



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΜΣ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

/ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΥΦΥΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΩΝ

ΔΙΚΤΥΩΝ (SDN)

Παναγοπούλου Ελένη

Επιβλέπουσα: Δρ. Σπυριδούλα Β. Μαργαρίτη

Άρτα, Μάρτιος, 2024

**"COMPARATIVE STUDY OF SIMULATION / EMULATION
TOOLS OF SMART PROGRAMMABLE NETWORKS (SDN)."**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 2024

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Μαργαρίτη Σπυριδούλα,

2. Μέλος επιτροπής

Ελευθέριος Στεργίου,

3. Μέλος επιτροπής

Κωνσταντίνος Αγγέλης,

© Παναγοπούλου, Ελένη, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

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

Παναγοπούλου, Ελένη

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Δρ. Σπυριδούλα Β. Μαργαρίτη, για την επιστημονική, πνευματική και ηθική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Software-DefinedNetworking (SDN) είναι μια καινοτομία που έχει φέρει επανάσταση στην τεχνολογία δικτύωσης με τον διακριτό διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου από τον μηχανισμό προώθησης πακέτων. Αυτό όχι μόνο επιτρέπει τον δυναμικό, κεντρικό έλεγχο, αλλά και ενισχύει τον προγραμματισμό σε όλο το δίκτυο. Τρία βασικά εργαλεία προσομοίωσης/εξομοίωσης — Mininet, CloudSimSDN και NS-3 — προβάλλονται ως κορυφαία εργαλεία για τη μελέτη και τη δοκιμή των ιδιοτήτων του SDN. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής γίνεται μια συγκριτική εξερεύνηση αυτών των εργαλείων, εξετάζοντας εξονυχιστικά την αποτελεσματικότητά τους όσον αφορά το χρόνο μετάδοσης, την CPU και την απόδοση της μνήμης.

Η μελέτη είναι δομημένη σε ένα αυστηρό πλαίσιο δοκιμών, εστιάζοντας σε αυτά τα δύο κύρια εργαλεία προσομοίωσης/εξομοίωσης. Ρυθμίζουμε το περιβάλλον για κάθε εργαλείο, μετρώντας τις επιδόσεις του χρόνου μετάδοσης, της CPU και της μνήμης υπό φόρτους εργασίας και συνθήκες.

Τα ευρήματα από αυτήν τη συγκριτική μελέτη έχουν σημασία για τους διαχειριστές δικτύων, τους προγραμματιστές και τους ερευνητές. Η αναγνώριση του βέλτιστου εργαλείου με βάση τις μετρήσεις απόδοσης διασφαλίζει μια πιο ομαλή εφαρμογή SDN, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση. Επιπλέον, τα αποτελέσματα βοήθησαν στην προσαρμογή στρατηγικών για την παροχή δικτύων και τη διαχείριση υποδομής σε κέντρα δεδομένων, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να έχουν ενημερωμένες επιλογές για ένα μέλλον που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα πρότυπα SDN.

Λέξεις-κλειδιά: Software-DefinedNetworking (SDN), Προσομοίωση/Εξομοίωση, Απόδοση, Διαχείριση Δικτύων.

ABSTRACT

The Software-Defined Networking (SDN) has revolutionized networking technology with the distinct separation of the control plane from the data plane. This not only allows for dynamic, centralized control but also enhances programming across the network. Three basic simulation/emulation tools — Mininet, CloudSimSDN, and NS-3 — are considered leading tools for studying and testing the properties of SDN. This thesis initiates a comparative exploration of these tools, examining in detail their effectiveness in terms of transmission time, CPU, and memory performance.

The study is structured within a strict testing framework, focusing on these two main simulation/emulation tools. We set up the environment for each tool, measuring the performance of transmission time, CPU, and memory under workload conditions and circumstances.

The findings from this comparative study are significant for network administrators, developers, and researchers. Identifying the best tool based on performance measurements ensures a smoother SDN implementation, leading to improved performance. Additionally, the results helped tailor strategies for network provisioning and infrastructure management in data centers, giving them the ability to make informed choices for a future that is largely based on SDN standards.

Keywords: Software-Defined Networking (SDN), Simulation/Emulation, Performance, Network Management.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ABSTRACT	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
1 Εισαγωγή	9
1.1 Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα και η σημασία τους στη σύγχρονη δικτύωση.	9
1.2 Ορισμός του προβλήματος.....	9
1.3 Ερευνητικοί στόχοι και πεδίο εφαρμογής της μελέτης	10
1.4 Δομή Εργασίας.....	12
2 Προσομοίωση στην Τεχνολογία SDN: Βασικά Εργαλεία και Σχετικές Εργασίες	14
2.1 Προσομοίωση/εξομοίωση.....	14
2.2 Η σημαντικότητα της προσομοίωσης/εξομοίωσης	16
2.3 Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα	17
2.4 Βασικά εργαλεία προσομοίωσης /εξομοίωσης.....	23
2.5 Επισκόπηση των σχετικών εργασιών	25
3 Εργαλεία προσομοίωσης /εξομοίωσης.....	27
3.1 Mininet	27
3.1.1 Τοπολογίες	27
3.1.2 Κατανάλωση πόρων.....	30
3.1.3 Trafficgenerator	33
3.1.4 Χρήση εξωτερικών εργαλείων στο Mininet	35
3.1.5 Usability/learningcurve	37
3.1.6 Documentation	39
3.1.7 Adoptionfromacademic / researchcommunity	40
3.2 CloudSimSDN	41
3.3 NS-3.....	46

3.3.1	Εισαγωγή.....	46
3.3.2	Αρχιτεκτονική Software.....	48
3.3.3	Διαδικασία Μοντελοποίησης και Προσομοίωσης	50
3.3.4	Εξωτερικά εργαλεία	51
3.3.5	Ευχρηστία και καμπύλη μάθησης	51
3.3.6	Documentation	52
3.3.7	Ακαδημαϊκή / ερευνητική κοινότητα.....	52
3.4	Απαιτήσειςμετρήσεωνσε περιβάλλον SDN	54
3.4.1	Ακρίβεια	54
3.4.2	Πόροι.....	54
3.4.3	Γενικότητα	54
3.4.4	Απλότητα.....	54
3.4.5	Υποστήριξη άλλων συστημάτων.....	54
4	Θεωρητική συγκριτική μελέτη.....	55
4.1	Μεθοδολογία.....	55
4.2	Γενική επισκόπηση.....	57
4.3	Αξιοπιστία.....	60
4.4	Ασφάλεια.....	65
4.5	Ικανοποίηση απαιτήσεων μετρήσεων από τα εργαλεία	71
4.5.1	Ακρίβεια	71
4.5.2	Πόροι.....	71
4.5.3	Γενικότητα	73
4.5.4	Απλότητα.....	77
4.5.5	WiFi- IoT	81
5	Πειραματική σύγκριση	91
5.1	Μεθοδολογία.....	91
5.2	Υλοποίηση πειραματικών μετρήσεων	94
5.2.1	Mininet.....	94

5.2.2	CloudSimSDN	94
5.2.3	NS-3.....	96
5.3	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	97
5.3.1	Χρόνος Μετάδοσης.....	98
5.3.2	Χρόνος CPU.....	99
5.3.3	Χρήση Μνήμης.....	101
5.3.4	Διάρκεια Προσομοίωσης	102
5.3.5	Συμπεράσματα	103
5.4	Μελέτη υπεραπόδοσης.....	104
5.4.1	Αποτελέσματα Υπεραπόδοσης.....	105
5.5	Η σημασία της συλλογής στατιστικών στοιχείων στην προσομοίωση SDN	110
5.5.1	Η προσέγγιση των προσομοιωτών/εξομοιωτών στη συλλογή στατιστικών στοιχείων	112
5.5.2	Ακρίβεια μετρήσεων.....	118
5.6	Δυνατότητα κλιμάκωσης προσομοιώσεων	124
6	Συγκριτική Ανάλυση και Συζήτηση	144
6.1	Ανάλυση Απόδοσης.....	144
6.2	Συνέπειες για την επιλογή εργαλείου.....	145
6.3	Συζήτηση και συστάσεις.....	146
6.4	Μελλοντικές κατευθύνσεις	147
6.5	Προσδιορισμός των περιορισμών της μελέτης και των πιθανών πηγών μεροληψίας.	147
6.6	Περιορισμοί μελέτης και πιθανές πηγές μεροληψίας.....	148
6.7	Συμπέρασμα	149
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	150

1 Εισαγωγή

1.1 Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα και η σημασία τους στη σύγχρονη δικτύωση.

Οι τοπολογίες δικτύων ευρείας εμβέλειας που χαρακτηρίζουν τα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα τα κάνουν ένα λαβύρινθο. Είναι σημαντικό να επανεξεταστούν τα συμβατικά παραδείγματα δικτύωσης δεδομένης της πολυπλοκότητας αυτών των δικτύων, ειδικά σε περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας. Η εισαγωγή του Software-Defined Networking (SDN) ήταν μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα.

Με την κεντρική αρχή του διαχωρισμού του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων, το SDN άλλαξε ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τη διαχείριση και τον προγραμματισμό του δικτύου. Οι διαχειριστές δικτύου μπορούν να έχουν κεντρικό έλεγχο ο οποίος παρέχει μια άποψη ολόκληρης της τοπολογίας του δικτύου. Αυτή η κεντρική στρατηγική επιτρέπει σε υπηρεσίες δικτύου όπως η εξισορρόπηση φορτίου, η διαχείριση εύρους ζώνης και η δρομολόγηση να τροποποιούνται συνεχώς για την κάλυψη των εκάστοτε αναγκών.

Ενώ τα θεωρητικά πλεονεκτήματα του SDN είναι γνωστά, η πρακτική του εφαρμογή είναι γεμάτη προκλήσεις. Αυτές οι προκλήσεις προκύπτουν από διάφορους παράγοντες, όπως ζητήματα συμβατότητας με παλαιού τύπου συστήματα, την ανάγκη για προσαρμοστικότητα σε πραγματικό χρόνο και τους πιθανούς κινδύνους που σχετίζονται με σφάλματα ανάπτυξης μεγάλης κλίμακας. Η αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων είναι κρίσιμης σημασίας πριν από την υιοθέτηση σε πλήρη κλίμακα, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία των ισχυρών μηχανισμών δοκιμών.

1.2 Ορισμός του προβλήματος

Ο κόσμος του SDN συνεχίζει να εξελίσσεται, φέρνοντας μαζί του νέες πολυπλοκότητες και προκλήσεις. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί εργαλεία που όχι μόνο προσομοιώνουν αλλά και μιμούνται τις

περίπλοκες λειτουργίες του SDN. Πώς όμως επιλέγουν οι ερευνητές, οι προγραμματιστές και οι διαχειριστές δικτύου το σωστό εργαλείο; Η απάντηση θα προκύψει μετά από μια ολοκληρωμένη συγκριτική μελέτη.

Βασική επιδίωξη της μελέτης μας είναι να συγκρίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των κορυφαίων εργαλείων προσομοίωσης και εξομοίωσης SDN. Μέσω αυτού, ελπίζουμε να προσδιορίσουμε ποια εργαλεία είναι καλύτερα εξοπλισμένα για να αντιμετωπίσουν τις τρέχουσες και τις αναδυόμενες προκλήσεις του SDN.

Συγκρίνοντας διαφορετικά εργαλεία καθορίζουμε σημεία αναφοράς που περιλαμβάνουν την εξέταση του πόσο καλά αυτά τα εργαλεία αναπαράγουν σενάρια SDN του πραγματικού κόσμου. Ένας από τους κύριους στόχους μας είναι να αξιολογήσουμε την ευκολία χρήσης, την καμπύλη εκμάθησης και την προσαρμοστικότητα αυτών των εργαλείων, διασφαλίζοντας ότι είναι φιλικά προς τον χρήστη και προσβάσιμα.

Μέσω της σύγκρισης μας, στοχεύουμε να επισημάνουμε τυχόν μοναδικά χαρακτηριστικά, λειτουργίες ή ιδιότητες που μπορεί να προσφέρουν συγκεκριμένα εργαλεία έναντι άλλων, παρέχοντας έτσι σαφέστερες επιλογές για συγκεκριμένες εργασίες SDN. Καθορίζοντας τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία κάθε εργαλείου, ελπίζουμε να καθοδηγήσουμε τις μελλοντικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στη δημιουργία πιο εκλεπτυσμένων και προσαρμοσμένων εργαλείων προσομοίωσης/εξομοίωσης SDN.

1.3 Ερευνητικοί στόχοι και πεδίο εφαρμογής της μελέτης

Αυτή η μελέτη επιδιώκει να ρίξει φως σε τρία βασικά εργαλεία στον τομέα του SDN: Mininet, CloudSimSDN και NS-3, εμβαθύνοντας στις μετρήσεις απόδοσης, τις ικανότητες και τις ευρύτερες επιπτώσεις τους στο τοπίο του SDN.

Στο επίκεντρο αυτής της μελέτης βρίσκεται ο στόχος να ξεκινήσουμε μια εξερεύνηση του Mininet, του CloudSimSDN και του NS-3. Δεν πρόκειται μόνο για την κατανόηση των θεμελιωδών αρχιτεκτονικών τους, αλλά και για

την κατανόηση των διαφορετικών λειτουργιών και δυνατοτήτων τους. Πώς λειτουργούν σε ποικίλα περιβάλλοντα; Ποια μοναδικά χαρακτηριστικά φέρουν; Αυτά είναι μερικά από τα ερωτήματα που στοχεύει να απαντήσει αυτή η μελέτη.

Πέρα από την κατανόηση των εργαλείων, αυτή η μελέτη δίνει έμφαση στην αξιολόγησή τους σε κρίσιμες μετρήσεις απόδοσης. Η έρευνα θα αναλύσει την αποτελεσματικότητα του; με βάση τρεις βασικές παραμέτρους: χρόνο μετάδοσης, κατανάλωση CPU και χρήση μνήμης. Αυτή η τριπλή ανάλυση αναμένεται να παρέχει μια ολοκληρωμένη άποψη της δυναμικής απόδοσής τους.

Κάθε εργαλείο έχει ένα συγκεκριμένο περιβάλλον όπου αποδίδει καλύτερα. Ένας από τους στόχους αυτής της μελέτης είναι να διακρίνει τέτοια λειτουργικά περιβάλλοντα για το Mininet, το CloudSimSDN και το NS-3. Αυτό περιλαμβάνει τη δημιουργία ποικίλων σεναρίων και περιβαλλόντων για να δούμε ποιο εργαλείο προσφέρει ανώτερη απόδοση και υπό ποιες συνθήκες.

Αυτή η έρευνα δεν σταματά μόνο σε αξιολογήσεις. Κατανοώντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς και των δύο εργαλείων, η μελέτη ελπίζει να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες για τους επαγγελματίες του δικτύου όσον αφορά την εφαρμογή και τη διαχείριση SDN.

Αν και ο κόσμος των εργαλείων SDN είναι ευρύς και ποικιλόμορφος, αυτή η μελέτη ενισχύει την έμφαση στην εξασφάλιση βάθους. Η μελέτη μπορεί να εμβαθύνει και να προσφέρει μια διορατική, ενδεδειγμένη ανάλυση και όχι μια συνοπτική περίληψη εστιάζοντας σε αυτά τα μέσα.

Οι μετρήσεις απόδοσης αποτελούν τη ραχοκοκαλιά αυτής της έρευνας. Επικεντρώνοντας στον χρόνο μετάδοσης, την CPU και την απόδοση της μνήμης, η μελέτη διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα δεν είναι μόνο επιστημονικά αλλά και πρακτικής σημασίας για την κοινότητα SDN.

Μια κρίσιμη πτυχή αυτής της έρευνας έγκειται στη διαφοροποίηση μεταξύ των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται από τα δύο εργαλεία. Το Mininet χρησιμοποιείται για εξομίωση ενώ το CloudSimSDN για προσομοίωση,

ωστόσο το NS-3 εξυπηρετεί κυρίως ως προσομοιωτής με επιπρόσθετη ικανότητα να διεξάγει εξομοίωση σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.. Η κατανόηση αυτών των αποχρώσεων είναι ζωτικής σημασίας για την ερμηνεία των ευρημάτων και των συνεπειών τους.

Τέλος, ο ευρύτερος στόχος είναι να επεκταθούν αυτά τα ακαδημαϊκά ευρήματα σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου. Αυτή η μελέτη στοχεύει να είναι κάτι περισσότερο από μια απλή θεωρητική προσπάθεια – επιδιώκει να είναι καθοδήγηση για τους διαχειριστές δικτύων, και τους προγραμματιστές του SDN, βοηθώντας τους να περιηγηθούν στο εξελισσόμενο τοπίο των SDN με σαφήνεια.

1.4 Δομή Εργασίας.

Ξεκινώντας με μια εισαγωγή στο κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις έννοιες του SDN και η σημασία των εργαλείων προσομοίωσης συγκριτικής αξιολόγησης όπως το Mininet, το CloudSimSDN και το NS-3. Αυτή η ενότητα περιγράφει τη δήλωση του προβλήματος καθορίζοντας τους στόχους και το πεδίο της έρευνας.

Το κεφάλαιο 2 εμβαθύνει στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναπτύσσοντας τους θεμελιώδεις ορισμούς της προσομοίωσης και της εξομοίωσης. Το κεφάλαιο υπογραμμίζει περαιτέρω τη σημασία αυτών των μεθοδολογιών στη δικτύωση και παρέχει μια επισκόπηση εστιάζοντας ειδικά στο SDN. Μια ανάλυση προηγούμενης έρευνας σχετικά με τα εργαλεία προσομοίωσης SDN διασφαλίζει ότι η μελέτη βασίζεται σε καθιερωμένη γνώση. Στο Κεφάλαιο 3, το επίκεντρο είναι το Mininet, το CloudSimSDN και το NS-3, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά, τις δυνατότητές τους και τις πραγματικές περιπτώσεις χρήσης.

Το κεφάλαιο μεθοδολογία που ακολουθεί σκιαγραφεί τα κριτήρια αξιολόγησης, την πειραματική ρύθμιση και τις μετρήσεις απόδοσης, διασφαλίζοντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση. Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα, παρέχοντας ποσοτικά δεδομένα για την απόδοση των δύο εργαλείων και αξιολογώντας τα με διάφορες μετρήσεις.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 6, συνοψίζοντας τα ευρήματα, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της μελέτης και εξετάζοντας τις επιπτώσεις για την ευρύτερη κοινότητα SDN.

2 Προσομοίωση στην Τεχνολογία SDN: Βασικά Εργαλεία και Σχετικές Εργασίες

2.1 Προσομοίωση/εξομοίωση

Στο πλαίσιο του SDN, η κατανόηση της διάκρισης μεταξύ προσομοίωσης και εξομοίωσης είναι ζωτικής σημασίας, καθώς το καθένα προσφέρει διαφορετικές προοπτικές και εργαλεία για την εργασία.

Υπάρχει συχνά σύγχυση μεταξύ των όρων εξομοίωση(emulation) και προσομοίωση(simulation). Στην ουσία, η εξομοίωση δικτύου μιμείται μια συσκευή παραγωγής με ένα εικονικό ισοδύναμο που προέρχεται από το ίδιο λογισμικό με τη συσκευή παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, η προσομοίωση δικτύου διαφέρει εντελώς καθώς προσπαθεί να αναπαράγει τη συμπεριφορά μιας συσκευής δικτύου μέσω εντελώς διαφορετικού λογισμικού. Τόσο η εξομοίωση όσο και η προσομοίωση είναι ζωτικής σημασίας, καθώς στοχεύουν στην αναπαραγωγή δικτυακών περιβαλλόντων πραγματικού κόσμου με ελεγχόμενο τρόπο, με το καθένα να έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες στις δοκιμές.

