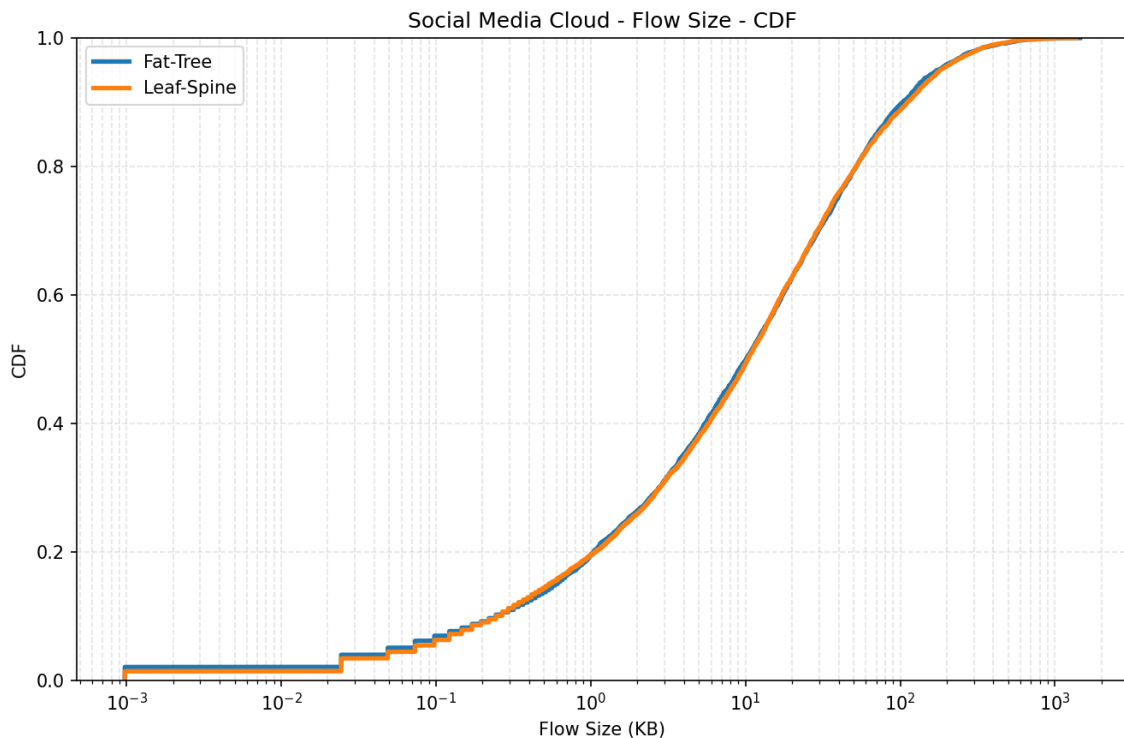
5.1.1.4 Κέντρο Δεδομένων Εφαρμογών Κοινωνική Δικτύωσης (Social Media Cloud)

Τα ΔΚΔ εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης χαρακτηρίζεται από πλήθος μικρών και συνεχώς μεταβαλλόμενων ροών, στοιχείο που αντικατοπτρίζει τη φύση των εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης. Και οι δύο τοπολογίες, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 79*, οι Fat Tree και Leaf Spine, παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή μεγεθών ροών, με τη μεγαλύτερη

συγκέντρωση να εντοπίζεται στο εύρος 1 έως 10^2 KB, όπου κυριαρχούν μεσαίου μεγέθους ανταλλαγές δεδομένων. Το Σχήμα 80 με τις καμπύλες CDF επιβεβαιώνει την ομοιομορφία αυτή, καθώς περίπου το 80% των ροών ολοκληρώνεται πριν τα 10^2 KB και για τις δύο τοπολογίες. Οι μικρές διαφορές που εμφανίζονται σχετίζονται με τις κορυφές της κατανομής και δεν επηρεάζουν το συνολικό προφίλ, το οποίο παραμένει σχεδόν ταυτόσημο.