Η προσομοίωση στο SDN αναφέρεται στη δημιουργία ενός μοντέλου που αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά ενός δικτύου SDN. Αυτό το μοντέλο λειτουργεί σε εικονικό περιβάλλον και αναπαράγει τις υψηλού επιπέδου λειτουργίες και τα αποτελέσματα ενός συστήματος SDN. Οι προσομοιωτές μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός δικτύου υπό διάφορες συνθήκες, επιτρέποντας στους ερευνητές και τους προγραμματιστές να δοκιμάσουν διαφορετικές διαμορφώσεις δικτύου, πρωτόκολλα ή αλγόριθμους χωρίς φυσική υποδομή SDN.

Η εξομοίωση, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος όπου τα στοιχεία SDN του πραγματικού κόσμου (όπως διακόπτες, ελεγκτές και δρομολογητές) αντιπροσωπεύονται από αντίστοιχες οντότητες λογισμικού.. Αυτά τα στοιχεία λογισμικού ή οι εξομοιωτές λειτουργούν με τρόπο που αντικατοπτρίζει στενά τα αντίστοιχα του πραγματικού κόσμου, τόσο στη συμπεριφορά όσο και στις υποκείμενες διαδικασίες. Οι εξομοιωτές επιτρέπουν στους χρήστες να αλληλοεπιδρούν με

το προσομοιωμένο SDN όπως με ένα πραγματικό δίκτυο, παρέχοντας μια πρακτική πλατφόρμα για ανάπτυξη, δοκιμή και αντιμετώπιση προβλημάτων.

Στην προσομοίωση, οι διαχειριστές δικτύου μπορούν να χρησιμοποιήσουν το CloudSimSDN για να το προσομοιώσουν σε μια μεγάλη επιχείρηση με χιλιάδες συσκευές. Αυτή η προσομοίωση θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες για το πώς οι νέοι αλγόριθμοι ελέγχου επηρεάζουν τις ροές κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια φορτίων αιχμής ή εντοπίζουν πιθανά σημεία συμφόρησης στις προτεινόμενες διαμορφώσεις. Για παράδειγμα, πριν από την ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου νέας ποιότητας υπηρεσίας (QoS), ο διαχειριστής μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του, διασφαλίζοντας ότι δίνει προτεραιότητα στην κρίσιμη κυκλοφορία ακόμη και υπό συνθήκες πίεσης χωρίς να χρειάζεται να κάνει δοκιμή σε ζωντανό περιβάλλον.

Όσον αφορά την εξομοίωση, εργαλεία όπως το Mininetέχουν κεντρικό ρόλο. Ένας μηχανικός δικτύου που αναλαμβάνει τη διόρθωση προβλημάτων σε ένα δίκτυο SDN που βρίσκεται ήδη σε λειτουργία, έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μια πιστή αναπαράσταση του δικτύου μέσω τεχνικών εξομοίωσης. Σε αυτό το περιβάλλον, ο μηχανικός μπορεί να πειραματιστεί με διάφορες επιδιορθώσεις, να παρατηρήσει τον αντίκτυπό τους και να εντοπίσει τη βασική αιτία χωρίς να διακινδυνεύσει περαιτέρω διακοπές στο ζωντανό δίκτυο.

Επιπλέον, το NS-3 αποτελεί ένα ευέλικτο εργαλείο που ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί τόσο για προσομοίωση όσο και για εξομοίωση. Χάρη στην ικανότητά του να μοντελοποιεί με ακρίβεια δικτυακές διαδικασίες και πρωτόκολλα, το NS-3 είναι ιδανικό για τη δημιουργία σύνθετων δικτυακών σεναρίων και την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους, καθώς και για την εξομοίωση πραγματικής κυκλοφορίας δεδομένων σε ελεγχόμενο περιβάλλον, επιτρέποντας στους ειδικούς να πραγματοποιούν ακριβείς μετρήσεις και αναλύσεις.

Αυτά τα παραδείγματα υπογραμμίζουν τους απαραίτητους ρόλους τόσο της προσομοίωσης όσο και της εξομοίωσης στο τοπίο του SDN, εξυπηρετώντας

συμπληρωματικές λειτουργίες για να βοηθήσουν τόσο την έρευνα όσο και την πρακτική εφαρμογή τεχνολογιών που καθορίζονται από λογισμικό.

2.2 Η σημαντικότητα της προσομοίωσης/εξομοίωσης

Η προσομοίωση και η εξομοίωση έχουν σημαντικούς ρόλους στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης δικτύων, ειδικά όταν πρόκειται για την καινοτόμο προσέγγιση των δικτύων SDN. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν στους ερευνητές να κατανοήσουν, να πρωτοτυπήσουν και να βελτιώσουν τις λειτουργίες του δικτύου πριν τις εφαρμόσουν.

Οι Gupta κ.ά.[\[1\]](#)επεσήμαναν ότι τα εργαλεία για την ανάπτυξη και τη δοκιμή εφαρμογών SDN έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Ανέφεραν τα πλεονεκτήματα του Mininet, το οποίο προσφέρει μια καλή μετάβαση από την ανάπτυξη στην εφαρμογή, αλλά τόνισαν επίσης τους περιορισμούς του, ειδικά κατά την κλιμάκωση σε μεγαλύτερα δίκτυα. Εισηγήσαν περαιτέρω ένα εργαλείο που βασίζεται σε προσομοίωση, το fs-sdn, το οποίο εξισορροπεί τον ρεαλισμό με την κλιμάκωση και την απόδοση.

Παρομοίως, η εργασία των Oliveira κ.ά.[\[2\]](#), εστιάζει στηνεξομοίωσητωνSDNμέσω τουMininet.Σημειώθηκε ότι δεδομένου ότι η έρευνα SDN εξακολουθεί να προχωρά και πολλές συσκευές συμβατές με SDN είναι ακριβές, οι εξομοιωτές εικονικών δικτύων όπως το Mininet προσφέρουν μια βιώσιμη λύση. Η ικανότητα του εργαλείου για γρήγορη και απλοποιημένη δημιουργία πρωτοτύπων, κοινή χρήση αποτελεσμάτων και εργαλείων χωρίς κόστος το καθιστά ανεκτίμητο πλεονέκτημα για τους ερευνητές.

Τέλος, οι Ivey, Jared κ.α.σε μια πρόσφατη μελέτη[\[3\]](#)εξέτασαν τον αντίκτυπο της κλιμάκωσης στην προσομοίωση δικτύων SDN και ανέπτυξαν ένα πλαίσιο προσομοίωσης βασισμένο στο NS-3. Στην εργασία οι συγγραφείς αναλύουν τα πλεονεκτήματα της επέκτασης του NS-3 σε σχέση με άλλα υπάρχοντα εργαλεία προσομοίωσης και εξομοίωσης. Καταδεικνύουν ότι η προσέγγισή τους υπερτερεί σε θέματα κλιμάκωσης και προσφέρει αυξημένη απόδοση, κάτι που είναι κρίσιμο για την ακριβή αναπαραγωγή μεγάλων δικτυακών περιβαλλόντων.

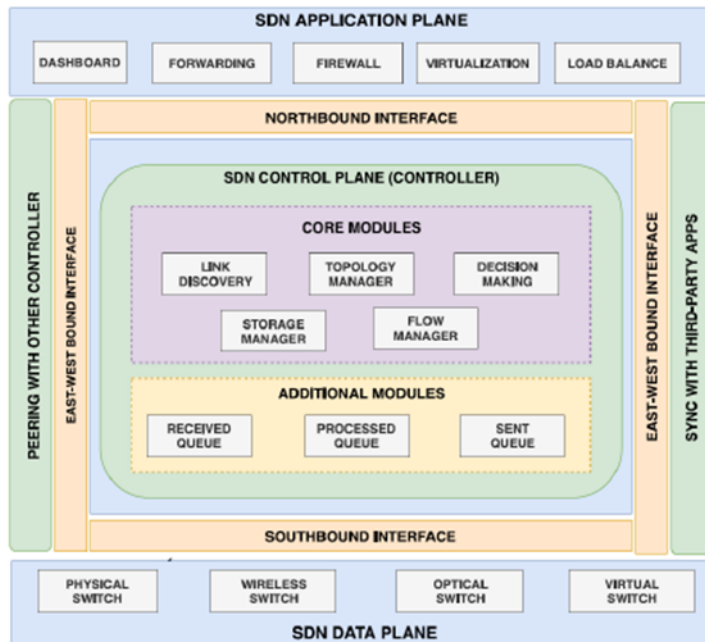
2.3 Τα ευφυή προγραμματιζόμενα δίκτυα

Το SDN εκπροσωπεί μια πρωτοποριακή λύση στον τομέα της δικτύωσης, προσφέροντας μια σημαντική απόκλιση από τα παραδοσιακά δίκτυα. Οι κυρίαρχες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα παραδοσιακά δίκτυα, όπως η ανάγκη για χειροκίνητη διαμόρφωση και η δυσκολία στην επίτευξη διαλειτουργικότητας λόγω των ιδιόκτητων λύσεων των διάφορων προμηθευτών, αναδεικνύουν την ανάγκη για μια πιο ευέλικτη και δυναμική προσέγγιση στη δικτύωση [\[4\]](#).

Μέσω της αποσύνδεσης των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων, το SDN προωθεί την κεντροποιημένη διαχείριση δικτύου μέσω ενός λογισμικού ελεγκτή SDN. Αυτό το χαρακτηριστικό απλουστεύει σημαντικά τη διαχείριση του δικτύου και ενισχύει την προσαρμοστικότητα και τον αυτοματισμό, ανοίγοντας τον δρόμο για την ταχεία ανάπτυξη και εφαρμογή νέων δικτυακών υπηρεσιών .

Αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά δίκτυα που βασίζονται στο υλικό με ένα μοντέλο οδηγούμενο από λογισμικό, το SDN διευκολύνει την υλοποίηση καινοτόμων δικτυακών λύσεων μέσω υψηλού επιπέδου προγραμματιστικών γλωσσών. Ο ελεγκτής SDN μεταφράζει αυτές τις προγραμματιστικές οδηγίες σε κανόνες προώθησης, προσφέροντας μια πολύ πιο ευέλικτη και προσαρμόσιμη δικτυακή υποδομή .

Η αρχιτεκτονική του SDN βασίζεται σε τρία κεντρικά επίπεδα: το επίπεδο διαχείρισης, το επίπεδο ελέγχου, και το επίπεδο δεδομένων. Το επίπεδο ελέγχου, καρδιά της αρχιτεκτονικής SDN, αποτελείται από τον ελεγκτή SDN που διαχειρίζεται κεντρικά όλες τις συσκευές στο δίκτυο, επιτρέποντας την ενοποίηση και αυτοματοποίηση της δικτυακής λειτουργίας [\[4\]](#). Ένα τυπικό δείγμα αυτής της αρχιτεκτονικής απεικονίζεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1 Επισκόπηση των SDN controllers [5]

Η εισαγωγή εξελιγμένων flowtables στο επίπεδο δεδομένων του SDN επιτρέπει τη λήψη πιο σύνθετων και δυναμικών αποφάσεων, υπερβαίνοντας τις δυνατότητες των παραδοσιακών πινάκων προώθησης και προωθώντας την καινοτομία στη δικτυακή τεχνολογία.

Η βαθιά κατανόηση του SDN και η εξέταση των διαρθρωτικών και λειτουργικών του πτυχών επισημαίνουν τις μετασχηματιστικές του δυνατότητες, προσφέροντας ένα νέο όραμα για το μέλλον της δικτύωσης [4].

Τα τρία επίπεδα του SDN:

Επίπεδο δεδομένων (DataPlane): Ουσιαστικά το επίπεδο δεδομένων εστιάζει στην κύρια λειτουργία προώθησης οποιασδήποτε κίνησης δικτύου. Εντός του πλαισίου SDN, οι συσκευές στο επίπεδο δεδομένων εκτελούν ενέργειες που βασίζονται σε αναπαραστάσεις των υποκείμενων δυνατοτήτων υλικού. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει ένα πιο προσαρμόσιμο και δυναμικό σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας, προσαρμοσμένο στις διαφορετικές συνθήκες και απαιτήσεις του δικτύου.

Επίπεδο ελεγκτή(ControllerPlane): Λειτουργώντας ως το κεντρικό νευρικό σύστημα του SDN, το επίπεδο ελεγκτή ενοποιεί τον έλεγχο σε ολόκληρη την υποδομή του δικτύου. Με τον κεντρικό του ρόλο, οι ελεγκτές SDN επικοινωνούν με μεμονωμένες συσκευές δικτύου, διασφαλίζοντας μια ενημερωμένη εικόνα της κατάστασης του δικτύου. Αυτή η κεντρική προσέγγιση εξουσιοδοτεί τους διαχειριστές να εισάγουν αλλαγές ή πολιτικές σε όλο το δίκτυο απρόσκοπτα, βελτιστοποιώντας την απόδοση, την ασφάλεια και την αξιοπιστία.

Επίπεδο εφαρμογής(ApplicationPlane): Αυτό το επίπεδο φιλοξενεί μια πληθώρα εφαρμογών δικτύου, καθεμία σχεδιασμένη να υπαγορεύει συγκεκριμένες συμπεριφορές δικτύου. Οι εφαρμογές μπορούν να κυμαίνονται από πρωτόκολλα ασφαλείας έως εργαλεία βελτιστοποίησης κυκλοφορίας. Στο μοναδικό οικοσύστημα του SDN, αυτές οι εφαρμογές όχι μόνο καθοδηγούν το δίκτυο αλλά διαθέτουν επίσης τη δυνατότητα να λειτουργούν ως ελεγκτές SDN οι ίδιοι, ενισχύοντας την προσαρμοστικότητα και την ευελιξία της αρχιτεκτονικής[5].

Διαχείριση:

Ένα κεντρικό στοιχείο του μοντέλου SDN είναι η εξελιγμένη και ολιστική δομή διαχείρισης και διοίκησης. Σε πλήρη αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα που αντιμετωπίζουν τη διαμόρφωση και τη διαχείριση συσκευή προς συσκευή, το SDN εκσυγχρονίζει αυτές τις διαδικασίες μέσω κεντρικών μηχανισμών διαχείρισης.

Κάθε επίπεδο εντός της αρχιτεκτονικής SDN - είτε πρόκειται για επίπεδο δεδομένων, ελεγκτή ή εφαρμογής - είναι πολύπλοκα συνδεδεμένο με μια αποκλειστική διαχειριστική οντότητα. Αυτές οι οντότητες ή οι διαχειριστές διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο όχι μόνο στην κατανομή των πόρων αλλά και στη διασφάλιση απρόσκοπτης και αποτελεσματικής επικοινωνίας μεταξύ των επιπέδων[6].

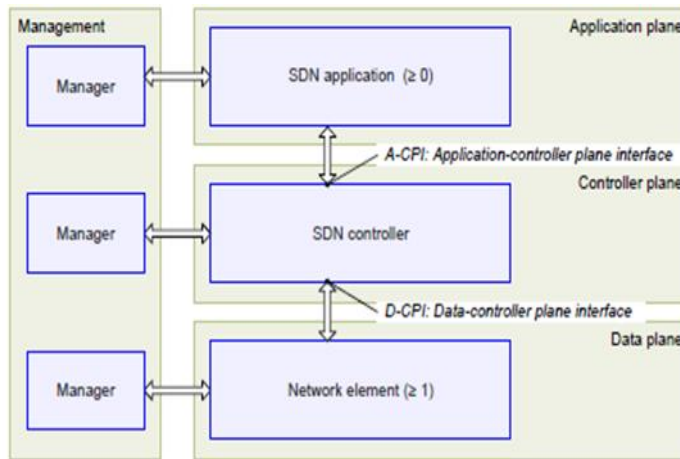
Κατανομή πόρων: Ένα από τα κύρια καθήκοντα των διαχειριστών στο πλαίσιο SDN είναι να επιβλέπουν και να διανέμουν πόρους. Είτε πρόκειται για εύρος ζώνης στο επίπεδο δεδομένων, ισχύ επεξεργασίας εντός του επιπέδου ελεγκτή

ή για ειδικές δυνατότητες εφαρμογής στο επίπεδο εφαρμογής, οι διαχειριστές διασφαλίζουν τη βέλτιστη και δυναμική κατανομή με βάση τις τρέχουσες απαιτήσεις δικτύου και τις πολιτικές που ορίζονται από τους διαχειριστές.

Επικοινωνία μεταξύ Dataplanes: Δεδομένων των διακριτών λειτουργιών των επιπέδων SDN, η επικοινωνία μεταξύ τους είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι managers, από αυτή την άποψη, ενεργούν ως μεσάζοντες, δημιουργώντας ισχυρά κανάλια για ανταλλαγές μεταξύ επιπέδων. Για παράδειγμα, όταν μια εφαρμογή στο επίπεδο εφαρμογής απαιτεί συγκεκριμένους κανόνες πρόωθησης δεδομένων, επικοινωνεί τις ανάγκες της στο επίπεδο δεδομένων μέσω του διαχειριστή, εξασφαλίζοντας σε πραγματικό χρόνο ακριβείς αποκρίσεις δικτύου.

Administrative Domains: Αξίζει να σημειωθεί ότι διαφορετικά τμήματα της δομής SDN ενδέχεται να ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς διαχείρισης. Αυτοί οι τομείς οριοθετούν την εξουσία και τον έλεγχο εντός του δικτύου. Οι managers συνήθως τοποθετούνται στον ίδιο τομέα με το επίπεδο που επιβλέπουν, διασφαλίζοντας ταχεία εφαρμογή πολιτικής, συμμόρφωση με την ασφάλεια και αποτελεσματική χρήση των πόρων.

Αυτό το διαχειριστικό παράδειγμα στο SDN, που υπογραμμίζεται από τον κεντρικό έλεγχο και τη δυναμική προσαρμοστικότητα, ωθεί τη διαχείριση δικτύου σε μια νέα εποχή. Με την εξάλειψη των πλεονασμάτων και της αναποτελεσματικότητας της παραδοσιακής διαχείρισης δικτύου, το πλαίσιο διαχείρισης του SDN προαναγγέλλει ένα μέλλον όπου η επεκτασιμότητα, η αξιοπιστία και η προσαρμοστικότητα του δικτύου δεν είναι πλέον φιλοδοξίες αλλά πραγματικότητα.



Εικόνα 2 Στοιχεία SDN με management [6]

Τα οφέλη του SDN

Το SDN δεν είναι απλώς μια πρόοδος στη δικτύωση, αλλά μια σημαντική επανάσταση, που προσφέρει λύσεις σε προκλήσεις που ταλαιπωρούν εδώ και πολύ καιρό παλαιού τύπου αρχιτεκτονικές δικτύων [7].

1) Βελτιωμένη δυνατότητα προγραμματισμού:

Οι προηγούμενες δομές δικτύωσης, γεμάτες πολυπλοκότητες και δυσκαμψίες, έρχονται σε πλήρη αντίθεση με την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα που εισάγει το SDN. Κεντρική θέση στη δύναμη του SDN είναι η ικανότητά του να προγραμματίζει το δίκτυο, προσθέτοντας ένα νέο επίπεδο ενορχήστρωσης που αναζωογονεί το παραδοσιακό μοντέλο δικτύωσης. Η αφαίρεση δεδομένων και επιπέδων ελέγχου είναι καθοριστικής σημασίας για να δοθεί η δυνατότητα στις επιχειρήσεις να ασκούν απaráμιλλο προγραμματιζόμενο έλεγχο στα δίκτυά τους. Αυτό διασφαλίζει ότι η απόδοση και η εμπειρία χρήστη διατηρούνται ακόμη και κατά την κλιμάκωση.

Το SDN εισάγει μια μετάβαση από τις συμβατικές διαμορφώσεις για συγκεκριμένες συσκευές σε μια προσέγγιση σε όλο το δίκτυο. Το επίπεδο ελέγχου, σε μια τυπική ρύθμιση SDN, εξωτερικεύεται από περιορισμούς υλικού, που συχνά βρίσκονται σε αποκλειστικούς διακομιστές εξοπλισμένους με λογισμικό SDN. Τέτοιοι εξωτερικοί ελεγκτές επιτρέπουν ένα ευέλικτο, προγραμματιζόμενο επίπεδο ελέγχου που μπορεί να διαδώσει τις αλλαγές με ακρίβεια και ασφάλεια. Με το SDN, η αρχιτεκτονική του δικτύου γίνεται πιο

ανθεκτική και προσαρμόσιμη, ιδιαίτερα αξιοσημείωτη στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζει την κυκλοφορία βίντεο, μειώνοντας τα σημεία συμφόρησης και βελτιστοποιώντας τη ροή.

2) Εικονικοποίηση:

Τα Hyper-scale κέντρα δεδομένων, απαραίτητα για τους σύγχρονους υπολογιστές, αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις επεκτασιμότητας, ειδικά καθώς πολλαπλασιάζονται οι εικονικές μηχανές (VM) και οι ανάγκες γίνονται πολύπλοκες. Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές συχνά παραπαίουν σε αυτά τα δυναμικά περιβάλλοντα, προκαλώντας διακοπές στην υπηρεσία και υποβαθμισμένες εμπειρίες των χρηστών. Η λειτουργία του SDN της εικονικοποίησης δικτύου αναδεικνύεται ως σημαντική αλλαγή. Αφαιρώντας τις διευθύνσεις MAC και επιτρέποντας στην κυκλοφορία του επιπέδου 2 να γίνεται απρόσκοπτα πάνω από επικαλύψεις του επιπέδου 3, το SDN καθιστά τη διαδικασία ανάπτυξης και μετεγκατάστασης VM αποτελεσματική .

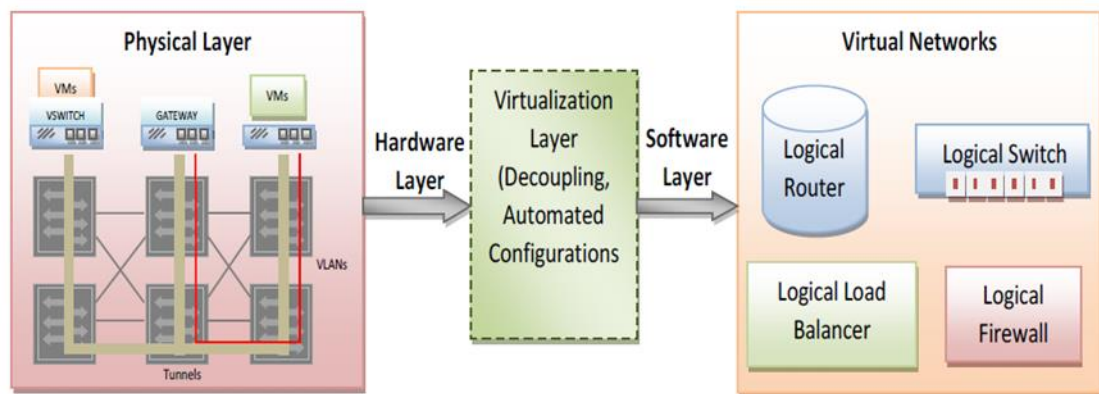
Επιπλέον, οι δυνατότητες εικονικοποίησης του SDN εκτείνονται πέρα από τη διαχείριση VM. Οι πάροχοι φιλοξενίας πολλών hosts, αξιοποιώντας το SDN, μπορούν να δημιουργήσουν συνεκτικές ενοποιήσεις μεταξύ των πόρων τους, είτε πρόκειται για φυσικούς hosts, ή απομακρυσμένες εγκαταστάσεις. Το εικονικό επίπεδο του SDN αναδιαμορφώνει τον ιστό των αρχιτεκτονικών cloud, επιτρέποντας στους πελάτες να προσαρμόσουν τις προβολές του δικτύου των κέντρων δεδομένων τους στις ακριβείς λειτουργικές τους ανάγκες. Αυτό ανοίγει το δρόμο για καινοτόμες λύσεις όπως το "Networks as a Service" (NaaS), ευθυγραμμίζοντας τις υπηρεσίες δικτύου πιο στενά με τα εξελισσόμενα επιχειρηματικά μοντέλα και τις δυναμικές απαιτήσεις δεδομένων.

3) Απλοποιημένη διαχείριση συσκευών και καινοτόμος πειραματισμός:

Ένα από τα υποτιμημένα πλεονεκτήματα του SDN είναι η συγκέντρωση στη διαμόρφωση της συσκευής και την αντιμετώπιση προβλημάτων. Με την απομάκρυνση από ένα κατακερματισμένο μοντέλο για συγκεκριμένες συσκευές σε ένα κεντρικό μοντέλο, το SDN είναι ένα σημαντικό βήμα προς την υλοποίηση ενός προσαρμοστικού, δυναμικού δικτύου που ανταποκρίνεται

γρήγορα στις μεταβαλλόμενες ανάγκες. Είναι σημαντικό ότι αυτή η συγκέντρωση είναι ένας αγωγός για καινοτομία. Η αρχιτεκτονική του SDN διαχωρίζει φυσικά τις ροές παραγωγής από τις πειραματικές, ενισχύοντας ένα περιβάλλον όπου νέα πρωτόκολλα δικτύωσης και ιδέες μπορούν να δοκιμαστούν χωρίς να διακινδυνεύσουν τις κύριες λειτουργίες .

Από ολιστική άποψη, το SDN πρωτοπορεί σε μια νέα εποχή δικτύωσης όπου ο έλεγχος της δρομολόγησης πακέτων είναι σαφώς αποσυνδεδεμένος από τους περιορισμούς υλικού της μεταγωγής. Ο συνδυασμός των αρχών του SDN με εκείνες των Ethernet προαναγγέλλει την αυγή ενός δικτύου που είναι πραγματικά έξυπνο, προσαρμοστικό και έτοιμο για το μέλλον.



Εικόνα 3Η έννοια της εικονικοποίησης δικτύου[7]

2.4 Βασικά εργαλεία προσομοίωσης /εξομοίωσης

Η εξέλιξη του SDN εγκαινίασε μια νέα εποχή διαχείρισης και σχεδίασης δικτύου. Δεδομένης της αλλαγής προς τον κεντρικό έλεγχο και τον προγραμματισμό, είναι επιτακτική ανάγκη για τους ερευνητές και τους μηχανικούς δικτύων να διαθέτουν τα κατάλληλα εργαλεία για να σχεδιάσουν, να πρωτοτυπήσουν και να δοκιμάσουν τις λύσεις SDN τους. Τα εργαλεία προσομοίωσης και εξομοίωσης διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο σε αυτό το πλαίσιο, επιτρέποντας την εξομοίωση πραγματικών σεναρίων χωρίς το εκτεταμένο κόστος που σχετίζεται με τις φυσικές ρυθμίσεις. Αυτή η ενότητα παρέχει μια επισκόπηση ορισμένων βασικών εργαλείων προσομοίωσης και εξομοίωσης SDN.

1. Mininet

Το Mininet είναι ένας εξομοιωτής δικτύου , ή ίσως πιο συγκεκριμένα ένα σύστημα ενορχήστρωσης εξομοίωσης δικτύου . Εκτελεί μια συλλογή από hosts, switches, routers, και links σε έναν πυρήνα Linux. Χρησιμοποιεί ελαφριά εικονικοποίηση για να κάνει ένα ενιαίο σύστημα να μοιάζει με ένα πλήρες δίκτυο, που εκτελεί τον ίδιο πυρήνα, σύστημα και κώδικα χρήστη.

2.NS-3

Το NS-3 είναι ένας προσομοιωτής δικτύου discrete-event για συστήματα Διαδικτύου, που προορίζεται κυρίως για ερευνητική και εκπαιδευτική χρήση. Το NS-3 είναι ελεύθερο λογισμικό, με άδεια χρήσης βάσει της άδειας GNU GPLv2 και είναι δημόσια διαθέσιμο για έρευνα, ανάπτυξη και χρήση.

3.EstiNet

Ένα υβριδικό εργαλείο, το EstiNet προσφέρει δυνατότητες προσομοίωσης και εξομοίωσης. Αυτό που το ξεχωρίζει είναι η μεθοδολογία του που επιτρέπει σε πραγματικές εφαρμογές να λειτουργούν στο προσομοιωμένο δίκτυό του.

4. CloudSimSDN

Το CloudSimSDN γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ του cloudcomputing και του SDN. Ενώ το Mininet κλίνει σε μεγάλο βαθμό προς τους πόρους δικτύου, το CloudSimSDN εξυπηρετεί τόσο τους υπολογιστικούς όσο και τους πόρους δικτύου, επιτρέποντας την προσομοίωση κέντρων δεδομένων cloud με δυνατότητα SDN. Το GUI του απλοποιεί τις διαμορφώσεις προσομοίωσης, διασφαλίζοντας φιλικότητα προς τον χρήστη.

5. Omnet++

Το OMNeT++ είναι ένας προσομοιωτής χωρίς μοντέλα για πρωτόκολλα δικτύου όπως IP ή HTTP . Τα κύρια μοντέλα προσομοίωσης δικτύου υπολογιστών είναι διαθέσιμα σε διάφορα εξωτερικά πλαίσια. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το INET που προσφέρει μια ποικιλία μοντέλων για όλα τα είδη πρωτοκόλλων δικτύου και τεχνολογιών όπως για IPv6 , BGP . Το

INET προσφέρει επίσης ένα σύνολο μοντέλων κινητικότητας για την προσομοίωση της κίνησης του κόμβου στις προσομοιώσεις.

Η σειρά εργαλείων προσομοίωσης και εξομοίωσης SDN επιδεικνύει την ποικιλομορφία και την προσαρμοστικότητα της σύγχρονης έρευνας δικτύων. Κάθε εργαλείο, από το Mininet έως το CloudSimSDN, εξυπηρετεί έναν μοναδικό σκοπό και παρέχει διαφορετικές δυνατότητες. Η επιλογή του σωστού εργαλείου εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις ενός έργου, διασφαλίζοντας βέλτιστα αποτελέσματα και δυνατότητα εφαρμογής στον πραγματικό κόσμο.

2.5 Επισκόπηση των σχετικών εργασιών

Τα εργαλεία προσομοίωσης/εξομοίωσης προσφέρουν ένα περιβάλλοντος sandbox στους ερευνητές, βοηθώντας τους να κατανοήσουν τις αποχρώσεις, τα δυνατά σημεία και τους περιορισμούς των SDN χωρίς να εμβαθύνουν σε πραγματικές υλοποιήσεις. Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να αναφέρει εργασίες που έχουν γίνει για την σύγκριση αυτών των εργαλείων και παρέχει πληροφορίες για τα ευρήματά τους.

Οι Zavrakc.a.[8], διαχώρισαν διάφορα εργαλεία, σταθμίζοντάς τα με διάφορα χαρακτηριστικά όπως η λειτουργία testbed, η προσέγγιση εξομοίωσης και η επεκτασιμότητα. Βρήκαν το Mininet ως ιδανική λύση για δίκτυα μεσαίας κλίμακας, επιτυγχάνοντας μια ισορροπία μεταξύ λειτουργικότητας και πολυπλοκότητας. Μια σημαντική αποκάλυψη από τη μελέτη τους ήταν η περιορισμένη ικανότητα του NS-3, ιδιαίτερα η(τότε) πρόσδεσή του σε μια ξεπερασμένη έκδοση OpenFlow, καθιστώντας το κάπως ξεπερασμένο για τα πιο πρόσφατα σενάρια SDN. Αντίθετα, η Estinet εμφανίστηκε με την ευελιξία της, ικανή να μοντελοποιεί τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα δίκτυα, αν και είναι μια εμπορική λύση.

Οι JungminSonk.a.[9]εμβάθυναν στηνπερίπλοκησχέση μεταξύτουcloudcomputingκαιτωνSDNs. Αναγνωρίζοντας τις αυξανόμενες απαιτήσεις των υπηρεσιών cloud και τον κεντρικό ρόλο των SDN στην ικανοποίηση αυτής της ζήτησης, εισήγαγαν το CloudSimSDN. Αυτό το πλαίσιο προσομοίωσης όχι μόνο ενσωμάτωσε έναν προγραμματιζόμενο

ελεγκτή SDN, αλλά επέτρεψε επίσης την αυστηρή δοκιμή αλγορίθμων διαχείρισης VM και προγραμματισμού φόρτου εργασίας. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της έρευνάς τους ήταν η αντιπαράθεση της ακρίβειας του CloudSimSDN με το Mininet, υπογραμμίζοντας την ικανότητά του και την πρόσθετη διάσταση της προσομοίωσης ολόκληρου του λογισμικού cloud.

Οι Wang κ.ά.[\[10\]](#) στην εργασία τους επικεντρώθηκαν στη νέα μεθοδολογία επανεισόδου του πυρήνα του EstiNet3. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει σε controllers OpenFlow να ελέγχουν απρόσκοπτα πολλούς προσομοιωμένους διακόπτες OpenFlow. Όταν το EstiNet συγκρίθηκε με εξομοιωτές όπως το Mininet και το NS-3, παρουσίασε καλύτερη επεκτασιμότητα και ακρίβεια στα παραγόμενα αποτελέσματα επιδόσεων.

Το πεδίο των εργαλείων προσομοίωσης και εξομοίωσης SDN είναι ένα συνδυασμός καινοτομίας, προσαρμοστικότητας και ακρίβειας. Κάθε ερευνητικό κομμάτι, αν και μοναδικό στην προσέγγιση και τα ευρήματά του, συγκλίνει στον κοινό στόχο της προώθησης του SDN σε νέους ορίζοντες. Καθώς ο τομέας του SDN συνεχίζει να εξελίσσεται και να επεκτείνεται, αυτά τα εργαλεία θα διαδραματίσουν αναμφίβολα έναν ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση της πορείας του, διασφαλίζοντας ότι τα δίκτυα του αύριο είναι αποτελεσματικά, επεκτάσιμα και ανθεκτικά.

3 Εργαλεία προσομοίωσης /εξομοίωσης

3.1 Mininet

Το Mininet ξεχωρίζει ως ένα μοναδικό εργαλείο που επιτρέπει την εξομοίωση μεγάλων δικτύων στους περιορισμένους πόρους ενός μόνο υπολογιστή ή εικονικής μηχανής. Αυτός ο εξομοιωτής σχεδιάστηκε κυρίως για την προώθηση της έρευνας στο SDN και στο OpenFlow. Ένα από τα εντυπωσιακά χαρακτηριστικά του Mininet είναι η ικανότητά του να εκτελεί μη τροποποιημένο κώδικα διαδραστικά σε εικονικό υλικό, κάτι που το κάνει να ξεχωρίζει από τους παραδοσιακούς προσομοιωτές.

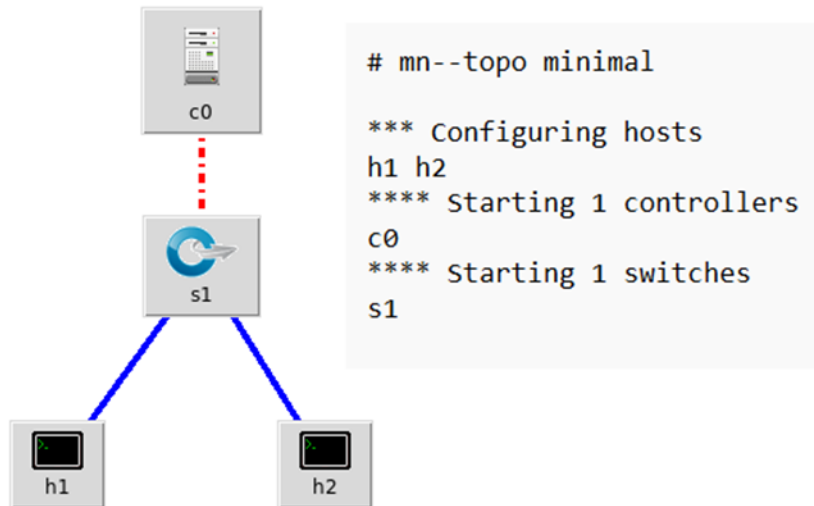
Ενώ τα testbeds προσφέρουν υψηλή απόδοση και ακρίβεια, είναι ακριβά και συχνά μοιράζονται μεταξύ πολλών οντοτήτων. Οι προσομοιωτές, από την άλλη πλευρά, είναι προσιτοί, αλλά μερικές φορές μπορεί να είναι αργοί και μπορεί να απαιτούν τροποποιήσεις κώδικα. Το Mininet γεμίζει το κενό μεταξύ αυτών των δύο, παρέχοντας ευκολία στη χρήση, ακρίβεια και επεκτασιμότητα, όλα αυτά χωρίς να σπάει τα όρια.

Το Mininet επιτρέπει στους χρήστες να μιμούνται δίκτυα SDN πραγματικού κόσμου δια δραστικά. Αυτό το δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα προσφέρει δυνατότητες εξομοίωσης για συσκευές OpenFlow και ελεγκτές SDN[11]. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ το Mininet μπορεί να προσομοιώσει δίκτυα SDN, έχει επίσης τη δυνατότητα να εκτελέσει έναν ελεγκτή SDN για διάφορα πειράματα. Το πακέτο του Mininet περιλαμβάνει αρκετούς ελεγκτές SDN, αλλά για προηγμένες υλοποιήσεις, συχνά χρησιμοποιείται ο ελεγκτής POX.

3.1.1 Τοπολογίες

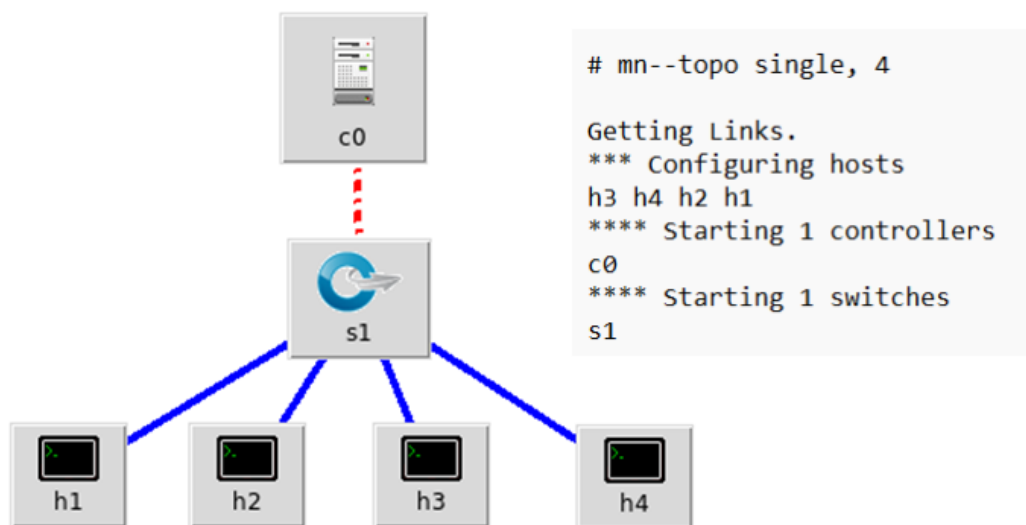
Οι τοπολογίες στη δικτύωση αναφέρονται στη διάταξη διαφορετικών στοιχείων δικτύου. Το Mininet παρέχει έτοιμες πολλές προεπιλεγμένες τοπολογίες, όπως:

Ελάχιστη Τοπολογία: Η απλούστερη μορφή, που αποτελείται από έναν ενιαίο διακόπτη OpenFlow συνδεδεμένο σε δύο κεντρικούς υπολογιστές.



Εικόνα 4 MinimalTopology

SingleTopology: Μια βασική τοπολογία που διαθέτει έναν διακόπτη OpenFlow συνδεδεμένο με τον αριθμό "k" των κεντρικών υπολογιστών.