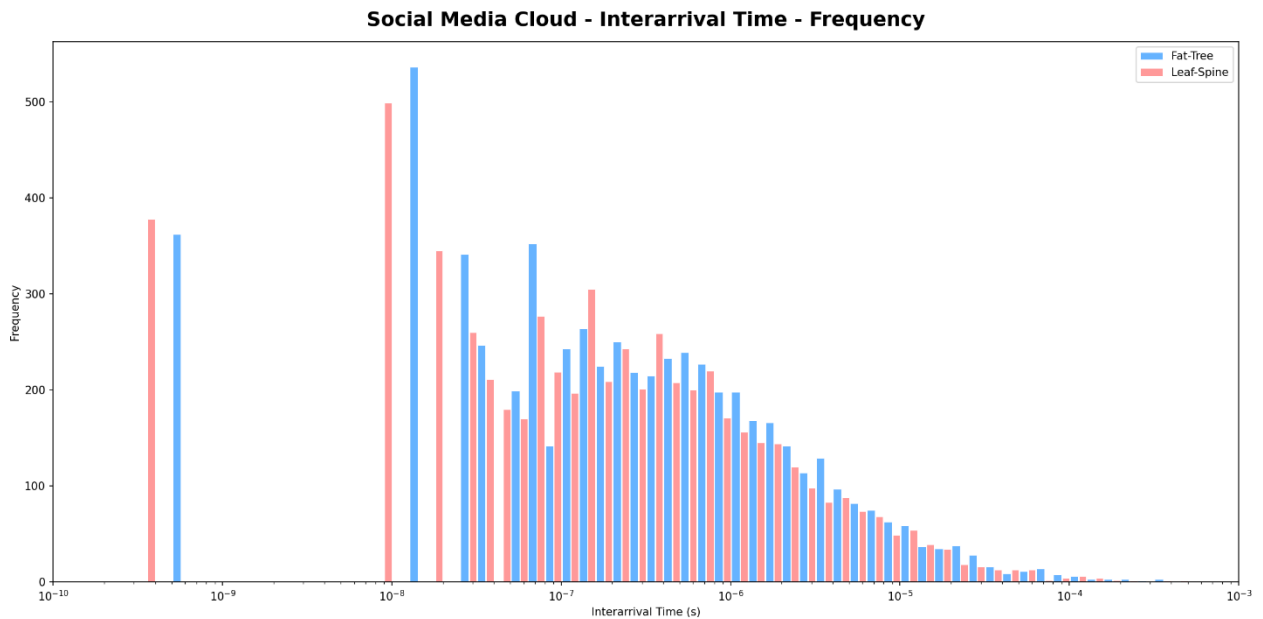


Σχήμα 79 Σύγκριση Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Social Media Cloud

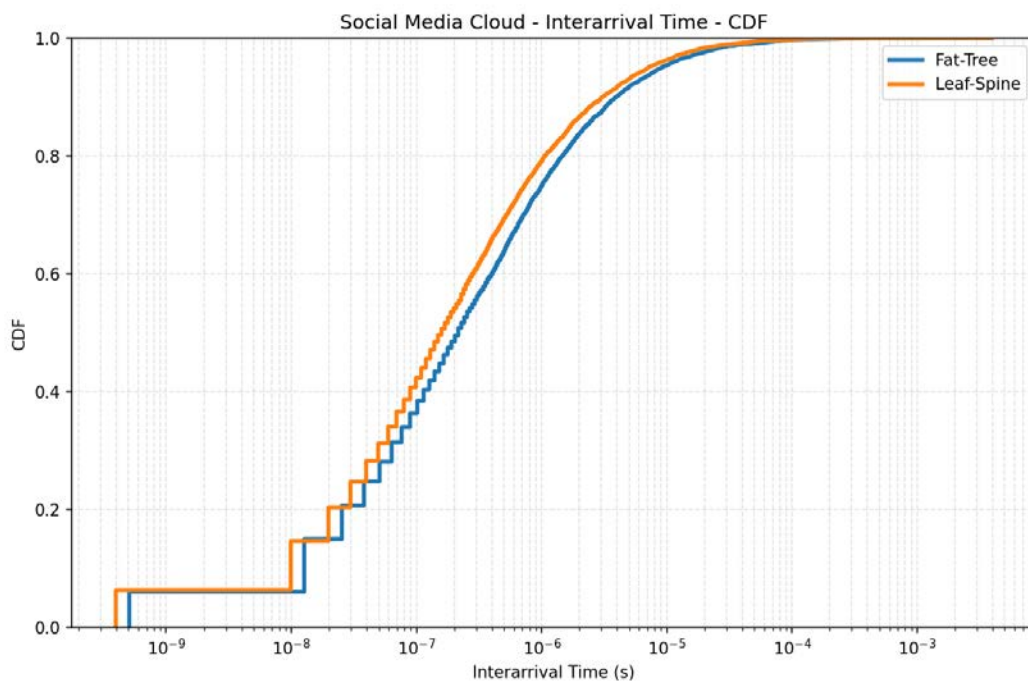


Σχήμα 80 Σύγκριση CDF Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Social Media

Το Σχήμα 81, με τη σύγκριση για το ΔΚΛ εμφανίζει κοινό φάσμα χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων για τις δύο τοπολογίες, με τιμές που κυμαίνονται από 10^{-8} έως 10^{-3} δευτερόλεπτα. Η κατανομή δείχνει έντονη πυκνότητα στις μικρές τιμές, υποδηλώνοντας συχνές αφίξεις και υψηλή ταυτόχρονη δραστηριότητα, χαρακτηριστική των εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης. Οι καμπύλες CDF επιβεβαιώνουν ότι η πλειονότητα των αφίξεων ολοκληρώνεται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για τις δύο τοπολογίες, γεγονός που δείχνει παρόμοια ικανότητα εξυπηρέτησης. Οι όποιες διαφορές περιορίζονται σε μικρές τοπικές αποκλίσεις, χωρίς να αλλάζουν τη συνολική εικόνα.



Σχήμα 81 Σύγκριση Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Social Media Cloud



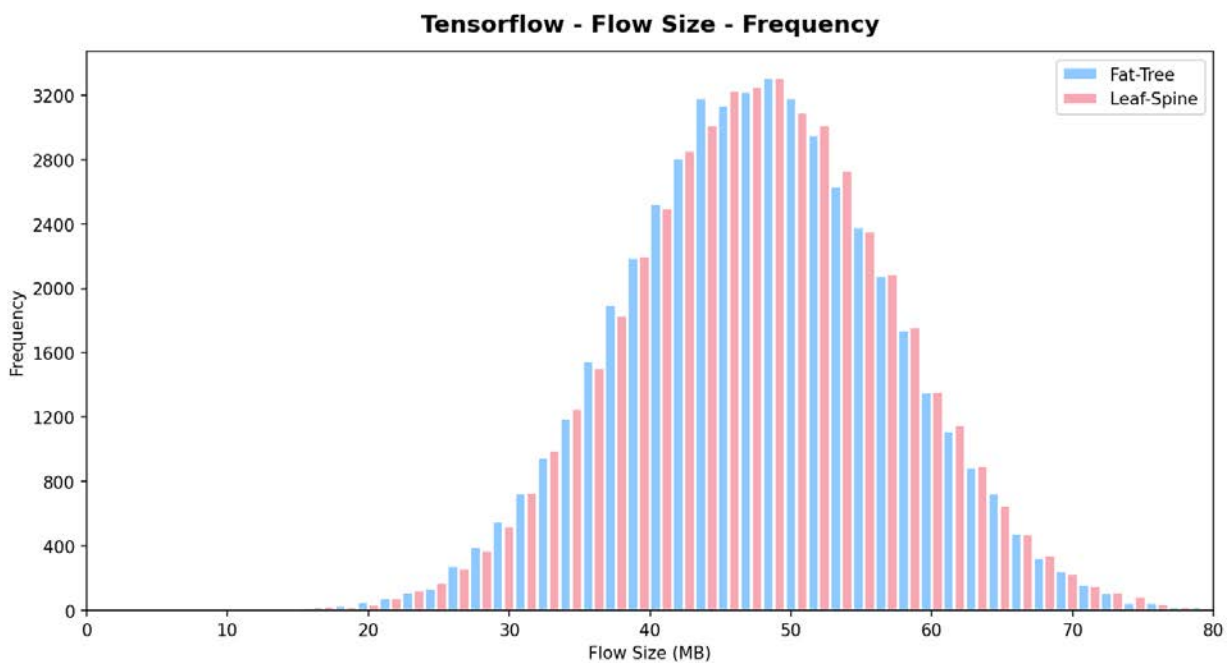
Σχήμα 82 Σύγκριση CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Social Media Cloud

Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 28*, ο θερμικός χάρτης της τοπολογίας Fat Tree αποκαλύπτει μια αρκετά ομοιόμορφη και συμμετρική κατανομή ροών ανάμεσα στα ζεύγη πηγής–προορισμού, με πολλούς κόμβους να συμμετέχουν ενεργά. Η διάχυση αυτή αντανακλά την ικανότητα του δικτύου να υποστηρίζει αλληλεπιδράσεις “από όλους προς όλους”, χαρακτηριστικό των εφαρμογών κοινωνικών μέσων. Στο αντίστοιχο *Σχήμα 53* για την Leaf Spine, παρατηρείται μεν έντονη κυκλοφορία, αλλά με συγκέντρωση σε συγκεκριμένα ζεύγη, γεγονός που υποδηλώνει επικέντρωση σε κεντρικούς κόμβους ή υπηρεσίες. Αυτό το πρότυπο αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας σημείων συμφόρησης και περιορίζει την κλιμάκωση σε περιόδους υψηλής χρήσης.

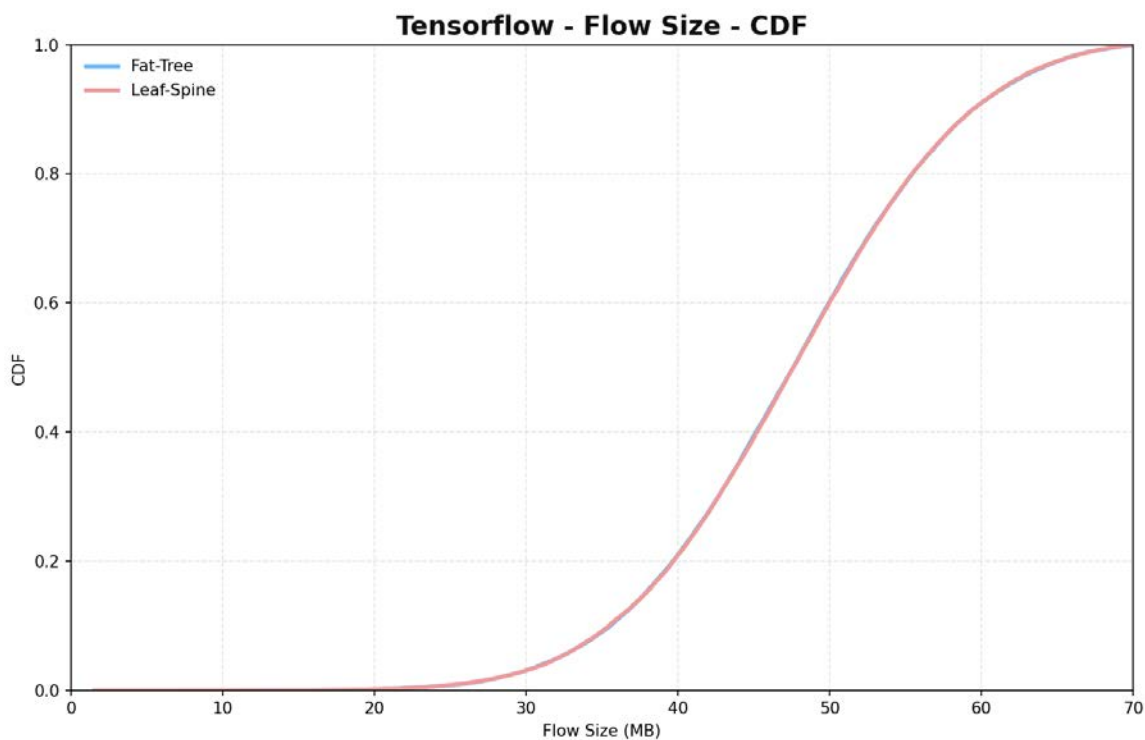
Η μελέτη των ΔΚΔ εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης δείχνει ότι οι τοπολογίες Fat Tree και Leaf Spine παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή μεγεθών ροών, με τις καμπύλες CDF να είναι σχεδόν ταυτόσημες. Τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων καλύπτουν το ίδιο φάσμα και για τις δύο αρχιτεκτονικές, γεγονός που υποδηλώνει κοινή ικανότητα εξυπηρέτησης απαιτήσεων πραγματικού χρόνου. Η ουσιαστική διαφορά προκύπτει από τη χωρική κατανομή της κυκλοφορίας, ο θερμικός χάρτης της Fat Tree δείχνει πιο ισορροπημένη διάχυση της κίνησης σε πολλά ζεύγη, ενώ η Leaf Spine εμφανίζει συγκέντρωση σε λιγότερα σημεία με αυξημένη ένταση. Συνεπώς, η Fat Tree προσφέρει καλύτερη αντοχή σε κυκλοφοριακές αιχμές, ενώ η Leaf Spine ενισχύει πιο συγκεντρωμένα πρότυπα δραστηριότητας. Συνεπώς, το προβάδισμα σε αυτό το σενάριο το έχει η Fat Tree, ακριβώς επειδή εξασφαλίζει μεγαλύτερη ισορροπία και σταθερότητα στην κατανομή.