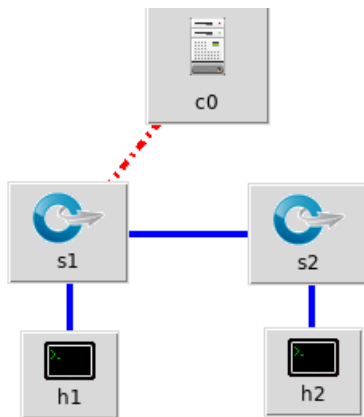


Εικόνα 5 SingleTopology

Αντεστραμμένη Τοπολογία: Παρόμοια με την ενιαία τοπολογία, αλλά η σειρά των συνδέσεων αντιστρέφεται.

```
# mn--toporeversed, 2
```

Γραμμική Τοπολογία: Περιλαμβάνει διακόπτες 'k' και κεντρικούς υπολογιστές 'c', με συνδέσεις μεταξύ των διακοπών και κάθε μεταγωγέα συνδεδεμένο σε έναν κεντρικό υπολογιστή.

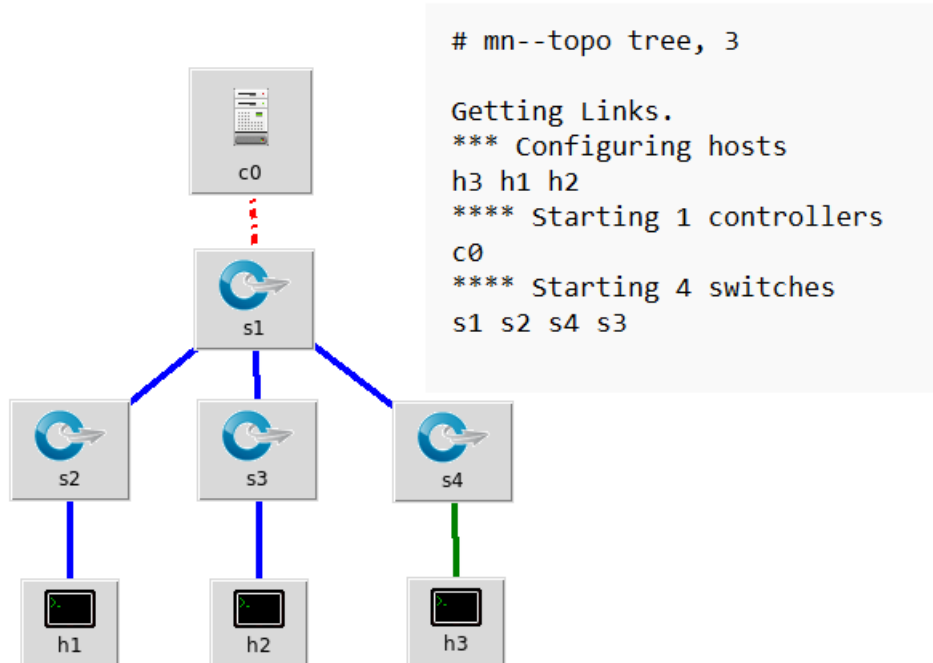


```
#sudo mn --topo linear,2  
  
Getting Links.  
*** Configuring hosts  
h2 h1  
**** Starting 1 controllers  
c0  
**** Starting 2 switches  
s2 s1
```

Εικόνα 6LinearTopology

Σε αυτή την εντολή, η flag `--topo` καθορίζει τον τύπο της τοπολογίας (γραμμική, σε αυτή την περίπτωση) και η τιμή 2 υποδεικνύει τον αριθμό των switches στην τοπολογία.

Τοπολογία δέντρου: Αποτελείται από επίπεδα «k» και δύο κεντρικοί υπολογιστές συνδέονται σε κάθε διακόπτη.



Εικόνα 7TreeTopology

Πέρα από αυτά, το Mininet επιτρέπει τη δημιουργία προσαρμοσμένων τοπολογιών. Οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν τις δικές τους μοναδικές διατάξεις με τις επιθυμητές συνδέσεις γράφοντας λίγο κώδικα Python.

Μια από τις αξιοσημείωτες πτυχές της χρησιμότητας του Mininet είναι η συνοπτική σύνταξη για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του δικτύου κατά τη δημιουργία τοπολογίας. Για παράδειγμα, η προσθήκη καθυστέρησης στις συνδέσεις ή ο καθορισμός προσαρμοσμένων διευθύνσεων IP για τους hosts μπορεί να γίνει μέσω πρόσθετων ορίων της γραμμής εντολών. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στους ερευνητές να δημιουργούν γρήγορα πρωτότυπα διαφορετικά σενάρια.

3.1.2 Κατανάλωση πόρων

Η εξομίωση SDN στο Mininet δεν είναι μόνο θέμα λειτουργικότητας δικτύου, αλλά συνεπάγεται και διαχείριση πόρων. Μια αποτελεσματική ανάλυση της κατανάλωσης πόρων είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο λειτουργεί αξιόπιστα και παρέχει έγκυρα δεδομένα για σκοπούς έρευνας και ανάπτυξης.

Χρήση CPU: Η ακριβής μέτρηση της χρήσης της CPU είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της απόδοσης των προσομοιώσεων SDN στο Mininet. Αντικατοπτρίζει το φορτίο επεξεργασίας που απαιτείται για τη διαχείριση στοιχείων δικτύου και την εκτέλεση αλγορίθμων ελέγχου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα εργαλεία για την παρακολούθηση και την ανάλυση της χρήσης της CPU:

➤ Η εντολή `top` : Αυτό το κλασικό εργαλείο παρέχει μια προβολή σε πραγματικό χρόνο ενός συστήματος που λειτουργεί. Μπορεί να εμφανίζει πληροφορίες περίληψης συστήματος καθώς και μια λίστα εργασιών που διαχειρίζεται ο πυρήνας. Για παράδειγμα, `top -n 1 | grep mininet` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φιλτράρει και να εμφανίζει τη χρήση της CPU για διεργασίες που σχετίζονται με το Mininet.

➤ Η εντολή `htop`: Ένα διαδραστικό πρόγραμμα προβολής διεργασιών, το `htop` είναι μια πιο φιλική προς το χρήστη εναλλακτική λύση που προσφέρει περισσότερες επιλογές διαμόρφωσης και εμφανίζει σχετικές λεπτομέρειες, όπως τη χρήση κάθε πυρήνα CPU. Μια εντολή όπως το `htop -u mininet` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εμφάνιση μόνο των διεργασιών που εκτελούνται από τον χρήστη Mininet.

➤ Η εντολή `mpstat`: Μέρος του πακέτου `sysstat`, το `mpstat` έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αναφορά στατιστικών στοιχείων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της χρήσης της CPU με πιο λεπτομερή τρόπο.

➤ Η εντολή `vmstat`: Αυτό το εργαλείο παρακολούθησης συστήματος αναφέρει πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες, τη μνήμη και τη δραστηριότητα της CPU, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της απόδοσης του συστήματος. Η εντολή `vmstat` δίνει ένα στιγμιότυπο της χρήσης πόρων του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών CPU, μνήμης, εισόδου/εξόδου δίσκου και διεργασιών συστήματος. Για παράδειγμα, το `vmstat 1 10` εμφανίζει στατιστικά του συστήματος κάθε δευτερόλεπτο για 10 δευτερόλεπτα. Όταν εκτελείται κατά τη διάρκεια ενός σεναρίου δημιουργίας κίνησης, όπως μια δοκιμή "iperf", μπορεί να απεικονίσει πώς η

κατανάλωση πόρων αλλάζει με την πάροδο του χρόνου ως απόκριση στο φόρτο του δικτύου.

Χρήση μνήμης: Η χρήση μνήμης σε προσομοιώσεις δικτύου είναι μια κρίσιμη μέτρηση που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την πιστότητα και την απόδοση του περιβάλλοντος εξομοίωσης. Στο πλαίσιο του Mininet, το οποίο αξιοποιεί τον πυρήνα του κεντρικού υπολογιστή για να δημιουργήσει μια ρεαλιστική και επεκτάσιμη εξομοίωση δικτύου, η αποτελεσματική διαχείριση μνήμης είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της απόδοσης και την αποφυγή εξάντλησης πόρων.

➤ Η εντολή `free`: Αυτή η εντολή αναφέρει τη συνολική ποσότητα ελεύθερης και χρησιμοποιημένης φυσικής και κοινόχρηστης μνήμης στο σύστημα, καθώς και τις προσωρινές μνήμες και τις κρυφές μνήμες που χρησιμοποιούνται από τον πυρήνα. Η εντολή `free -m` εξάγει πληροφορίες μνήμης σε megabyte. Η γραμμή που ξεκινά με "Mem:" παρέχει συνολική μνήμη, χρησιμοποιημένη μνήμη, ελεύθερη μνήμη, κοινόχρηστη μνήμη, buffer/cache και διαθέσιμη μνήμη. Η παρακολούθηση της "διαθέσιμης" μνήμης είναι ζωτικής σημασίας, καθώς υποδεικνύει πόση μνήμη είναι άμεσα διαθέσιμη για το Mininet για να ξεκινήσει νέες προσομοιώσεις χωρίς εναλλαγή.

Χρόνος μετάδοσης: Ο χρόνος μετάδοσης είναι ένα σημαντικό μέτρο απόδοσης στις προσομοιώσεις δικτύου, που αντιπροσωπεύει τη διάρκεια που απαιτείται για την αποστολή ενός μηνύματος από μια πηγή σε έναν προορισμό. Στο Mininet, ο ακριβής υπολογισμός του χρόνου μετάδοσης είναι σημαντικός για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της ροής δεδομένων μέσω του δικτύου και για την επικύρωση των χαρακτηριστικών απόδοσης του σχεδιασμού του δικτύου.

➤ Η εντολή `ping`: Ένα εργαλείο για τη μέτρηση του χρόνου μετ' επιστροφής (RTT) στις επικοινωνίες δικτύου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσέγγιση για το χρόνο μετάδοσης όταν μειωθεί στο μισό. Για παράδειγμα, για να στείλουμε τέσσερα αιτήματα `echo` με μέγεθος πακέτου 200 byte και

διάστημα 0,2 δευτερολέπτων, χρησιμοποιούμε το "ping<host IP> -c 4 -i 0.2 -s 200".

➤ Απευθείας μέτρηση: Για απλές μεταφορές, ο χρόνος μετάδοσης μπορεί να μετρηθεί απευθείας χρονομετρώντας τη μεταφορά δεδομένων και υπολογίζοντας τον απαιτούμενο χρόνο από την αρχή μέχρι το τέλος.

Εργαλεία ανάλυσης κίνησης: Εργαλεία όπως το Wireshark ή το tcpdump μπορούν να συλλάβουν πακέτα και να αναλύσουν χρονικές σημάνσεις για να υπολογίσουν την ακριβή ώρα που ένα πακέτο αφήνει μια πηγή και τότε αναγνωρίζεται από τον προορισμό[12].

3.1.3 Traffic generator

Η ακριβής προσομοίωση δικτυακής κίνησης είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς δικτυακών συστημάτων. Το Mininet προσφέρει ένα περιβάλλον εξομοίωσης που επιτρέπει την προσομοίωση ποικίλης κίνησης με τη χρήση διαφόρων εργαλείων και τεχνικών[13].

3.1.3.1 Εργαλεία δημιουργίας traffic

- **iperf/iperf3:** Το iperf και η πιο πρόσφατη έκδοσή του, iperf3, είναι εργαλεία γραμμής εντολών που δημιουργούν κίνηση TCP και UDP για τη μέτρηση του εύρους ζώνης. Το iperf3 προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες και συχνά χρησιμοποιείται για πιο σύνθετες δοκιμές κίνησης.

- **h1.cmd('iperf -s &')** για δημιουργία TCP server.

- **h1.cmd('iperf -s -u &')** για δημιουργία UDP server.

- **ping:** Χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση της προσβασιμότητας των κόμβων και τη μέτρηση του RTT, παρέχοντας δείκτες για την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων.

- **h2.cmd('ping ' + h1.IP() + ' -c 4 -i 0.2 -s 120 &')**

- **D-ITG (Distributed Internet TrafficGenerator):** Το D-ITG είναι ένα προηγμένο εργαλείο που παράγει ροές κίνησης μιμούμενο διάφορα πρωτόκολλα και μοτίβα επιπέδου εφαρμογής. Επιτρέπει τη δημιουργία

λεπτομερούς ανάλυσης της απόδοσης δικτύου, καθιστώντας το ιδανικό για περίπλοκες δοκιμές κίνησης[14].

- Παράδειγμα TCP: **h2.cmd('ITGSend -T TCP -a ' + h1.IP() + ' -rp 10001 -c 1000 -C 100 -t 20000 &')**
- Παράδειγμα UDP: **h2.cmd('ITGSend -T UDP -a ' + h1.IP() + ' -rp 10001 -c 160 -C 20 -t 60000 &')**

Κάθε εργαλείο προσφέρει μοναδικές δυνατότητες για την προσομοίωση διαφόρων δικτυακών συνθηκών, από απλές δοκιμές εύρους ζώνης μέχρι πολύπλοκες συνθήκες που περιλαμβάνουν την προσομοίωση επιθέσεων και την αξιολόγηση των μηχανισμών ασφαλείας του δικτύου.

3.1.3.2 Packets / flows

Ο βαθμός λεπτομέρειας του traffic στις προσομοιώσεις δικτύου μπορεί να απεικονιστεί με όρους πακέτων και ροών. Ένα πακέτο είναι η μικρότερη μονάδα δεδομένων που μεταδίδεται μέσω ενός δικτύου. Δεν περιέχει μόνο το ωφέλιμο φορτίο (δεδομένα χρήστη) αλλά και τις απαραίτητες πληροφορίες κεφαλίδας που του επιτρέπουν να φτάσει στον προορισμό του.

Η δημιουργία μεμονωμένων πακέτων μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας hping3 μέσα στο Mininet, όπου μπορούμε να καθορίσουμε την ακριβή δομή του πακέτου και τη συμπεριφορά μετάδοσης.

```
h2.cmd('hping3 -c 1 -S ' + h1.IP() + ' -p 80 &')
```

```
# Πλήθος '-c', σημαία SYN '-S', IP προορισμού, θύρα '-p'
```

Μια ροή αντιπροσωπεύει μια ακολουθία πακέτων που μοιράζονται κοινές πληροφορίες κεφαλίδας, όπως η διεύθυνση πηγής/προορισμού, και συχνά θεωρείται ως μια μεμονωμένη συνομιλία ή περίοδος λειτουργίας στο δίκτυο. Οι ροές δημιουργούνται συνήθως χρησιμοποιώντας εργαλεία όπως το iperf, τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν συνεχείς ροές δεδομένων που μοιάζουν με ροές δικτύου πραγματικού κόσμου.

```
h2.cmd('iperf -c ' + h1.IP() + ' -t 60 &')
```

```
# client '-c', IP προορισμού, χρόνος '-t' σε δευτερόλεπτα
```

3.1.3.3 *Single /multipleflows*

Η κατανόηση της διάκρισης μεταξύ μεμονωμένων και πολλαπλών ροών είναι βασική για το σχεδιασμό πειραμάτων δικτύου για διάφορους στόχους.

Ιδανικά για δοκιμή συγκεκριμένων συνδέσμων ή συσκευών εντός του δικτύου οι μεμονωμένες ροές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της απόδοσης μιας διαδρομής ή του αντίκτυπου μιας πολιτικής δικτύου σε έναν συγκεκριμένο τύπο κίνησης.

Η δημιουργία μιας ενιαίας ροής μπορεί να γίνει με μια απλή δοκιμή iperf:

```
h2.cmd('iperf -c ' + h1.IP() + ' -t 30 &')
```

Οι πολλαπλές ροές χρησιμοποιούνται για την εξομοίωση ρεαλιστικών περιβαλλόντων δικτύου όπου πολλές μεταφορές δεδομένων πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, αντανακλώντας την ανταγωνιστική φύση της κίνησης δικτύου και την πολυπλοκότητα της διαχείρισης του δικτύου. Η δημιουργία πολλαπλών ροών ταυτόχρονα μπορεί να επιτευχθεί ξεκινώντας πολλές περιόδους λειτουργίας iperf σε διαφορετικές θύρες ή χρησιμοποιώντας σενάρια για την έναρξη πολλαπλών περιόδων σύνδεσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

For in range(5): # Παράδειγμα για 5 ταυτόχρονες ροές

```
h2.cmd('iperf -c ' + h1.IP() + ' -t 30 -p ' + str(5001 + i) + ' &')
```

Η απόφαση για τη δημιουργία πακέτων ή ροών —και εάν θα δημιουργηθούν μεμονωμένες ή πολλαπλές ροές— εξαρτάται από το συγκεκριμένο ερευνητικό ερώτημα. Τα πακέτα επιτρέπουν την ανάλυση μικροεπιπέδου της συμπεριφοράς του δικτύου, ενώ οι ροές επιτρέπουν τη μελέτη συνεχών μεταφορών δεδομένων. Οι μεμονωμένες ροές παρέχουν σαφήνεια στη μέτρηση των χαρακτηριστικών μεμονωμένων paths, ενώ οι πολλαπλές ροές προσφέρουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του δικτύου υπό φορτίο, τη διαμάχη πόρων και την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας.

3.1.4 *Χρήση εξωτερικών εργαλείων στο Mininet*

Εξωτερικά εργαλεία όπως το iperf, το ping και το D-ITG διαδραματίζουν απαραίτητο ρόλο στη δημιουργία κίνησης και στην αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου. Η επιλογή αυτών των εργαλείων εξαρτάται από τη συγκεκριμένη πτυχή του δικτύου που δοκιμάζεται και τον τύπο της κίνησης που απαιτείται

για τη διεξαγωγή του πειράματος. Ο Πίνακας 3-1 περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις αυτών των εργαλείων:

Table3-1 Πίνακας σύγκρισης για εργαλεία δημιουργίας κυκλοφορίας[11][13][14][15]

Δυνατότητα/ Εργαλείο	iperf/iperf3	ping	D-ITG	Wireshark
Υποστήριξη πρωτοκόλλου	TCP, UDP	ICMP	TCP,UDP, ICMP κ.α.	TCP,UDP, ICMP κ.α.
Τύπος traffic	Επίπεδο ροής (ροές TCP και UDP)	Επίπεδο πακέτου (EchoICMP)	Ροή και επίπεδο πακέτου (προσαρμόσιμο)	Πακέτο επιπέδου με λεπτομερή πληροφορία
Χρήση	Bandwidth, throughput	Latencyκαι απώλεια	Εξομοίωση μοτίβων traffic για εφαρμογές	Διάγνωση, ανάλυση προβλημάτων, εκπαίδευση
Πολυπλοκότητα	Χαμηλή έως Μέτρια	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια έως Υψηλή
Μετρικές εξόδου	Εύρος ζώνης, Jitter, Απώλεια (UDP)	RTT, Απώλεια	Εύρος ζώνης απώλεια πακέτων, Καθυστέρηση, Jitter	Πληροφορίες πρωτοκόλλου, στατιστικά πακέτων και ροών

Πέρα από αυτά τα εργαλεία τοMininet επεκτείνεται στη συμβατότητά του και με μια σειρά εξωτερικών εργαλείων που παρέχουν λεπτομερείς δυνατότητες ανάλυσης και παρακολούθησης δικτύου. Εργαλεία όπως το Wireshark/tshark και το tcpdump είναι καθοριστικής σημασίας για τη σύλληψη και την ανάλυση πακέτων, προσφέροντας μια λεπτομερή εικόνα των ροών κυκλοφορίας εντός του δικτύου.

Το Wireshark, με τη γραφική του διεπαφή και το tshark, η έκδοση του οποίου βασίζεται σε τερματικό, παρέχουν οπτικές και στατιστικές πληροφορίες σχετικά με τους τύπους κυκλοφορίας και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, ενισχύοντας τη δυνατότητα διάγνωσης και εντοπισμού σφαλμάτων του δικτύου. Το Tcpdump χρησιμεύει ως βασικός αναλυτής πακέτων γραμμής εντολών, ο οποίος ευνοείται για την απλότητα και την αποτελεσματικότητά του στην καταγραφή των επικοινωνιών δικτύου, καθιστώντας τον ανεκτίμητο για ανάλυση πρωτοκόλλου και εντοπισμό σφαλμάτων.

Επιπλέον, το bwm-ng (BandwidthMonitorNextGeneration) συμπληρώνει αυτά τα εργαλεία παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με το φόρτο του δικτύου, παρέχοντας μια δυναμική εικόνα της χρήσης εύρους ζώνης σε όλο το δίκτυο. Η ελαφριά έκδοση του και το liveoutput το καθιστούν εξαιρετική επιλογή για την παρακολούθηση του αντίκτυπου της παραγόμενης κίνησης στο bandwidth του δικτύου.

Η ενσωμάτωση αυτών των εργαλείων ανάλυσης και παρακολούθησης μαζί με traffic generators όπως το iperf, το ping και το D-ITG παρέχει μια ολοκληρωμένη εργαλειοθήκη για τους ερευνητές δικτύων, διευκολύνοντας μια ολιστική προσέγγιση για την εξομοίωση και τη δοκιμή δικτύου στο Mininet. Αυτή η σουίτα εργαλείων επιτρέπει όχι μόνο τη δημιουργία αλλά και τη σχολαστική ανάλυση της κίνησης του δικτύου, διασφαλίζοντας μια ενδεδειγμένη αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου κάτω από ένα ευρύ φάσμα συνθηκών.

3.1.5 Usability/learningcurve

Το Mininet είναι ένα καινοτόμο εργαλείο για τη δημιουργία SDN εικονικών δικτύων. Προσφέρει μια ευέλικτη πλατφόρμα για τους χρήστες να αναπτύξουν, να δοκιμάσουν και να μοιραστούν διαμορφώσεις δικτύου και συστήματα SDN. Η φιλική προς τον χρήστη προσέγγιση ενσωματώνεται από το MininetCLI και API, τα οποία διευκολύνουν την αλληλεπίδραση με το δίκτυο, την προσαρμογή και την ανάπτυξη.

Το Mininet ενσωματώνεται μέσω VM, τα οποία περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα εργαλεία. Η επιλογή έναρξης με εγκατάσταση VM συνιστάται για την απλότητα και την αξιοπιστία της. Για χρήστες που είναι νέοι σε εικονικά δίκτυα ή SDN, αυτή η μέθοδος μειώνει την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης, επιτρέποντάς τους να επικεντρωθούν στην εκμάθηση του ίδιου του εργαλείου και όχι στις περιπλοκές της εγκατάστασης.

Οι νέοι χρήστες καθοδηγούνται σε μια δομημένη διαδρομή μάθησης που ξεκινά με τις σημειώσεις εγκατάστασης VM, προχωρά στην πορεία του Mininet και καταλήγει στην εισαγωγή στο PythonAPI του Mininet[11]. Αυτή η δομημένη προσέγγιση έχει σχεδιαστεί για να εξοικειώνει τους χρήστες με

βασικές εντολές και τυπικά σενάρια χρήσης. Πρόσθετοι πόροι όπως το MininetFAQ, η τεκμηρίωση και το σεμινάριο OpenFlow υποστηρίζουν τη διαδικασία εκμάθησης, παρέχοντας ολοκληρωμένη καθοδήγηση για χρήστες σε διαφορετικά επίπεδα δεξιοτήτων.

Το Mininet διαθέτει επίσης μια υποστηρικτική κοινότητα που είναι προσβάσιμη μέσω της λίστας αλληλογραφίας mininet-discussion. Αυτή η κοινότητα είναι μια πολύτιμη πηγή για την αντιμετώπιση προβλημάτων, την ανταλλαγή ιδεών και τη μάθηση από τις συλλογικές εμπειρίες άλλων. Η ανοιχτή πρόσκληση για συνεισφορά στο έργο Mininet μέσω κώδικα, αναφορών σφαλμάτων, επιδιορθώσεων και τεκμηρίωσης ενισχύει περαιτέρω τη μαθησιακή εμπειρία ενθαρρύνοντας την ενεργό συμμετοχή.

Η συμβατότητα του Mininet με πολλές εκδόσεις της Python αντανακλά τη δέσμευσή του για προσβασιμότητα και ευκολία χρήσης. Οι λεπτομερείς οδηγίες για την αναβάθμιση μιας υπάρχουσας εγκατάστασης Mininet απευθύνονται σε χρήστες με διαφορετικούς βαθμούς τεχνογνωσίας και στοχεύουν να διασφαλίσουν ότι το Mininet παραμένει ένα συμβατό εργαλείο που εξελίσσεται με τις ανάγκες των χρηστών του.

Το MininetAPI επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν προσαρμοσμένα περιβάλλοντα δικτύου με λίγες γραμμές κώδικα Python, επιτρέποντας τη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων και πειραματισμό. Η ικανότητα γρήγορης δημιουργίας, αλληλεπίδρασης και προσαρμογής ενός δικτύου υπογραμμίζει τη χρηστικότητα του Mininet σε ένα πλαίσιο έρευνας και ανάπτυξης.

Η χρηστικότητα και η καμπύλη εκμάθησης του Mininet αντικατοπτρίζουν τη σχεδιαστική του φιλοσοφία: να παρέχει μια πρακτική, αποτελεσματική και φιλική προς τον χρήστη πλατφόρμα για ανάπτυξη και έρευνα SDN. Η εκτεταμένη τεκμηρίωση, η υποστηρικτική κοινότητα και οι δομημένοι πόροι εκμάθησης του εργαλείου συμβάλλουν σε μια θετική εμπειρία χρήστη που εκτείνεται από την εισαγωγική μάθηση έως τον προηγμένο σχεδιασμό και ανάπτυξη δικτύου.

3.1.6 Documentation

Η τεκμηρίωση χρησιμεύει ως ο χάρτης για την πλοήγηση σε πολύπλοκα εργαλεία λογισμικού. Για το Mininet η ολοκληρωμένη τεκμηρίωση είναι σημαντική ώστε οι χρήστες να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους. Η τεκμηρίωση Mininet, με την εκτεταμένη γκάμα πόρων της, είναι προσαρμοσμένη για να βοηθά τους χρήστες σε όλα τα στάδια , από την αρχή έως τα προηγμένα πειράματα δικτύου.

Η τεκμηρίωση Mininet έχει επιμεληθεί για να χρησιμεύσει ως ένα εκτενές αποθετήριο γνώσης με περισσότερες από 134 αναθεωρήσεις, υποδεικνύοντας ένα ιστορικό ενεργών ενημερώσεων και βελτιώσεων.[\[11\]](#) Αυτό αντικατοπτρίζει τη δέσμευση για την εξέλιξη του εργαλείου παράλληλα με τις ανάγκες των χρηστών του και τις εξελίξεις του τομέα δικτύωσης.

Έχει σχεδιαστεί για να είναι φιλική προς το χρήστη και εύκολα πλοηγήσιμη, προωθώντας μια εύκολη μαθησιακή εμπειρία. Δίνει έμφαση στη συμμετοχή της κοινότητας, με ένα επεξεργάσιμο wiki και ένα FAQ που οι χρήστες ενθαρρύνονται να βελτιώσουν. Αυτή η συλλογική προσέγγιση διασφαλίζει ότι η τεκμηρίωση παραμένει σχετική και εμπλουτισμένη με ποικίλες εμπειρίες και λύσεις χρηστών. Επίσης κατευθύνει τους χρήστες στη λίστα αλληλογραφίας Mininet για υποστήριξη, επισημαίνοντας την ενεργή και υποστηρικτική κοινότητα Mininet.

Το Documentation του Mininet επισημαίνει επίσης εξωτερικούς πόρους, όπως διαδικτυακά μαθήματα και βιβλία, διευρύνοντας το πεδίο για τους χρήστες να αποκτήσουν γνώσεις σε σχετικούς τομείς όπως το SDN και την εξομοίωση δικτύου με Mininet.

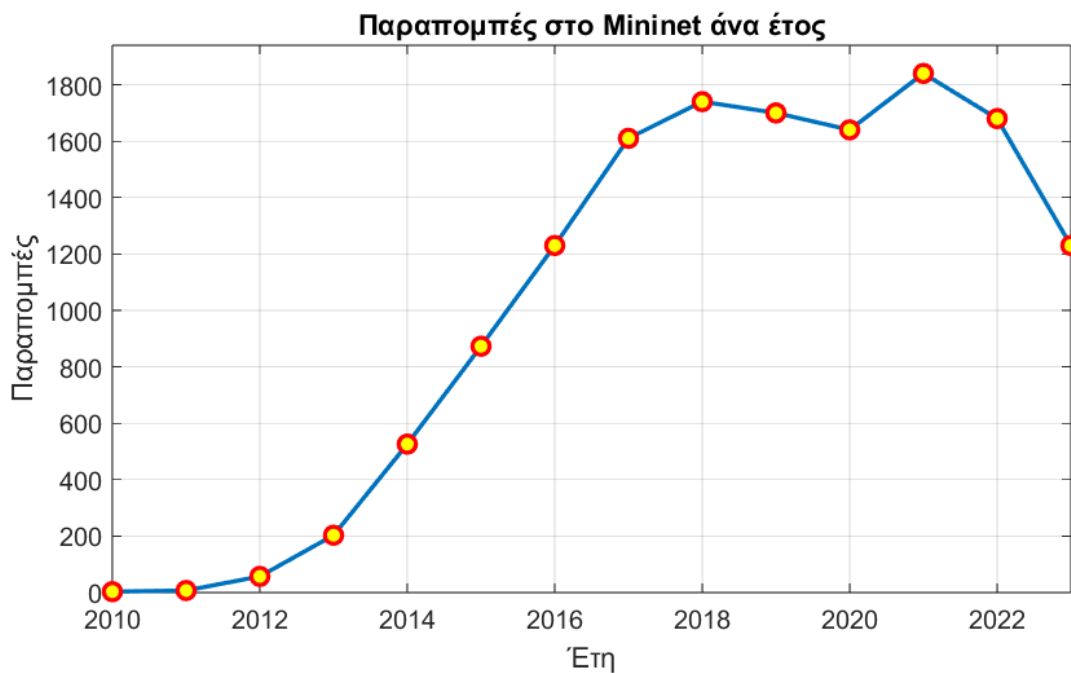
Το συμπέρασμα είναι ότι η στιβαρότητα της τεκμηρίωσης του Mininet ενισχύει άμεσα τη χρηστικότητα του εργαλείου και μετριάζει την καμπύλη εκμάθησης. Από λεπτομερείς οδηγούς εγκατάστασης έως ολοκληρωμένες αναφορές API, η τεκμηρίωση λειτουργεί τόσο ως εγχειρίδιο για μαθητές όσο και ως εγχειρίδιο αναφοράς για προχωρημένους χρήστες. Η συμπερίληψη Συχνών Ερωτήσεων, παραδειγμάτων σεναρίων και περιηγήσεων επιτρέπει την ομαλή μετάβαση από αρχάριο σε ικανό χρήστη, ενώ η ενεργή συντήρηση

αυτών των πόρων διασφαλίζει ότι οι χρήστες έχουν ενημερωμένες πληροφορίες στη διάθεσή τους. Προάγοντας μια πλατφόρμα ανταλλαγής γνώσης που βασίζεται στην κοινότητα, η τεκμηρίωση του Mininet δεν κάνει απλώς την ενημέρωση — δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να εξερευνήσουν, να πειραματιστούν και να επεκτείνουν τις δυνατότητες του εργαλείου. Αυτή η προσβασιμότητα στις πληροφορίες διευκολύνει τη μάθηση και δίνει τη δυνατότητα σε ένα ευρύτερο φάσμα χρηστών να συνεισφέρουν στον τομέα της έρευνας και της εκπαίδευσης στο δίκτυο. Στην ουσία, η τεκμηρίωση δεν είναι απλώς μια αποθήκη πληροφοριών. Είναι ένα αναπόσπαστο στοιχείο της εμπειρίας Mininet που μειώνει τα εμπόδια εισόδου και επιταχύνει τη διαδικασία από τη μάθηση στη γνώση.

3.1.7 Adoption from academic / research community

Οι Lantz κ.α. στην εργασία τους έθεσαν

ταθεμέλια για την εξεύχουσα θέση του Mininet στην ακαδημαϊκή κοινότητα [16].



Εικόνα 8 Παραπομπές στο Mininet ανά έτος

Δημοσιεύτηκε το 2010 και αυτό το πρωτοποριακό έργο εισήγαγε το Mininet ως ένα εργαλείο ικανό να μιμηθεί μεγάλα δίκτυα σε έναν μόνο φορητό υπολογιστή, αποδεικνύοντας ότι είναι μια βασική πηγή τόσο για ερευνητές όσο και για εκπαιδευτικούς. Οι πρακτικές συνέπειες της εργασίας για την

έρευνα δικτύων SDN αναγνωρίστηκαν αμέσως, όπως αποδείχθηκε από τις αρχικές αναφορές.

Με τα χρόνια, ο αριθμός των επιστημονικών άρθρων που αναφέρονται στο Mininet έχει αυξηθεί σημαντικά. Αυτή η ανοδική τάση συσχετίζεται με το αυξανόμενο ενδιαφέρον για εικονικοποίηση δικτύου και την ανάγκη για προσβάσιμα, κλιμακούμενα ερευνητικά εργαλεία στον ακαδημαϊκό χώρο. Οι αναφορές αντικατοπτρίζουν την ευρεία υιοθέτηση του εργαλείου και την εξάρτηση της ακαδημαϊκής κοινότητας στη λειτουργικότητά του για την ανάπτυξη και τη δοκιμή πρωτοτύπων δικτύου. Η επιρροή του Mininet, όπως απεικονίζεται από αυτές τις αναφορές, υπογραμμίζει την κατάστασή του ως αναπόσπαστο συστατικό της έρευνας και της εκπαίδευσης για τη δικτύωση.

3.2 CloudSimSDN

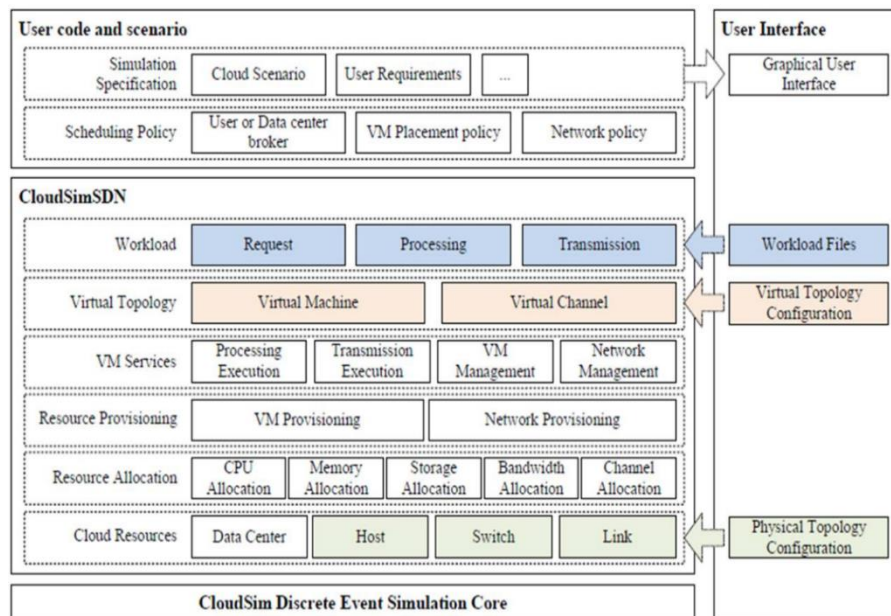
Στον τομέα της προσομοίωσης και εξομοίωσης δικτύου που καθορίζεται από λογισμικό το Mininet έχει καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο, που επιτρέπει τη λεπτομερή μοντελοποίηση των πόρων του δικτύου. Ωστόσο, η εστίαση του Mininet είναι κυρίως στην εξομοίωση δικτύου, χωρίς άμεσες διατάξεις για την προσομοίωση ολοκληρωμένων τεχνικών διαχείρισης πόρων cloud, όπως η κοινή κατανομή πόρων υπολογιστών και δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των στρατηγικών τοποθέτησης VM. Αυτό το κενό είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο σε πολύπλοκα περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ υπολογιστικών και δικτυακών στοιχείων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και της λειτουργικής αποτελεσματικότητας.

Για να γεφυρωθεί αυτό το χάσμα, το CloudSimSDN αναδύεται ως ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης που επεκτείνει τις δυνατότητες του CloudSim. Το CloudSim, ένα ευρέως αναγνωρισμένο πλαίσιο για προσομοίωση cloud, παρέχει το θεμελιώδες περιβάλλον για τη μοντελοποίηση υπολογιστικών στοιχείων του κέντρου δεδομένων και έχει συζητηθεί εν συντομία στο πλαίσιο των clouds όπου οι πόροι διαχειρίζονται δυναμικά μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή. Με βάση τα δυνατά σημεία του CloudSim, το CloudSimSDN εισάγει

προσομοίωση κίνησης δικτύου και συμπεριφορές ελεγκτών SDN στο μείγμα, επιτρέποντας μια ολιστική προσομοίωση κέντρων δεδομένων cloud με δυνατότητα SDN[17].

Η αρχιτεκτονική του CloudSimSDN έχει δημιουργηθεί σχολαστικά για να επιτρέπει την αξιολόγηση των πολιτικών διαχείρισης πόρων που καλύπτουν τόσο υπολογιστικούς πόρους όσο και πόρους δικτύου. Με την προσομοίωση ολόκληρου του οικοσυστήματος των κέντρων δεδομένων cloud, συμπεριλαμβανομένων φυσικών μηχανών, μεταγωγέων, συνδέσεων δικτύου και εικονικών τοπολογιών, το CloudSimSDN παρέχει ένα sandbox για τη δοκιμή των μετρήσεων απόδοσης που είναι κρίσιμες για εγγυήσεις QoS, καθώς και για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας με γνώμονα τη διατήρηση του περιβάλλοντος και μείωση κόστους.

Στην καρδιά της λειτουργικότητας του CloudSimSDN βρίσκεται ο σχεδιασμός του που είναι βασισμένος στον χρήστη. Οι χρήστες αλληλοεπιδρούν με το πλαίσιο εισάγοντας διαμορφώσεις φυσικής και εικονικής τοπολογίας μέσω αρχείων JSON ή κωδίκων προγραμμάτων Java και προδιαγραφών φόρτου εργασίας μέσω αρχείων CSV. Αυτές οι είσοδοι ενσωματώνουν αιτήματα τελικού χρήστη, μεγέθη επεξεργασίας εργασιών και δεδομένα κίνησης, τα οποία οδηγούν τον φόρτο εργασίας της προσομοίωσης. Επιπλέον, το CloudSimSDN προσφέρει ευελιξία στην εφαρμογή της πολιτικής διαχείρισης πόρων, επιτρέποντας στους χρήστες να χρησιμοποιούν ενσωματωμένες πολιτικές ή να αναπτύσσουν προσαρμοσμένες, επεκτείνοντας τις αφηρημένες κλάσεις που παρέχονται από το πλαίσιο.



Εικόνα 9 Αρχιτεκτονική CloudSimSDN[16]

Φυσικές και εικονικές τοπολογίες

Το CloudSimSDN προσφέρει μια προγραμματική προσέγγιση για τον καθορισμό τοπολογιών δικτύου SDN χρησιμοποιώντας αρχεία εισόδου, τα οποία περιγράφουν λεπτομερώς τόσο τις φυσικές όσο και τις εικονικές πτυχές του προσομοιωμένου περιβάλλοντος. Αυτή η μέθοδος, ενώ προηγείται μιας γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI), παρέχει ακρίβεια και ευελιξία στη δημιουργία σεναρίων δικτύου που μοιάζουν πολύ με υποδομές SDN του πραγματικού κόσμου.