5.1.1.5 Κέντρο Δεδομένων TensorFlow για Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης

Το TensorFlow workload, το οποίο περιλαμβάνει βαριές και συνεχείς ροές λόγω της φύσης των εφαρμογών μηχανικής μάθησης, δοκιμάζει τα όρια και των δύο αρχιτεκτονικών. Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 83*, οι τοπολογίες Fat Tree και Leaf Spine παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη κατανομή μεγεθών ροών, με τα περισσότερα να κυμαίνονται στενά μεταξύ 40 και 60 MB. Η κορυφή εντοπίζεται κοντά στα 50 MB και για τις δύο τοπολογίες, γεγονός που αντανακλά τον σταθερό και επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα των επικοινωνιακών μοτίβων στη μηχανική μάθηση. Η καμπύλη CDF του *Σχήματος 84* εμφανίζει απότομη άνοδο, με περίπου το 80% των ροών να βρίσκεται κάτω από τα 60 MB, επιβεβαιώνοντας την έντονη συγκέντρωση γύρω από μία προβλέψιμη τιμή. Συνεπώς, και οι δύο τοπολογίες αποδεικνύονται επαρκείς για την υποστήριξη μεγάλων, σταθερών ροών που χαρακτηρίζουν αυτό το Δίκτυο Κέντρου Δεδομένων.