Οι χρήστες πρέπει να οριοθετούν τις τοπολογίες δικτύου με αρχεία JSON και CSV. Τα αρχεία JSON χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της φυσικής τοπολογίας, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης των datacenters, καθορίζοντας hosts, switches και links. Αντίθετα, η εικονική τοπολογία περιλαμβάνει τα αιτήματα ανάπτυξης πόρων, με λεπτομέρειες για εικονικές μηχανές (VM) και τις απαιτούμενες προδιαγραφές τους. Αυτή η λεπτομέρεια διασφαλίζει ότι τα σεναρία προσαρμόζονται σχολαστικά ώστε να αντικατοπτρίζουν τις αυθεντικές λειτουργικές ρυθμίσεις.

Φυσική Τοπολογία: Αντιπροσωπεύει τα υλικάστοιχεία υποδομής, όπως κεντρικούς υπολογιστές και διακόπτες, μαζί με τους συνδέσμους διασύνδεσής τους. Είναι η βάση πάνω στην οποία χαρτογραφείται το εικονικό επίπεδο.

Εικονική Τοπολογία: Ενσωματώνει τα εικονικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων των VM και των εικονικών συνδέσεων, με τις περιπλοκές και τις προκλήσεις των εικονικών λειτουργιών δικτύου.

Ο προσομοιωτής CloudSimSDN, είναι κατασκευασμένος πάνω από το κιτ εργαλείων CloudSim, αξιοποιώντας την ικανότητά του στη μοντελοποίηση υπολογιστικών στοιχείων των κέντρων δεδομένων και αξιοποιώντας την εξελιγμένη μηχανή προσομοίωσης. Το CloudSimSDN εμπλουτίζει το CloudSim ενσωματώνοντας στοιχεία που προσομοιώνουν την κυκλοφορία δικτύου και τις συμπεριφορές των ελεγκτών SDN, προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα για προσομοίωση SDN[18].

Οι διαμορφώσεις φυσικής και εικονικής τοπολογίας μπορούν να οριστούν μέσω προγραμματισμού ή μέσω αρχείων JSON. Οι προδιαγραφές του workload, που καθορίζεται αιτήματα του χρήστη, παρέχονται σε μορφή αρχείου CSV. Στο workload καθορίζεται το μέγεθος επεξεργασίας της εργασίας και τα σχετικά δεδομένα κίνησης, υπαγορεύοντας τις απαιτήσεις εισόδου της προσομοίωσης.

Εκτός από αυτές τις διαμορφώσεις, οι χρήστες πρέπει επίσης να παρέχουν πολιτικές που να περιλαμβάνουν αλγόριθμους τοποθέτησης VM και πολιτικές δικτύου. Τέτοιες πολιτικές είναι κρίσιμες για την προσομοίωση της συμπεριφοράς διαχείρισης των τελικών χρηστών ή των λειτουργιών του κέντρου δεδομένων εντός του περιβάλλοντος SDN. Οι χρήστες έχουν την ευελιξία να χρησιμοποιούν προκαθορισμένες πολιτικές ή να δημιουργούν τις δικές τους επεκτείνοντας τις αφηρημένες κλάσεις εντός του πλαισίου CloudSimSDN.

Οι Υπηρεσίες VM διαχειρίζονται το δίκτυο υπολογίζοντας τους χρόνους εκτέλεσης της εφαρμογής και τις καθυστερήσεις μετάδοσης πακέτων μεταξύ των VM. Το επίπεδο παροχής πόρων, που αποτελείται από λειτουργικές μονάδες VM και Network Provisioning, εκχωρεί VM μέσα στο κέντρο

δεδομένων και διαχειρίζεται την κυκλοφορία του δικτύου σύμφωνα με πολιτικές που καθορίζονται από τον χρήστη. Τέλος, οι λειτουργικές μονάδες κατανομής πόρων ενορχηστρώνουν την κατανομή των πόρων όπως ορίζεται στο επίπεδο πόρων Cloud, το θεμελιώδες επίπεδο της αρχιτεκτονικής.

Βελτιωμένη προσομοίωση δικτύου

Ο προσομοιωτής με τις κλάσεις Switch και Channel αναπαράγει τη δυναμική φύση των SDN switches και τις δυνατότητές τους διαχείρισης κυκλοφορίας. Η κλάση Switch επιτρέπει τη δυναμική εγκατάσταση κανόνων προώθησης από έναν ελεγκτή SDN, προσομοιώνοντας την ευελιξία των πραγματικών περιβαλλόντων SDN. Η κλάση Channel το ενισχύει περαιτέρω ορίζοντας διαδρομές και χωρητικότητες δικτύου, επιτρέποντας τη δημιουργία αποκλειστικών καναλιών για συγκεκριμένους τύπους κίνησης, τα οποία μιμούνται την πραγματοποίηση προτεραιοτήτων SDN και τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

Εμπειρία χρήστη

Ο προσομοιωτής έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τον χρήστη, προσφέροντας την ευελιξία στην εισαγωγή ακολουθιών αιτημάτων σε μορφή CSV. Αυτό απλοποιεί τη μοντελοποίηση πολύπλοκων σεναρίων και είναι ζωτικής σημασίας για την προσομοίωση συγκεκριμένων φόρτων εργασίας ή την αξιολόγηση διαφορετικών αλγορίθμων προγραμματισμού.

Validation

Η αξιοπιστία του CloudSimSDN τεκμηριώνεται μέσω αυστηρών πειραμάτων επικύρωσης που διεξάγονται στην εργασία των Sonk.α.[\[9\]](#). Αυτά τα πειράματα δείχνουν μια στενή συσχέτιση στους χρόνους μετάδοσης σε σύγκριση με το Mininet, υποδεικνύοντας ότι το CloudSimSDN μπορεί να προσφέρει αξιόπιστες προβλέψεις για τη συμπεριφορά του δικτύου. Αυτή η εμπειρική επικύρωση είναι σημαντική για τους χρήστες που στοχεύουν να αξιολογήσουν ολοκληρωμένα τα δίκτυα SDN, ενώ ταυτόχρονα μετριάζουν τους κινδύνους που σχετίζονται με τις δοκιμές σε πραγματικόπεριβάλλον. Τα ευρήματα από την έρευνα των συγγραφέων παρέχουν μια σταθερή βάση για

την εμπιστοσύνη στο CloudSimSDN ως ένα αξιόπιστο εργαλείο για την προσομοίωση σύνθετων κέντρων δεδομένων cloud με δυνατότητα SDN.

Συμπέρασμα:

Το CloudSimSDN ξεχωρίζει ως ένα προηγμένο πλαίσιο προσομοίωσης για ερευνητές και επαγγελματίες στο SDN. Συνδυάζοντας λεπτομερείς δυνατότητες προσομοίωσης δικτύου με χαρακτηριστικά φιλικά προς τον χρήστη και αξιόπιστη επικύρωση, παρέχει μια ισχυρή πλατφόρμα για την εξερεύνηση των δυνατοτήτων των υποδομών. Η προγραμματική του προσέγγιση, ενώ απαιτεί μια καμπύλη μάθησης, προσφέρει εκτεταμένη προσαρμογή και έλεγχο, ανοίγοντας το δρόμο για μελλοντικές καινοτομίες και βελτιστοποιήσεις στις τεχνολογίες δικτύωσης.

3.3 NS-3

3.3.1 Εισαγωγή

Το NetworkSimulator 3 (NS-3) είναι ένας προσομοιωτής δικτύου διακριτών συμβάντων, που έχει σχεδιαστεί κυρίως για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Ξεκίνησε το 2006 ως έργο ανοιχτού κώδικα και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα στην εξέλιξη των εργαλείων προσομοίωσης δικτύου.

Το NS-3 ξεχωρίζει για την ανοιχτή, επεκτάσιμη αρχιτεκτονική του, που εξυπηρετεί την ερευνητική και εκπαιδευτική κοινότητα δικτύων. Μοντελοποιεί τις λειτουργίες και τις συμπεριφορές των δικτύων δεδομένων πακέτων, παρέχοντας μια μηχανή προσομοίωσης για ποικίλες πειραματικές ανάγκες. Οι ερευνητές και οι σπουδαστές συχνά στρέφονται στο NS-3 για μελέτες που είναι δύσκολο ή μη πρακτικό να εκτελεστούν με πραγματικά συστήματα, να παρατηρήσουν ελεγχόμενη συμπεριφορά και να εμβαθύνουν στις λειτουργίες του δικτύου.

Ξεχωρίζοντας από άλλα εργαλεία προσομοίωσης, το NS-3 έχει κατασκευαστεί ως ένα σύνολο βιβλιοθηκών που μπορούν να συνδυαστούν με άλλες εξωτερικές βιβλιοθήκες λογισμικού, που διαφέρουν από τις πλατφόρμες που προσφέρουν ένα ενσωματωμένο γραφικό περιβάλλον εργασίας χρήστη για

όλες τις εργασίες. Επιτρέπει τη χρήση ανάλυσης δεδομένων και εργαλείων οπτικοποίησης. Ωστόσο, απαιτεί από τους χρήστες να είναι άνετοι με τις λειτουργίες της γραμμής εντολών και με τα εργαλεία ανάπτυξης C++ ή/και Python.

Προσαρμοσμένο κυρίως σε συστήματα Linux ή macOS, το NS-3 προσφέρει επίσης υποστήριξη για συστήματα BSD και Windows. Αν και το NS-3 δεν είναι ένα προϊόν που υποστηρίζεται εμπορικά, επωφελείται από μια ενεργή κοινότητα που παρέχει υποστήριξη σε φόρουμ.

Για όσους μεταβαίνουν από το NS-2, έναν δημοφιλή προκάτοχο του NS-3, η πιο αξιοσημείωτη αλλαγή είναι η επιλογή της γλώσσας. Το NS-3 είναι εξ ολοκλήρου γραμμένο σε C++, με προαιρετικές συνδέσεις Python, επιτρέποντας τη γραφή προσομοιώσεων σε οποιαδήποτε γλώσσα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την εξάρτηση του NS-2 από το OTcl και τη μερική του σύνθεση C++. Η στροφή στο NS-3 συνιστάται συχνά λόγω της ενεργής συντήρησής του, των σύγχρονων χαρακτηριστικών όπως το περιβάλλον εκτέλεσης κώδικα υλοποίησης και της ευθυγράμμισής του με τη δομή των πραγματικών συστημάτων.

Η ανάπτυξη του NS-3 βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη συνεισφορά της ερευνητικής κοινότητας. Η αδειοδότηση ανοιχτού κώδικα, ένα appstore και μια σελίδα ContributedCode είναι μερικές πολιτικές που ενθαρρύνουν την ενεργό συμμετοχή. Οι νέοι χρήστες ενθαρρύνονται επίσης να συνεισφέρουν, με τη διαδικασία να διευκολύνεται από εργαλεία όπως το GitLab.com και το πρόγραμμα παρακολούθησης προβλημάτων του.

Συνοπτικά, το NS-3 προσφέρει μια εξελιγμένη πλατφόρμα για προσομοίωση δικτύου, ελκυστική τόσο για ερευνητές όσο και για εκπαιδευτικούς. Η ενεργή ανάπτυξή του, η προσέγγιση που βασίζεται στην κοινότητα και οι προηγμένες δυνατότητές του το καθιστούν μια προτιμώμενη επιλογή στον τομέα της προσομοίωσης δικτύου. Αυτή η ανάλυση στοχεύει να διερευνήσει τα χαρακτηριστικά, τις εφαρμογές και τις επιπτώσεις του NS-3 στην έρευνα και την εκπαίδευση του δικτύου[19].

3.3.2 Αρχιτεκτονική Software

Η αρχιτεκτονική και οι αρχές σχεδίασής του NS-3 προσανατολίζονται στην υποδοχή ενός ευρέος φάσματος σεναρίων δικτύου, από παραδοσιακά συστήματα που βασίζονται σε IP έως πιο εξειδικευμένες αρχιτεκτονικές δικτύου, όπως δίκτυα αισθητήρων ή δίκτυα με ανοχή καθυστέρησης (DTN). Εδώ, αναλύουμε τα βασικά στοιχεία και τις αρχιτεκτονικές αποφάσεις που στηρίζουν το NS-3.

❖ Βασικά στοιχεία και δομή πλαισίου:

Λειτουργικά συστήματα και γλώσσες: Το NS-3 είναι κυρίως ένα πρόγραμμα χρήστη συμβατό με συστήματα που βασίζονται σε Unix και Linux και με δυνατότητα συμβατότητας με Windows στο μέλλον. Είναι γραμμένο σε C++ και προσφέρει εύκολες ενέργειες σε ένα ευρύ φάσμα χρηστών.

Εστίαση σε δίκτυα που βασίζονται σε IP: Ενώ η έμφαση δίνεται στα δίκτυα IPv4 και IPv6, η επεκτάσιμη φύση του NS-3 σημαίνει ότι δεν περιορίζεται σε αυτά. Αυτό το άνοιγμα ευθυγραμμίζεται με τη σύγχρονη τάση των διαφορετικών τύπων δικτύων.

Τροποποίηση και επέκταση χρήστη: Μια βασική πτυχή του NS-3 είναι ο σχεδιασμός του για τροποποιήσεις και επεκτάσεις που βασίζονται στον χρήστη. Οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν παραδείγματα σεναρίων ή να αναπτύξουν νέα μοντέλα, καθιστώντας τις διανομές πηγαίου κώδικα την προτιμώμενη μέθοδο διάδοσης.

❖ Υλοποίηση:

Βιβλιοθήκες core και προσομοιωτών: Το NS-3 διαθέτει μια βασική βιβλιοθήκη για γενικές πτυχές (όπως ο εντοπισμός σφαλμάτων, η δημιουργία τυχαίων αριθμών) και μια βιβλιοθήκη προσομοιωτή για τον καθορισμό του χρόνου προσομοίωσης, των χρονοπρογραμματισμών και των συμβάντων.

Δομή βιβλιοθήκης: Υπάρχει μια κοινή βιβλιοθήκη για αντικείμενα δικτύου (όπως γενικά πακέτα), ενώ η βιβλιοθήκη κόμβων περιέχει τα βασικά αντικείμενα (κόμβους, κανάλια, συσκευές). Τα μοντέλα που σχετίζονται με το

Διαδίκτυο και συγκεκριμένες συσκευές στεγάζονται σε ξεχωριστές βιβλιοθήκες, υπογραμμίζοντας τη σπονδυλωτή φύση του NS-3[19].

❖ UseCases:

Επεκτασιμότητα μοντέλου: Ο αντικειμενοστραφής σχεδιασμός με πολυμορφικές κλάσεις επιτρέπει την υποκατηγορία και την τροποποίηση χωρίς να αλλοιώνονται τα βασικά μοντέλα.

Διαμόρφωση χρόνου εκτέλεσης: Το NS-3 παρέχει έναν ευέλικτο μηχανισμό για τους χρήστες να επαναπροσδιορίζουν τις προεπιλογές και τους τύπους κλάσεων χωρίς να αναπρογραμματίσουν, ενισχύοντας την ευκολία του χρήστη.

❖ Σχεδιασμός Classκαι Object:

ComponentSystem: Το σύστημα NS-3, επηρεασμένο από το COM και το GNOME Bonobo, υιοθετεί ένα μοντέλο προγραμματισμού προσανατολισμένο σε στοιχεία. Αυτό το μοντέλο διαχωρίζει τις διεπαφές και τις υλοποιήσεις και χρησιμοποιεί μια διεπαφή ερωτήματος για μεταβίβαση με ασφάλεια τύπου.

Διαχείριση μνήμης: Η καταμέτρηση αναφοράς χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της μνήμης, εξισορροπώντας την απόδοση με ευκολία στη χρήση.

Scripting: Ενώ η χρήση της C++ παραμένει κύρια , το NS-3 αναπτύσσει επίσης κώδικαPython για να βελτιώσει την προσβασιμότητα και την ευελιξία[19].

❖ Εξομοίωση και ενοποίηση δικτύου:

Διευκόλυνση Έρευνας και Πειραματισμού: Το NS-3 έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει τη μετάβαση μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικών τομέων, καθιστώντας το χρήσιμο εργαλείο για ερευνητές που δραστηριοποιούνται και στους δύο τομείς.

Υποστήριξη εξομοίωσης: Αν και αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε εξέλιξη, το NS-3 στοχεύει να συμπεριλάβει δυνατότητες εξομοίωσης δικτύου, επιτρέποντας

την εκτέλεση πραγματικών εφαρμογών και κώδικα πυρήνα εντός του προσομοιωτή.

Οι αρχιτεκτονικές επιλογές του NS-3 αντικατοπτρίζουν μια βαθιά κατανόηση των αναγκών της ερευνητικής κοινότητας του δικτύου. Ο αρθρωτός σχεδιασμός του, σε συνδυασμό με την εστίαση στην επεκτασιμότητα και τη χρηστικότητα, τοποθετεί το NS-3 ως κορυφαίο εργαλείο στην προσομοίωση δικτύου. Καθώς το NS-3 συνεχίζει να εξελίσσεται, αναμένεται να ενσωματώσει περισσότερα χαρακτηριστικά, ενισχύοντας τη χρησιμότητα και τη συνάφειά του σε ένα ολοένα πιο περίπλοκο τοπίο δικτύωσης.

3.3.3 Διαδικασία Μοντελοποίησης και Προσομοίωσης

Στο NS-3, η διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα τύπων και σεναρίων δικτύου. Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία εικονικών κόμβων, παρόμοιων με υπολογιστές, και επεκτείνεται στη ρύθμιση διαφόρων διαμορφώσεων δικτύου. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν το NS-3 για την ικανότητά του να αναπαράγει πολύπλοκες συμπεριφορές δικτύου.

Βασικά χαρακτηριστικά μοντελοποίησης:

Εικονικοί κόμβοι και δίκτυα: Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν και να διαμορφώσουν εικονικούς κόμβους, συσκευές και εφαρμογές, αντικατοπτρίζοντας την πολυπλοκότητα των πραγματικών περιβαλλόντων δικτύου.

Διαφορετικοί τύποι δικτύου: Το NS-3 υποστηρίζει τη μοντελοποίηση διαφόρων τύπων δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων point-to-point, ασύρματων και CSMA, παρέχοντας μια ολιστική άποψη των διαφορετικών αρχιτεκτονικών δικτύου.

Προσομοίωση Πρωτοκόλλου: Το NS-3 υπερέχει στην προσομοίωση μιας σειράς πρωτοκόλλων δικτύου, καθιστώντας το ένα ευέλικτο εργαλείο για τη μελέτη διαφόρων πτυχών των επικοινωνιών δικτύου.

3.3.4 Εξωτερικά εργαλεία

Η ενσωμάτωση με εξωτερικά εργαλεία και πρόσθετα ενισχύει τις δυνατότητες του NS-3:

iTETRIS και TraCI: Αυτά τα πρόσθετα διευκολύνουν την ενσωμάτωση του NS-3 με προσομοιωτές κυκλοφορίας οχημάτων, επιτρέποντας ολοκληρωμένες μελέτες δικτύων οχημάτων.

SUMO Integration: Η ενοποίηση με το SUMO (Simulation of UrbanMObility) επιτρέπει τη λεπτομερή μοντελοποίηση της κυκλοφορίας οχημάτων, παρέχοντας ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον προσομοίωσης για δίκτυα οχημάτων.

3.3.5 Ευχρηστία και καμπύλη μάθησης

Η χρηστικότητα του NS-3 και η σχετική καμπύλη μάθησης είναι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην ευρεία υιοθέτησή του στις ερευνητικές και εκπαιδευτικές κοινότητες.

Το NS-3 προσφέρει την επιλογή δέσμης ενεργειών σε C++ ή Python, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα χρηστών με διαφορετικές προτιμήσεις προγραμματισμού. Αυτή η ευελιξία διευκολύνει την καμπύλη εκμάθησης για όσους είναι ήδη εξοικειωμένοι με αυτές τις γλώσσες.