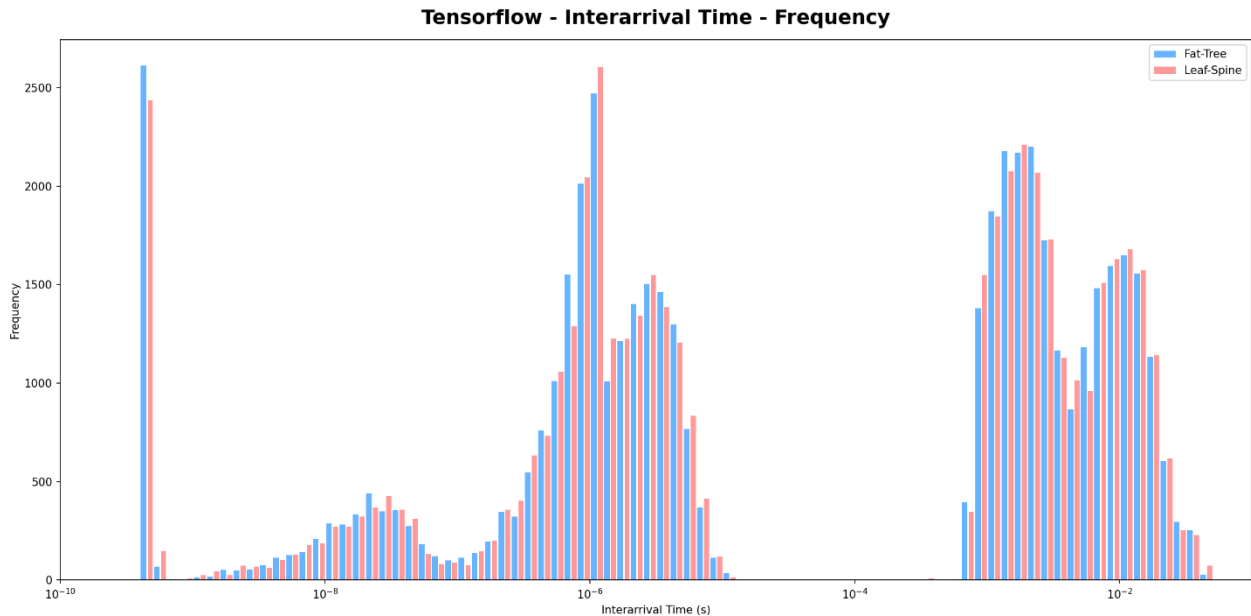


Σχήμα 83 Σύγκριση Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Tensorflow

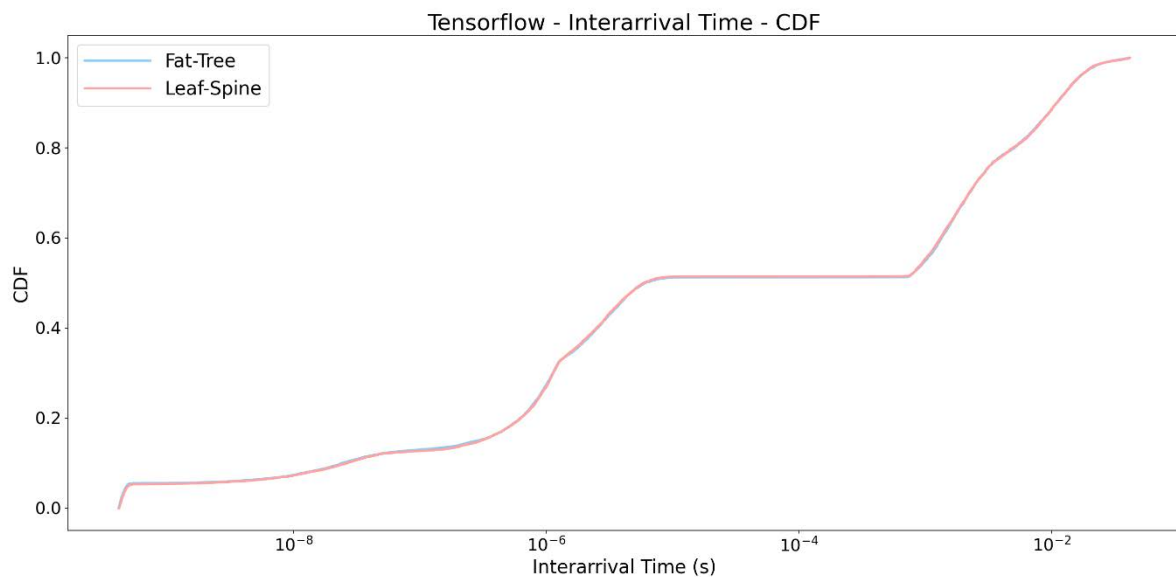


Σχήμα 84 Σύγκριση CDF Μεγέθους Ροής στις Fat Tree και Leaf Spine για Tensorflow

Στο *Σχήμα 85* με τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των ροών παρατηρείται ότι οι τοπολογίες Fat Tree και Leaf Spine καλύπτουν το ίδιο φάσμα τιμών, από περίπου 10^{-9} έως 10^{-2} δευτερόλεπτα, με πολλαπλές κορυφές που αντανakλούν περιοδικά μοτίβα επικοινωνίας. Παρά τις μικρές τοπικές διαφορές στην ένταση κάθε κορυφής, η συνολική μορφή της κατανομής παραμένει ουσιαστικά κοινή και για τις δύο αρχιτεκτονικές. Στην καμπύλη CDF, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 86*, οι δύο καμπύλες ανεβαίνουν σχεδόν παράλληλα, με το μεγαλύτερο μέρος των αφίξεων να συγκεντρώνεται σε πολύ μικρούς χρόνους. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η χρονική συμπεριφορά του TensorFlow workload δεν διαφοροποιείται σημαντικά από την επιλογή τοπολογίας.



Σχήμα 85 Σύγκριση Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Tensorflow



Σχήμα 86 Σύγκριση CDF Χρόνων Αφίξεων μεταξύ Ροών στις Fat Tree και Leaf Spine για Tensorflow

Στον θερμικό χάρτη της Fat Tree, στο *Σχήμα 33* παρατηρείται πιο ισορροπημένη διάχυση της κυκλοφορίας, με τιμές έντασης να κυμαίνονται μέχρι περίπου 1 Gbps. Αρκετά ζεύγη πηγής-προορισμού συμμετέχουν ενεργά σε επίπεδα κοντά στη μέση τιμή, με ορισμένα πιο έντονα σημεία, αλλά χωρίς ακραίες αιχμές. Η συνολική εικόνα δείχνει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης σε μεγάλο μέρος του δικτύου, μειώνοντας τον κίνδυνο δημιουργίας σοβαρών σημείων συμφόρησης. Αντίθετα, στον θερμικό χάρτη της Leaf Spine, στο *Σχήμα 58*, οι τιμές φθάνουν λίγο υψηλότερα, ξεπερνώντας το 1 Gbps, με συγκέντρωση σε λίγα ζεύγη πηγής-προορισμού. Τα σημεία αυτά εμφανίζονται με πολύ μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με το υπόλοιπο διάγραμμα, όπου οι περισσότερες περιοχές παραμένουν αραιές. Αυτό υποδηλώνει ότι η επικοινωνία επικεντρώνεται περισσότερο σε συγκεκριμένα μονοπάτια, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε τοπικά bottlenecks όταν αυξάνεται η ζήτηση. Συνεπώς, με βάση την ανάλυση της θερμικής έντασης, η Fat Tree επιτυγχάνει πιο σταθερή και ανθεκτική κατανομή της κίνησης, ενώ η Leaf Spine, παρότι αποδοτική σε στοχευμένες ροές, είναι πιο επιρρεπής σε τοπικές υπερφορτώσεις λόγω των εντονότερων αιχμών.

Στο Δίκτυο Κέντρου Δεδομένων TensorFlow, οι τοπολογίες Fat Tree και Leaf Spine εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά ως προς τα μεγέθη ροών και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων, καθώς και οι δύο καμπύλες κατανομής και οι αντίστοιχες CDF επιβεβαιώνουν ότι η συμπεριφορά τους καθορίζεται κυρίως από το ίδιο το workload. Η ουσιαστική διαφοροποίηση εντοπίζεται στη θερμική ένταση, η Fat Tree παρουσιάζει πιο ισορροπημένη διάχυση της κυκλοφορίας με τιμές έως περίπου 1 Gbps, ενώ η Leaf Spine φθάνει σε υψηλότερες τοπικές κορυφώσεις, ξεπερνώντας το 1 Gbps, συγκεντρωμένες σε λίγα ζεύγη. Συνεπώς, ενώ και οι δύο τοπολογίες μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τις βαριές και σταθερές ροές της μηχανικής μάθησης, η Fat Tree υπερέχει σε ανθεκτικότητα και ισορροπία κατανομής, μειώνοντας την πιθανότητα συμφόρησης σε συνθήκες έντονης παράλληλης δραστηριότητας.

5.1.2 Κύρια Συμπεράσματα

Η συγκριτική αξιολόγηση των τοπολογιών Fat Tree και Leaf Spine σε διαφορετικά Δίκτυα Κέντρων Δεδομένων δείχνει ότι τα βασικά χαρακτηριστικά των ροών, όπως το μέγεθος και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων, επηρεάζονται κυρίως από τη φύση κάθε workload και λιγότερο από την αρχιτεκτονική. Οι κατανομές και οι καμπύλες CDF αποκαλύπτουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επιλογή τοπολογίας δεν αλλάζει ουσιαστικά τον όγκο ή τη συχνότητα των ροών.

Η ουσιαστική διαφοροποίηση εντοπίζεται στη χωρική κατανομή της κυκλοφορίας, όπως αυτή αποτυπώνεται στους θερμικούς χάρτες έντασης. Στα Πανεπιστημιακά Δίκτυα, η Fat Tree μοιράζει πιο ισορροπημένα την κίνηση σε πολλά ζεύγη με μέγιστη ένταση γύρω στα 7 Gbps, ενώ η Leaf Spine φτάνει σε 8 Gbps αλλά με συγκέντρωση σε λίγες ζεύξεις, αυξάνοντας τον κίνδυνο συμφόρησης. Στα Δίκτυα Ιδιωτικής Επιχείρησης, η Fat Tree επιτυγχάνει πιο σταθερή διάχυση με τιμές έως 4,5 Gbps, σε αντίθεση με τη Leaf Spine που υπερβαίνει τα 14 Gbps συγκεντρωμένα σε περιορισμένα σημεία. Στα Δίκτυα Εμπορικής Επιχείρησης, η Fat Tree κατανέμει την κυκλοφορία σε περισσότερα μονοπάτια αποφεύγοντας ακραία φαινόμενα, ενώ η Leaf Spine εμφανίζει έντονες αιχμές άνω των 10 Gbps σε λίγα ζεύγη, αφήνοντας το υπόλοιπο δίκτυο με χαμηλή δραστηριότητα. Στα Δίκτυα Κοινωνικής Δικτύωσης, οι δύο τοπολογίες έχουν όμοιο προφίλ σε μέγεθος και χρόνους ροών, αλλά η Fat Tree πλεονεκτεί λόγω ισορροπημένης κατανομής, ενώ η Leaf Spine συγκεντρώνει την ένταση σε λιγότερα σημεία. Τέλος, στο Δίκτυο TensorFlow, όπου κυριαρχούν βαριές και σταθερές ροές, και οι δύο τοπολογίες εμφανίζουν παρόμοιο προφίλ σε μέγεθος και χρονισμό, αλλά η Fat Tree υπερέχει με ομοιόμορφη διάχυση (έως 1 Gbps), σε αντίθεση με τη Leaf Spine που εμφανίζει τοπικές κορυφώσεις άνω του 1 Gbps.

Η διαφοροποίηση των συμπερασμάτων απορρέει άμεσα από τον σχεδιασμό των δύο τοπολογιών. Η Leaf Spine χαρακτηρίζεται από έναν επίπεδο, διώροφο σχεδιασμό, όπου κάθε leaf switch συνδέεται με όλα τα spine switches. Αυτό το σχήμα μειώνει τον αριθμό των ενδιάμεσων αλμάτων που διανύει ένα πακέτο, περιορίζοντας έτσι την καθυστέρηση. Ωστόσο, το γεγονός ότι η Leaf Spine έχει λιγότερες εναλλακτικές διαδρομές σε σχέση με την Fat Tree σημαίνει ότι η κίνηση συχνά συγκεντρώνεται σε ορισμένα spine switches, οδηγώντας σε τοπικές υπερφορτώσεις όταν η κίνηση δεν είναι ισορροπημένη. Αντίθετα, η Fat Tree στηρίζεται σε μια πολυεπίπεδη, ιεραρχική δομή που προσφέρει πολλαπλά εναλλακτικά μονοπάτια μεταξύ δύο κόμβων. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την κατανομή του φορτίου μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath routing), με αποτέλεσμα η κίνηση να διαχέεται πιο ομοιόμορφα σε όλο το δίκτυο. Έτσι, η Fat Tree εμφανίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και σταθερότητα σε workloads με βαριά και παράλληλη κυκλοφορία, όπως τα πανεπιστήμια, οι ιδιωτικές επιχειρήσεις και οι εφαρμογές TensorFlow. Η αυξημένη πολυπλοκότητα της δομής ενδέχεται να επιφέρει ελαφρώς μεγαλύτερη καθυστέρηση, αλλά η ικανότητα ισορροπημένης κατανομής καθιστά την αρχιτεκτονική αυτή πιο αποδοτική σε περιβάλλοντα υψηλού φόρτου.

Ως εκ τούτου, από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προκύπτει ότι η τοπολογία Fat Tree εμφανίζει σταθερά καλύτερη ισορροπία στην κατανομή της κυκλοφορίας και μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε συνθήκες υψηλού φόρτου. Παρά το γεγονός ότι η Leaf Spine παρουσιάζει θεωρητικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά τη χαμηλή καθυστέρηση και την απλότητα δρομολόγησης, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η Fat Tree τείνει να ανταποκρίνεται πιο αποτελεσματικά στα περισσότερα σενάρια Δικτύων Κέντρων Δεδομένων. Συνεπώς, η επιλογή της μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ενδεδειγμένη για ΔΚΔ με αυξημένες απαιτήσεις σε σταθερότητα και κλιμάκωση, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η χρησιμότητα της Leaf Spine σε εφαρμογές όπου η χαμηλή καθυστέρηση αποτελεί κυρίαρχο κριτήριο.

5.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις και Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Η παρούσα μελέτη παρείχε μια συγκριτική αξιολόγηση δύο βασικών τοπολογιών Δικτύων Κέντρων Δεδομένων, της Fat Tree και της Leaf-Spine, με βάση μετρήσιμα χαρακτηριστικά ροής όπως το μέγεθος ροής, χρονικά διαστήματα αφίξεων μεταξύ πακέτων και η κατανομή της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Παρά την ολοκληρωμένη ανάλυση και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, υπάρχουν αρκετά περιθώρια για επέκταση και εμβάθυνση της μελέτης σε μελλοντικές εργασίες.