Η αρχιτεκτονική του επιτρέπει στους χρήστες να εστιάζουν σε συγκεκριμένα στοιχεία που σχετίζονται με την έρευνά τους, καθιστώντας λιγότερο αποθαρρυντικό για τους αρχάριους να επεκτείνουν την κατανόησή τους.

Η διαδικασία δημιουργίας μοντέλων και προσομοιώσεων στο NS-3 έχει σχεδιαστεί για να είναι ευκολονόητη, με μεγάλη έμφαση στις δυνατότητες τροποποίησης και επέκτασης χρήστη.

Μια πιθανή πρόκληση για τους νέους χρήστες είναι η εξάρτηση του NS-3 από λειτουργίες γραμμής εντολών και δέσμες ενεργειών, κάτι που μπορεί να απαιτεί βασική κατανόηση του προγραμματισμού και των εργαλείων γραμμής εντολών.

Για πιο εξελιγμένες προσομοιώσεις, απαιτείται βαθύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών του NS-3, κάτι που μπορεί να επεκτείνει την καμπύλη εκμάθησης για ορισμένους χρήστες.

3.3.6 Documentation

Το NS-3 παρέχει εκτενή τεκμηρίωση, συμπεριλαμβανομένων λεπτομερών εγχειριδίων και οδηγιών, τα οποία είναι χρήσιμα για τους νέους χρήστες να κατανοήσουν τα βασικά και για τους προχωρημένους χρήστες να εμβαθύνουν σε πιο σύνθετες λειτουργίες.

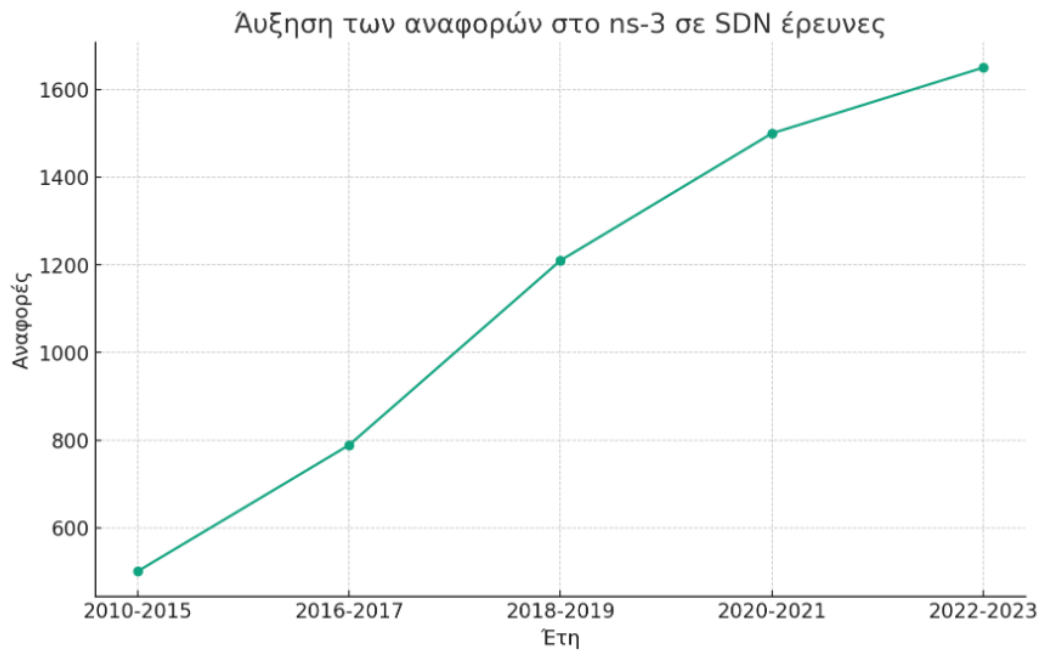
Μια πληθώρα παραδειγμάτων σεναρίων και σεναρίων χρήσης είναι διαθέσιμα, επιτρέποντας στους χρήστες να μάθουν μέσω πρακτικής επίδειξης και πειραματισμού.

Η ενεργή κοινότητα NS-3, μέσω φόρουμ προσφέρει πρόσθετη υποστήριξη, όπου τόσο οι νέοι όσο και οι έμπειροι χρήστες μπορούν να μοιράζονται γνώσεις, να κάνουν ερωτήσεις και να βρίσκουν απαντήσεις.

Η επίσημη σελίδα [\[19\]](#) ενημερώνεται τακτικά για να αντικατοπτρίζει τις τελευταίες εξελίξεις στο NS-3, διασφαλίζοντας ότι οι χρήστες έχουν πρόσβαση στις πιο πρόσφατες πληροφορίες.

3.3.7 Ακαδημαϊκή / ερευνητική κοινότητα

Το παρακάτω γράφημα αντιπροσωπεύει την αυξανόμενη υιοθέτηση του NS-3 από την ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα στον τομέα της δικτύωσης SDN, όπως αποδεικνύεται από τις αναφορές στο GoogleScholar. Ξεκινώντας από το 2010, βλέπουμε μια αξιοσημείωτη αύξηση στον αριθμό των αναφορών:



Εικόνα 10 Αναφορές στο NS-3 ανά έτος

- Από το 2010 έως το 2015, το NS-3 στο πλαίσιο του SDN αναφέρθηκε 501 φορές.
- Την περίοδο μεταξύ 2016 και 2017 σημειώθηκε αύξηση σε 789 αναφορές.
- Οι αναφορές αυξήθηκαν περαιτέρω σε 1.210 μεταξύ 2018 και 2019.
- Σημαντική άνοδος παρατηρείται το 2020-2021, με 1.500 αναφορές.
- Η πιο πρόσφατη περίοδος, 2022-2023, σημειώνει την υψηλότερη με 1.650 αναφορές.

Αυτή η τάση καταδεικνύει την κλιμακούμενη συνάφεια και χρήση του NS-3 στην έρευνα SDN με την πάροδο των ετών. Υποδεικνύει ένα ισχυρό και αυξανόμενο ενδιαφέρον για το NS-3 μεταξύ των ερευνητών, αντικατοπτρίζοντας την προσαρμοστικότητα και την αποτελεσματικότητά του στην προσομοίωση δικτύου, ιδιαίτερα στην περιοχή του SDN.

3.4 Απαιτήσεις μετρήσεων σε περιβάλλον SDN

3.4.1 Ακρίβεια

Η ακρίβεια των μετρήσεων απόδοσης και κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο είναι θεμελιώδους σημασίας, καθώς αποτελούν τον οδηγό για εργασίες διαχείρισης του δικτύου (μηχανική κυκλοφορίας, παροχή δικτύου, διάγνωση προβλημάτων και ανάκαμψη). Για του λόγους αυτούς, σε ένα δίκτυο SDN απαιτούνται υψηλής ακρίβειας μετρήσεις και η λήψη τους δεν πρέπει να υποβαθμίζει την απόδοση του.

3.4.2 Πόροι

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων σε ένα περιβάλλον SDN, καταναλώνονται πόροι του συστήματος, όπως CPU, μνήμη, εύρος ζώνης. Το ποσοστό χρήσης των πόρων εξαρτάται από το πλήθος των μετρήσεων και το ζητούμενο είναι αυτή η χρήση να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, ενώ η ακρίβεια των μετρήσεων παραμένει υψηλή.

3.4.3 Γενικότητα

Η ετερογένεια των σημερινών δικτύων, η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία τους, προϋποθέτει τη δυνατότητα χρήσης των εργαλείων εξομοίωσης/προσομοίωσης για μετρήσεις σε μια εκτεταμένη ποικιλία λύσεων.

3.4.4 Απλότητα

Για τη συλλογή μετρήσεων σε ένα δίκτυο SDN, δεν είναι απαραίτητη η διαμόρφωση του κάθε κόμβου, ενώ το πλαίσιο μετρήσεων κυκλοφορίας μπορεί να μετριάξει την παραγόμενη λόγω μετρήσεων κίνηση σε περιπτώσεις υψηλού φόρτου.

3.4.5 Υποστήριξη άλλων συστημάτων

Βασικό αίτημα από τους χρήστες των εργαλείων προσομοίωσης -εξομοίωσης δικτύων SDN είναι η υποστήριξη άλλων συστημάτων, ικανών να συνυπάρξουν ή να λειτουργήσουν με την αρχιτεκτονική SDN. Τέτοια παραδείγματα είναι το WiFi, το IoT και το 5G.

4 Θεωρητική συγκριτική μελέτη

4.1 Μεθοδολογία

Σε αυτήν την εργασία η επιλογή των Mininet, CloudSimSDN και NS-3 ως κύρια εργαλεία σύγκρισης βασίζεται σε πολλά επίπεδα:

- Προσέγγιση και πεδίο εφαρμογής:

Το Mininet ειδικεύεται στη δημιουργία ενός ρεαλιστικού περιβάλλοντος εξομοίωσης δικτύου. Επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν ένα πλήρες δίκτυο χρησιμοποιώντας ένα μόνο μηχάνημα, καθιστώντας το μια δημοφιλή επιλογή για τη δοκιμή εφαρμογών και ελεγκτών SDN σε ένα ελεγχόμενο αλλά ρεαλιστικό περιβάλλον.

Το CloudSimSDN είναι μια επέκταση του προσομοιωτή CloudSim, ειδικά προσαρμοσμένη για μοντελοποίηση και προσομοίωση κέντρων δεδομένων cloud σε πλαίσιο SDN. Η εστίασή του σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους όπου το SDN διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο παρέχει μια μοναδική οπτική γωνία για τη μελέτη σας.

Το NS-3, ως προσομοιωτής δικτύου διακριτών συμβάντων, προσφέρει ένα πιο γενικευμένο και εκτεταμένο πλαίσιο για την έρευνα δικτύου. Είναι κατάλληλο για ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς σκοπούς, ειδικά για την προσομοίωση πολύπλοκων δικτύων και τη μελέτη λεπτομερών συμπεριφορών και πρωτοκόλλων δικτύου.

- Δημοτικότητα και υποστήριξη της κοινότητας:

Και τα τρία εργαλεία είναι ευρέως αναγνωρισμένα στην κοινότητα προσομοίωσης δικτύου και SDN. Έχουν ουσιαστική κοινοτική υποστήριξη, τεκμηρίωση και ενεργό ανάπτυξη, η οποία όχι μόνο παρέχει αξιοπιστία, αλλά εξασφαλίζει επίσης πρόσβαση σε πληθώρα γνώσεων και πόρων.

- Τεχνικές δυνατότητες και χαρακτηριστικά:

Κάθε εργαλείο προσφέρει μοναδικές τεχνικές δυνάμεις. Το Mininet υπερέρχει στην εξομοίωση δικτύου σε πραγματικό χρόνο με υποστήριξη πραγματικών

ελεγκτών SDN. Το CloudSimSDN παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις συμπεριφορές δικτύου του κέντρου δεδομένων cloud υπό τον έλεγχο SDN. Το NS-3 προσφέρει ευρείες δυνατότητες για την προσομοίωση μιας ευρείας σειράς τύπων δικτύων, από παραδοσιακά δίκτυα IP έως αναδυόμενες τεχνολογίες όπως το IoT και το 5G.

- Ευελιξία και προσαρμογή:

Αυτά τα εργαλεία προσφέρουν διαφορετικούς βαθμούς ευελιξίας και προσαρμογής. Το Mininet και το NS-3 επιτρέπουν εκτεταμένες προσαρμοσμένες τοπολογίες και διαμορφώσεις δικτύου, καλύπτοντας διαφορετικές ερευνητικές ανάγκες. Το CloudSimSDN, με εστίαση στα κέντρα δεδομένων cloud, επιτρέπει τη λεπτομερή μοντελοποίηση τέτοιων περιβαλλόντων.

- Ερευνητική και Εκπαιδευτική Αξία:

Η επιλογή περιλαμβάνει εργαλεία που είναι ωφέλιμα τόσο για εκπαιδευτικούς σκοπούς όσο και για επιστημονική έρευνα. Αυτή η ποικιλία παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των προσομοιώσεων και προσομοιώσεων SDN σε διαφορετικά περιβάλλοντα, καθιστώντας τη μελέτη πολύτιμη τόσο για φοιτητές όσο και για ερευνητές.

Mininet: Το Mininet είναι ευρέως αναγνωρισμένο ως ένα από τα πιο δημοφιλή εργαλεία για την εξομοίωση δικτύων SDN και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πολλές έρευνες και δημοσιεύσεις. Η ευελιξία του στην προσομοίωση πολύπλοκων δικτυακών σεναρίων και η ικανότητά του να ενσωματώνει πραγματικούς ελεγκτές SDN το καθιστούν ιδανική επιλογή για προσομοιώσεις SDN.

CloudSimSDN: Παρά το γεγονός ότι δεν έχει ακόμη την ευρεία αποδοχή των άλλων δύο εργαλείων, το CloudSimSDN παρουσιάζει σημαντικό δυναμικό ως εργαλείο για την προσομοίωση και μοντελοποίηση κέντρων δεδομένων βασισμένων στο σύννεφο με υποστήριξη SDN. Αν και οι αναφορές του στην ερευνητική κοινότητα είναι λιγότερες σε σύγκριση με τα άλλα δύο εργαλεία, το CloudSimSDN είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εξερεύνηση καινοτόμων

προσεγγίσεων στη διαχείριση δικτυακών πόρων σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους.

NS-3: Το NS-3 έχει γίνει αποδεκτό ως πρότυπο στην προσομοίωση δικτύων, χάρη στην ευελιξία του, την ακρίβεια και την πληθώρα δικτυακών μοντέλων που υποστηρίζει. Είναι ένα εργαλείο που έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της ερευνητικής κοινότητας σε πολλαπλά πεδία από τη βασική δικτυακή μοντελοποίηση μέχρι την ανάπτυξη καινοτόμων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων.

Η ευρεία αποδοχή και χρήση αυτών των τριών εργαλείων στην ερευνητική κοινότητα του SDN αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη της εγκυρότητας και της αναγνωρισμένης συνεισφοράς τους στη μελέτη και ανάπτυξη προγραμματιζόμενων δικτύων. Αυτό το υψηλό επίπεδο ερευνητικής δραστηριότητας επιβεβαιώνει την επιλογή τους ως κατάλληλα εργαλεία για τη συγκριτική ανάλυση.

Συνοπτικά, η επιλογή των Mininet, CloudSimSDN και NS-3 παρέχει μια ολοκληρωμένη προοπτική για τα εργαλεία προσομοίωσης και εξομοίωσης SDN, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης από πρακτική εξομοίωση δικτύου έως θεωρητικά μοντέλα δικτύου και προσομοιώσεις κέντρων δεδομένων.

4.2 Γενική επισκόπηση

Σε αυτή τη συγκριτική μελέτη, αναλύουμε τρία ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία προσομοίωσης δικτύου: Mininet, CloudSimSDN και NS-3. Αυτά τα εργαλεία συγκρίνονται με βάση τρία κριτήρια: γενικές ιδιότητες, τεχνικές λεπτομέρειες και δυνατότητες προσομοίωσης.

Table4-1: Γενικές ιδιότητες εργαλείων προσομοίωσης δικτύου

	Mininet VM	CloudSim SDN	NS-3
Διαθεσιμότητα πηγαίου κώδικα	Διαθέσιμο στο GitHub / Επίσημη σελίδα	Διαθέσιμο στο GitHub	Διαθέσιμο στο GitHub/ Επίσημη σελίδα
Ημ/νια πρώτης δημοσίευσης	2010	2015	2008

κώδικα			
Που απευθύνεται	Ακαδημαϊκός/Βιομηχανικός τομέας	Ακαδημαϊκός τομέας	Ακαδημαϊκός/Ερευνητικός τομέας
Υποστήριξη πλατφόρμας	VirtualBox (GPL, macOS/Windows/Linux) VMware Fusion (macOS) VMware Workstation Player (Windows/Linux)	Απαιτείται πρώτα εγκατάσταση CloudSim σε Linux ή Windows	Linux, Windows, MacOS
Documentation εγκατάστασης	Εκτενής	Ελάχιστη	Εκτενής
Διαθεσιμότητα GUI	Ναι	Όχι	Σύντομα διαθέσιμο [29]
Προγραμματιστικές γλώσσες	Python, C++	Java	C++, Python
Ευκολία χρήσης και καμπύλη μάθησης	Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή

Συνεχίζοντας από την εξέταση των γενικών ιδιοτήτων των προσομοιωτών/εξομοιωτών Mininet, CloudSimSDN και NS-3, περνάμε στην ανάλυση των δυνατοτήτων προσομοίωσης που προσφέρει κάθε εργαλείο. Οι δυνατότητες αυτές είναι κρίσιμες για την απόδοση και την ακρίβεια των προσομοιώσεων, καθώς και για την ικανότητά τους να αντιπροσωπεύουν πιστά τα δικτυακά μοντέλα και τις αλληλεπιδράσεις τους με το περιβάλλον. Σε αυτό το στάδιο, θα εξετάσουμε κριτήρια όπως το μοντέλο κόστους, το μοντέλο ενέργειας, τη δυνατότητα παραμετροποίησης της κινητικότητας και την υποστήριξη για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (devicehandover).

Table4-2: Δυνατότητες Προσομοίωσης/Εξομοίωσης

	Mininet	CloudSimSDN	NS-3
Μοντέλο Ενέργειας	Περιορισμένο [2,7]	Ναι [9,30]	Ναι (εκτεταμένες δυνατότητες)[3]
Μοντέλο	Βασικό	Περιορισμένο	Εκτεταμένο

Δικτύου	(Ethernet, WiFi)[2,7]	(CloudSim)[8, 29]	(πολλαπλά πρωτόκολλα)[3,7]
Παραμετροποίηση Κινητικότητα	Ναι [2]	Όχι[9,30]	Ναι[3]
Επικοινωνία μεταξύ Συσκευών	Περιορισμένη [2]	Όχι[9,30]	Ναι (με πλήρη υποστήριξη)[3]
Υποστήριξη Τοπολογίας Δικτύου	Βασική, προσαρμόσιμη[2,7]	Δέντρο, Στατική[9,30]	Προσαρμόσιμη, Δυναμική[3,7]
Τύπος Προσομοιωτή	Event-based[2,7]	Discrete-event [9,30]	Discrete-event[3]

Η δεύτερη κατηγορία της συγκριτικής μελέτης καλύπτει τις τεχνικές λεπτομέρειες των εργαλείων προσομοίωσης, που είναι σημαντικές τόσο για τους χρήστες όσο και για τους προγραμματιστές που εργάζονται με τον προσομοιωτή.

Η αξιολόγηση των δυνατοτήτων προσομοίωσης των εργαλείων Mininet, CloudSimSDN και NS-3 δείχνει σαφείς διαφοροποιήσεις στην αντίληψη και χειρισμό των δικτυακών περιβαλλόντων. Το CloudSimSDN, περιλαμβάνει ένα μοντέλο κόστους για την απεικόνιση της ενεργειακής κατανάλωσης, προσφέροντας έναν σημαντικό δείκτη απόδοσης για κέντρα δεδομένων[30]. Αντίθετα, το NS-3 εκτείνει τις δυνατότητες του σε προηγμένα μοντέλα κόστους και ενέργειας, καθώς και σε εκτεταμένη μοντελοποίηση δικτυακών πρωτοκόλλων, παρέχοντας έναν πλήρη κατάλογο επιλογών για εκτενείς προσομοιώσεις.

Όσον αφορά την κινητικότητα, το Mininet και το NS-3 υποστηρίζουν παραμετροποιήσιμες συμπεριφορές, δίνοντας τη δυνατότητα για δυναμικές αλλαγές στην τοποθεσία των συσκευών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ το CloudSimSDN δεν προσφέρει αυτή τη δυνατότητα. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών είναι πλήρως υποστηριζόμενη στο NS-3, επιτρέποντας σύνθετες αλληλεπιδράσεις και μεταβιβάσεις εργασιών σε περίπτωση αλλαγής τοποθεσίας ή ανάγκης για εκτόνωση φορτίου, ενώ το Mininet προσφέρει περιορισμένες λειτουργίες σε αυτόν τον τομέα.