Ένας πρώτος άξονας επέκτασης αφορά τη διεύρυνση της ποικιλίας των εξεταζόμενων τοπολογιών. Αν και οι Fat Tree και Leaf-Spine αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες επιλογές σε σύγχρονα DCNs, υπάρχουν και άλλες αρχιτεκτονικές όπως οι DCell, BCube, Clos και Jellyfish, που προσφέρουν διαφορετικά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη ανθεκτικότητα, ευκολία επέκτασιμότητας. Η ενσωμάτωσή τους σε συγκριτικά πειράματα θα παρείχε πληρέστερη εικόνα για την απόδοση υπό διαφορετικά σενάρια.

Παράλληλα, μια ουσιαστική κατεύθυνση είναι η προσθήκη παραμέτρων κυκλοφορίας υψηλότερης πολυπλοκότητας. Η παρούσα μελέτη βασίστηκε σε γενικά μοτίβα κίνησης για πέντε τύπους εφαρμογών, χωρίς δυναμική προσαρμογή. Μελλοντικά θα ήταν ενδιαφέρον να χρησιμοποιηθεί καταγραφή κίνησης από παραγωγικά περιβάλλοντα. Η χρήση εργαλείων όπως ο προγραμματισμός με SDN (Software-Defined Networking) θα μπορούσε να προσφέρει νέα προοπτική στην αντιμετώπιση των περιοχών συμφόρησης. Η ενσωμάτωση μηχανισμών δρομολόγησης σε πραγματικό χρόνο, βάσει του τρέχοντος φόρτου του δικτύου, θα προσέφερε ένα πιο δυναμικό σύστημα διαχείρισης, συγκρίνοντας το στατικό routing των

παραδοσιακών τοπολογιών με ένα ευφυές και προσαρμοστικό μοντέλο. Τέλος, μια μελλοντική εργασία θα μπορούσε να εστιάσει και σε σενάρια αποτυχίας κόμβων ή συνδέσεων. Η αξιολόγηση των τοπολογιών σε περιβάλλοντα με αυξημένη πιθανότητα αστοχιών θα ανέδειχνε την πραγματική τους ανθεκτικότητα και τη δυνατότητα διατήρησης ποιότητας υπηρεσίας υπό πίεση.

Συνοψίζοντας, η μελέτη της τοπολογίας των Δικτύων Κέντρων Δεδομένων είναι ένα πολυδιάστατο πεδίο. Η αξιολόγηση δεν περιορίζεται μόνο στην απόδοση υπό ομαλές συνθήκες, αλλά περιλαμβάνει και κριτήρια επεκτασιμότητας, ευελιξίας, κατανάλωσης και διαχείρισης αστοχιών. Οι παραπάνω κατευθύνσεις συνιστούν σημαντικά βήματα για την εξέλιξη της έρευνας στον τομέα των υποδομών ΔΚΔ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. F. Bari, R. Boutaba, R. Esteves, L. Z. Granville, M. Podlesny, M. G. Rabbani, Q. Zhang, and M. F. Zhani, "Data Center Network Virtualization: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 909–928, 2013.
- [2] S. Kandula, S. Sengupta, A. Greenberg, P. Patel, and R. Chaiken, "The Nature of Datacenter Traffic: Measurements & Analysis," in *Proc. ACM SIGCOMM*, 2009, pp. 202–208. (2)
- [3] A. S. Tanenbaum and D. Wetherall, *Computer Networks*, 5th ed. Pearson, 2010. (2)
- [4] L. A. Barroso, J. Clidaras, and U. Hölzle, *The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines*. Morgan & Claypool, 2013. (1)
- [5] W. Stallings, *Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*. Pearson, 2015.
- [6] M. Al-Fares, A. Loukissas, and A. Vahdat, "A Scalable, Commodity Data Center Network Architecture," in *Proc. ACM SIGCOMM*, 2008, pp. 63–74.
- [7] M. Alizadeh et al., "On the data path performance of leaf-spine datacenter fabrics," in *Proc. IEEE Hot Interconnects (HotI)*, 2013, pp. 71–78.
- [8] A. Greenberg, P. Lahiri, D. A. Maltz, P. Patel, and S. Sengupta, "Towards a next generation data center architecture: Scalability and commoditization," in *Proc. ACM Workshop on Programmable Routers for Extensible Services of Tomorrow (PRESTO)*, Seattle, WA, USA, Aug. 2008, pp. 57–62.
- [9] M. Alizadeh and T. Edsall, "On the data path performance of leaf-spine datacenter fabrics," in *Proc. IEEE 21st Annual Symposium on High-Performance Interconnects (HOTI)*, 2013, pp. 71–76.
- [10] C. Guo, G. Lu, D. Li, H. Wu, X. Zhang, Y. Shi, C. Tian, Y. Zhang, and S. Lu, "BCube: A High Performance, Server-centric Network Architecture for Modular Data Centers," in *Proc. ACM SIGCOMM Conf.*, Barcelona, Spain, Aug. 2009, pp. 63–74.
- [11] C. Guo, H. Wu, K. Tan, L. Shi, Y. Zhang, and S. Lu, "DCell: A Scalable and Fault-Tolerant Network Structure for Data Centers," in *Proc. ACM SIGCOMM Conf.*, Seattle, WA, USA, Aug. 2008, pp. 75–86.
- [12] E. Biersack, C. Callegari, and M. Matijasevic (Eds.), *Data Traffic Monitoring and Analysis*. Springer, 2013.
- [13] F. Yan, C. Xie, J. Zhang, Y. Xi, Z. Yao, Y. Liu, X. Lin, J. Huang, Y. Ce, X. Zhang, and N. Calabretta, "Network traffic characteristics of hyperscale data centers in the era of cloud applications," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 15, no. 10, pp. 736–749, Oct. 2023.
- [14] J. Li, Y. Yang, and Y. Li, "Dynamic Load Balancing in Fat-Tree Data Center Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2015, pp. 1776–1784.
- [15] T. Benson, A. Akella, and D. A. Maltz, "Understanding Data Center Traffic Characteristics," in *Proc. ACM IMC*, 2010, pp. 65–78. (1)
- [16] C. H. Liu, A. Kind, and A. V. Vasilakos, "Sketching the data center network traffic," *IEEE Netw.*, vol. 27, no. 6, pp. 44–50, Nov./Dec. 2013.
- [17] W. Bai, L. Chen, K. Chen, D. Han, C. Tian, and H. Wu, "RepNet: Cutting latency with flow replication in data center networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 26, no. 3, pp. 1128–1141, Jun. 2018.
- [18] S. Kandula, S. Sengupta, A. Greenberg, P. Patel, and R. Chaiken, "Isolating mice and elephant in data centers," in *Proc. IEEE INFOCOM*, San Diego, CA, USA, Mar. 2012, pp. 2254–2262.
- [19] A. Alawadi, A. Qureshi, and R. H. Khokhar, "Methods for predicting behavior of elephant flows in data center networks," in *Proc. Int. Conf. Comput. Netw. Commun. (ICNC)*, Honolulu, HI, USA, Feb. 2019, pp. 585–589.

- [20] X. Guo, F. Yan, X. Xue, B. Pan, G. Exarchakos, and N. Calabretta, "QoS-aware data center network reconfiguration method based on deep reinforcement learning," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 13, no. 5, pp. 94–106, May 2021.
- [21] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica, and M. Zaharia. 2010. A view of cloud computing. *Commun. ACM* 53, 4 (April 2010), p.50-58.
- [22] M. F. Bari, R. Boutaba, R. Esteves, L. Z. Granville, and M. Podlesny, "Data center network virtualization: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 2, pp. 909–928, Second Quart. 2013.
- [23] M. Noormohammadpour and C. S. Raghavendra, "Datacenter Traffic Control: Understanding Techniques and Trade-offs," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 2, pp. 1492–1525, 2nd Quart. 2018.
- [24] Y. Chen, S. Jain, V. K. Adhikari, Z.-L. Zhang, and K. Xu, "A First Look at Inter-Data Center Traffic Characteristics via Yahoo! Datasets," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2011, pp. 1620–1628.
- [25] C. W. F. Parsonson, J. L. Benjamin, and G. Zervas, "Traffic generation for benchmarking data center networks," *Opt. Switch. Netw.*, vol. 45, p. 100695, May 2022.
- [26] T. Benson, A. Akella, and D. A. Maltz, "Network traffic characteristics of data centers in the wild," in *Proc. ACM SIGCOMM Internet Meas. Conf. (IMC)*, Melbourne, Australia, Nov. 2010, pp. 267–280.
- [27] D. Abts and J. Kim. High-performance Datacenter Networks: Architectures, Algorithms, and Opportunities. Morgan & Claypool, Dan Rafael, CA, 2011.
- [28] C.-H. Wang and T. Javidi, "Adaptive policies for scheduling with reconfiguration delay: An end-to-end solution for all-optical data centers," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 25, no. 3, pp. 1676–1689, Jun. 2017.
- [29] R. Rocher-Gonzalez, D. Fernández, and D. Careglio, "Towards an efficient combination of adaptive routing and queuing schemes in Fat-Tree topologies," *arXiv preprint arXiv:2502.00597*, Feb. 2024.
- [30] T. Benson, A. Akella, D.A. Maltz, Network traffic characteristics of data centers in the wild, in: *Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, IMC*, 2010, pp. 267–280,
- [31] Y. Bi, Y. Xiao, Z. Zhang, X. Xu, and B. Chen, "Multicore fiber interconnects for multi-terabit spine-leaf datacenter network topologies," in *Proc. 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Francisco, CA, USA, 2021, pp. 1–3.
- [32] Al-Fares, M., Loukissas, A., & Raghavan, A. (2008, August). A scalable, commodity data center network architecture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38, 63-74.
- [33] S. Zafar, A. Bashir, and S. A. Chaudhry, "On Implementation of DCTCP on Three-Tier and Fat-Tree Data Center Network Topologies," *SpringerPlus*, vol. 5, no. 766, 2016.
- [34] A. C. Castillo, "Various Network Topologies and an Analysis Comparative Between Fat-Tree and BCube for a Data Center Network: An Overview," in *Proc. 2022 IEEE Cloud Summit*, 2022, pp. 1–6.
- [35] A. Asadpour, M. Ghobadi, and Y. Ganjali, "On-Line Multicast Scheduling with Bounded Congestion in Fat-Tree Data Center Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA, Mar. 2012, pp. 2776–2780.
- [36] M. Sultan, D. Imbuido, K. Patel, J. MacDonald, and K. Ratnam, "Designing knowledge plane to optimize leaf and spine data center," in *Proc. IEEE 13th Int. Conf. on Cloud Computing (CLOUD)*, 2020, pp. 1–10.

- [37] A. Patel and P. Shah, “Energy aware green spine switch management for spine-leaf datacenter networks,” in Proc. IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2022, pp. 1–5.
- [38] D. Abts and B. Felderman. A guided tour of data-center networking. Commun. ACM, Vol.55, Nr. 6 (2012) , p. 44-51.
- [39] TrafPy Documentation. [Online]. Available: <https://github.com/TrafPy>