Η υποστήριξη τοπολογίας δικτύου ποικίλλει σημαντικά, με το Mininet και το NS-3 να προσφέρουν ευέλικτες και δυναμικές επιλογές, σε αντίθεση με το CloudSimSDN που παρέχει μια στατική τοπολογία δέντρου. Τέλος, η πολιτική ομοσπονδίας και η υποστήριξη για τύπους προσομοιωτή βασισμένους σε γεγονότα είναι κοινά χαρακτηριστικά σε όλα τα εργαλεία, αν και το NS-3 διακρίνεται για τις προχωρημένες του επιλογές σε αυτούς τους τομείς.

4.3 Αξιοπιστία

➤ Mininet

Η αξιοπιστία του Mininet είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, καθώς περιλαμβάνει διάφορες πτυχές όπως η πιστότητα, επεκτασιμότητα, απόδοση και ενσωμάτωση με ελεγκτές SDN.

Το Mininet παρέχει υψηλού επιπέδου εξομίωση εικονικών υπολογιστών, μεταγωγέων, ελεγκτών και συνδέσμων, μοντελοποιώντας με ακρίβεια τη συμπεριφορά των πραγματικών δικτύων. Αυτό περιλαμβάνει συνθήκες προσομοίωσης όπως το latency, bandwidth και η απώλεια πακέτων. Οι συγγραφείς Chertov κ.α.[\[31\]](#) στην εργασία τους τονίζουν την ακρίβεια και τον ρεαλισμό του Mininet.

Ενώ το Mininet μπορεί να χειριστεί μεγάλες τοπολογίες δικτύου, η επεκτασιμότητα του περιορίζεται από τους πόρους του συστήματος που λειτουργεί. Καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται, η απόδοση μπορεί να υποβαθμιστεί.

Λόγω της κοινής αρχιτεκτονικής kernel, τα εικονικά στοιχεία του Mininet ενδέχεται να μην απομονώνουν πλήρως την απόδοση, επηρεάζοντας την ακρίβεια των μετρήσεων, ειδικά σε σενάρια υψηλής ζήτησης. Αυτό το ζήτημα αντιμετωπίζεται συχνά στην επίσημη σελίδα του Mininet και στα φόρουμ της κοινότητας.

Η φιλική προς τον χρήστη διεπαφή και η ικανότητα του Mininet να δημιουργεί προσαρμοσμένες τοπολογίες και να ενσωματώνεται με πραγματικές εφαρμογές και ελεγκτές το καθιστούν κατάλληλο για

εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Η επίσημη τεκμηρίωση παρέχει ολοκληρωμένους οδηγούς και παραδείγματα.

Χρησιμοποιείται ευρέως σε δοκιμές SDN, το Mininet επιτρέπει την ενσωμάτωση με διάφορους ελεγκτές SDN όπως το OpenDaylight και το Floodlight, παρέχοντας ένα ρεαλιστικό περιβάλλον για τη δοκιμή εφαρμογών SDN.

Μια ενεργή κοινότητα συμβάλλει στη συνεχή ανάπτυξη και αξιοπιστία της Mininet. Οι τακτικές ενημερώσεις βελτιώνουν τις δυνατότητές του και αντιμετωπίζουν σφάλματα, όπως φαίνεται στα φόρουμ της κοινότητας και στο [MininetGitHub\[32\]](#).

Το Mininet περιλαμβάνει εργαλεία διάγνωσης και αντιμετώπισης προβλημάτων και επιτρέπει προσαρμοσμένα σενάρια εντοπισμού σφαλμάτων, βοηθώντας στην αξιοπιστία των προσομοιώσεων. Η επίσημη τεκμηρίωση παρέχει οδηγίες για αυτούς τους σκοπούς.

Η ευρεία υιοθέτηση του Mininet τόσο στην ακαδημαϊκή όσο και στην βιομηχανική έρευνα υπογραμμίζει την αξιοπιστία του. Πολυάριθμες μελέτες συζητούν την εφαρμογή του σε σενάρια πραγματικού κόσμου, όπως είναι διαθέσιμα σε πλατφόρμες όπως το IEEEExplore.

Ενώ το Mininet είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό, δεν είναι ένα πλήρες εργαλείο για τη δοκιμή πραγματικού δικτύου. Η ακρίβεια της προσομοίωσης και η απόδοσή του εξαρτώνται από τις δυνατότητες του συστήματος host. Συζητήσεις σε ακαδημαϊκές εργασίες και τεχνικά φόρουμ συχνά υπογραμμίζουν αυτούς τους περιορισμούς.

Το Mininet αποτελεί ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό και αξιόπιστο εργαλείο για εξομοίωση δικτύου, ιδιαίτερα στο πλαίσιο του SDN και της προηγμένης έρευνας δικτύων. Ο συνδυασμός πιστότητας, ευκολίας χρήσης, επεκτασιμότητας και ισχυρής υποστήριξης από την κοινότητα το καθιστούν μια προτιμώμενη επιλογή για επαγγελματίες και ερευνητές του δικτύου. Ωστόσο, η επίγνωση των περιορισμών του, ιδιαίτερα όσον αφορά την αντανάκλαση πολύπλοκων συμπεριφορών δικτύου, όπως η καθυστέρηση και

το jitter, και η εξάρτησή του από τους πόρους του συστήματος κεντρικού υπολογιστή, είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ακριβών και αποτελεσματικών προσομοιώσεων.

➤ **CloudSimSDN**

Το CloudSimSDN, μια επέκταση του CloudSim, έχει σχεδιαστεί ειδικά για την προσομοίωση δικτύωσης SDN σε περιβάλλοντα cloud. Η αξιοπιστία του στις προσομοιώσεις SDN αξιολογείται μέσω διαφόρων πτυχών, όπως η εστίασή του στο SDN και το cloudcomputing, η υποστήριξη NetworkFunctionVirtualization (NFV), η ακρίβεια προσομοίωσης, η απόδοση, η επεκτασιμότητα, η χρηστικότητα και η ενοποίηση με ελεγκτές SDN πραγματικού κόσμου.

Το CloudSimSDN ενισχύει τη λειτουργικότητα του CloudSim προσθέτοντας χαρακτηριστικά ειδικά για το SDN, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση χαρακτηριστικών SDN στα κέντρα δεδομένων cloud. Αυτή η εξειδίκευση στο SDN και το cloudcomputing είναι το κλειδί για την αξιοπιστία του σε αυτούς τους συγκεκριμένους τομείς.

Το CloudSimSDN επιτρέπει λεπτομερή έλεγχο των στοιχείων δικτύου, που οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα προσομοίωσης. Υποστηρίζει επίσης τη μοντελοποίηση ρεαλιστικών προτύπων κίνησης δικτύου και συμπεριφορών, που είναι απαραίτητες για αξιόπιστες προσομοιώσεις[30].

Ενώ το CloudSimSDN είναι αξιόπιστο για προσομοιώσεις, δεν αποτελεί πλήρες υποκατάστατο των φυσικών δοκιμών. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των παραμέτρων προσομοίωσης και των διαμορφώσεων που χρησιμοποιούνται. Τα τεχνικά φόρουμ και οι συζητήσεις συχνά υπογραμμίζουν αυτούς τους περιορισμούς και τις βέλτιστες πρακτικές στη χρήση του CloudSimSDN.

Συνοπτικά, το CloudSimSDN προσφέρει μια ισχυρή πλατφόρμα για την προσομοίωση SDN σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους, που χαρακτηρίζεται από λεπτομερή έλεγχο των στοιχείων δικτύου, υποστήριξη για NFV και επεκτασιμότητα για προσαρμοσμένη ανάπτυξη. Η εφαρμογή του

στην ακαδημαϊκή και βιομηχανική έρευνα τονίζει την αξιοπιστία του. Ωστόσο, οι χρήστες θα πρέπει να προσέχουν τις απαιτήσεις πόρων, τους περιορισμούς επεκτασιμότητας και τη σημασία της συμπλήρωσης των προσομοιώσεων με πραγματικές δοκιμές για την επίτευξη ολοκληρωμένης επικύρωσης. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση διασφαλίζει ότι το CloudSimSDN παραμένει ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο εργαλείο στο δυναμικό πεδίο του υπολογιστικού νέφους και του SDN.

➤ NS-3

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας του NS-3 στο πλαίσιο των προσομοιώσεων SDN περιλαμβάνει μια ανάλυση διαφόρων παραγόντων, όπως η πιστότητα της προσομοίωσης, η επεκτασιμότητα, η ενοποίηση με ελεγκτές SDN και πτυχές απόδοσης.

Η ικανότητα του NS-3 να παρέχει ακριβή μοντελοποίηση δικτύου είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοπιστία του. Προσφέρει λεπτομερή μοντέλα πρωτοκόλλων δικτύου και συσκευών, επιτρέποντας την προσομοίωση ρεαλιστικών περιβαλλόντων SDN με ακριβή μοτίβα και συμπεριφορές κυκλοφορίας δικτύου. Αυτή η πιστότητα επιβεβαιώνεται σε μελέτες όπως των Andegelile κ.α.[33],α οι οποίες εμβαθύνουν στην ακρίβεια των προσομοιώσεων NS-3.

Ο αρθρωτός σχεδιασμός του NS-3 επιτρέπει σημαντική προσαρμογή για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών προσομοίωσης SDN. Η ικανότητά του να ενσωματώνει νέα πρωτόκολλα και τεχνολογίες δικτύου το διατηρεί στην πρώτη γραμμή των εξελίξεων στο SDN. Αυτή η επεκτασιμότητα επισημαίνεται στην τεκμηρίωση του NS-3 και σε διάφορα τεχνικά έγγραφα που επικεντρώνονται στην επέκταση του NS-3 για διαφορετικά σενάρια δικτύου.

Το NS-3 μπορεί να ενσωματωθεί με εξωτερικούς ελεγκτές SDN, όπως το OpenDaylight ή το ONOS. Αυτή η δυνατότητα, αν και μπορεί να απαιτεί πρόσθετη διαμόρφωση, είναι καθοριστική για τη δοκιμή και την επικύρωση πολιτικών ελέγχου SDN σε προσομοιωμένα περιβάλλοντα.

Η προσομοίωση μεγάλων και πολύπλοκων δικτύων SDN στο NS-3 μπορεί να απαιτεί πόρους, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση. Ενώ το NS-3 είναι ικανό να χειρίζεται προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας, η απόδοσή του μπορεί να υποβαθμιστεί με αυξημένο μέγεθος και πολυπλοκότητα δικτύου.

Το NS-3 επωφελείται από μια ισχυρή κοινότητα προγραμματιστών και ερευνητών που συμβάλλουν στη συνεχή βελτίωσή του. Οι τακτικές ενημερώσεις και βελτιώσεις διασφαλίζουν ότι το NS-3 παραμένει σχετικό και ενημερωμένο με τις τρέχουσες τεχνολογίες δικτύου, όπως φαίνεται στον ιστοσελίδα του NS-3 και στα φόρουμ χρηστών.

Για νέους χρήστες, η ρύθμιση και η διαμόρφωση του NS-3 μπορεί να είναι περίπλοκες, υποδεικνύοντας μια απότομη καμπύλη εκμάθησης. Ωστόσο, εκτενής τεκμηρίωση και σεμινάρια είναι διαθέσιμα για να βοηθήσουν τους χρήστες να πλοηγούνται και να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το NS-3.

Τα λεπτομερή μοντέλα του NS-3 καταλήγουν σε προσομοιώσεις που αντικατοπτρίζουν στενά τις συμπεριφορές δικτύου του πραγματικού κόσμου, αν και υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί, ιδιαίτερα στο φυσικό επίπεδο. Τεχνικά έγγραφα που συγκρίνουν προσομοιώσεις NS-3 με μετρήσεις δικτύου πραγματικού κόσμου παρέχουν πληροφορίες για αυτούς τους περιορισμούς.

Η ευρεία χρήση του NS-3 στην ακαδημαϊκή και βιομηχανική έρευνα, ιδιαίτερα για τη μελέτη πρωτοκόλλων δικτύου, αρχιτεκτονικών και επιδόσεων σε περιβάλλοντα SDN, υπογραμμίζει την αξιοπιστία του. Η καταλληλότητά του για έρευνα SDN και πρωτοτυποποίηση νέων SDN concepts είναι καλά τεκμηριωμένο σε ακαδημαϊκές εργασίες και αναφορές του κλάδου, προσβάσιμο μέσω βάσεων δεδομένων.

Το NS-3 περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πρωτοκόλλων και χαρακτηριστικών δικτύωσης, καθιστώντας το κατάλληλο για πολύπλοκες προσομοιώσεις SDN. Η ικανότητά του να προσομοιώνει σύγχρονα σενάρια δικτύου, όπως το IoT και το 5G, είναι όλο και πιο σημαντική σε περιβάλλοντα SDN.

Ενώ το NS-3 είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για προσομοιώσεις δικτύου, δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τη δοκιμή σε ένα φυσικό περιβάλλον

δικτύου. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των μοντέλων και των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται. Αυτοί οι περιορισμοί και οι βέλτιστες πρακτικές αντιμετωπίζονται συχνά σε τεχνικές συζητήσεις και φόρουμ.

Συνοπτικά, ο NS-3 είναι ένας εξαιρετικά αποτελεσματικός και αξιόπιστος προσομοιωτής δικτύου για προσομοιώσεις SDN, προσφέροντας ακριβή μοντελοποίηση δικτύου, επεκτασιμότητα και ολοκληρωμένη υποστήριξη πρωτοκόλλου. Χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα και ανάπτυξη, αντικατοπτρίζοντας την αποτελεσματικότητά του. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε τους περιορισμούς απόδοσης και επεκτασιμότητας και την αναγκαιότητα συμπλήρωσης προσομοιώσεων με πραγματικές δοκιμές για ολοκληρωμένη επικύρωση. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση διασφαλίζει ότι το NS-3 παραμένει ένα πολύτιμο εργαλείο στο δυναμικό πεδίο της προσομοίωσης δικτύου και της έρευνας SDN.

4.4 Ασφάλεια

➤ Mininet

Στις προσομοιώσεις SDN με Mininet, η βελτίωση των βασικών ιδιοτήτων ασφάλειας, όπως η εμπιστευτικότητα, η ακεραιότητα και η διαθεσιμότητα είναι αρκετά σημαντικές. Ωστόσο, οι πολυπλοκότητες και η δυναμική φύση των αρχιτεκτονικών SDN, όπως αναπαράγονται στις προσομοιώσεις Mininet, παρουσιάζουν ένα σύνολο προκλήσεων ασφάλειας. Τα εικονικά δίκτυα που προσομοιώνονται στο Mininet στοχεύουν να ενισχύσουν αυτές τις ιδιότητες ασφαλείας, ωστόσο είναι συχνά ευάλωτα σε ένα φάσμα απειλών στον κυβερνοχώρο που μπορεί να επηρεάσουν σοβαρά την απόδοση του δικτύου και να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια.

Οι απειλές στις προσομοιώσεις SDN του Mininet δεν είναι ομοιόμορφες αλλά ποικίλουν σε διαφορετικά επίπεδα δικτύου. Αυτή η πολυεπίπεδη ευπάθεια παρουσιάζει μια πολύπλευρη πρόκληση ασφάλειας. Για παράδειγμα, η εισαγωγή αντικρουόμενων νέων κανόνων σε διάφορους τομείς εντός του SDN μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές παραβιάσεις της ασφάλειας, επηρεάζοντας

αρνητικά τη σταθερότητα και την ασφάλεια του δικτύου. Αυτές οι παραβιάσεις μπορεί να κυμαίνονται από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και παραβίαση δεδομένων έως πιο εξελιγμένες απειλές, όπως επιθέσεις κατανεμημένης άρνησης υπηρεσίας (DDoS) και επιθέσεις man-in-the-middle, οι οποίες μπορούν να υπονομεύσουν την ακεραιότητα και το απόρρητο του δικτύου.

Η ικανότητα του Mininet να μιμείται με ακρίβεια τοπολογίες SDN, με πολλούς κεντρικούς υπολογιστές, διακόπτες και συνδέσεις με ελεγκτές SDN όπως το OpenDaylight, είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη και τη δοκιμή ισχυρών στρατηγικών ασφαλείας σε περιβάλλοντα SDN. Αυτή η τοπολογική ακρίβεια επιτρέπει μια ρεαλιστική προσομοίωση περιβαλλόντων SDN, η οποία είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων μηχανισμών και πρωτοκόλλων ασφαλείας.

Ωστόσο, ένα κρίσιμο στοιχείο στη χρήση του Mininet για προσομοιώσεις SDN είναι το χάσμα μεταξύ προσομοιωμένων περιβαλλόντων και πραγματικών σεναρίων, ιδιαίτερα όσον αφορά την ασφάλεια. Η πιστότητα της εξομοίωσης του Mininet μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το αποτέλεσμα και την αποτελεσματικότητα των αξιολογήσεων στρατηγικής ασφαλείας. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι ενώ το Mininet παρέχει μια αποτελεσματική πλατφόρμα για θεωρητικές και αρχικές πρακτικές δοκιμές, ενδέχεται να μην αποτυπώσει πλήρως τις περιπλοκές και την απρόβλεπτη φύση των πραγματικών προκλήσεων ασφαλείας.

Οι Basnet και Shakyia στη εργασία τους [\[34\]](#) συζητούν για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain που αντιπροσωπεύει μια πρωτοποριακή προσέγγιση για τη βελτίωση της ασφαλείας σε περιβάλλοντα SDN. Αυτή η ενοποίηση θα μπορούσε ενδεχομένως να φέρει επανάσταση στον τρόπο διαχείρισης της ασφαλείας δικτύου στις προσομοιώσεις, προσφέροντας μια νέα προοπτική. Τα χαρακτηριστικά της αποκέντρωσης, και της διαφάνειας του Blockchain ευθυγραμμίζονται καλά με τη δυναμική και πολύπλοκη φύση του SDN. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο ισχυρών και ανθεκτικών μηχανισμών ασφαλείας, ικανών να αντιμετωπίσουν τις μοναδικές προκλήσεις και τα τρωτά σημεία που υπάρχουν στις αρχιτεκτονικές SDN.

Επιπλέον, αυτή η ενοποίηση θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως μοντέλο για την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain σε σενάρια SDN πραγματικού κόσμου, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τις πρακτικές εφαρμογές και τους περιορισμούς της.

Συμπερασματικά, το Mininet διαδραματίζει βασικό ρόλο στην προώθηση της έρευνας SDN, ειδικά στον τομέα της ασφάλειας δικτύου. Η ικανότητα του εργαλείου να δημιουργεί λεπτομερείς και ρεαλιστικές τοπολογίες δικτύου παρέχει μια ανεκτίμητη πλατφόρμα για την κατανόηση, την ανάπτυξη και τη δοκιμή διαφόρων λύσεων ασφαλείας εντός πλαισίων SDN. Ωστόσο, η αναγνώριση των περιορισμών του Mininet για την ακριβή αναπαραγωγή των πολυπλοκοτήτων των πραγματικών δικτυακών περιβαλλόντων είναι ζωτικής σημασίας. Αυτή η κατανόηση είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση ότι οι στρατηγικές ασφαλείας που αναπτύσσονται και δοκιμάζονται στο προσομοιωμένο περιβάλλον του Mininet είναι αποτελεσματικές και πρακτικές όταν εφαρμόζονται σε πραγματικές υλοποιήσεις δικτύου. Έτσι, ενώ το Mininet παίζει καθοριστικό ρόλο στην έρευνα ασφαλείας για το SDN, μια διαφοροποιημένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τα όρια εξομοίωσής του είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αξιόπιστων και ισχυρών στρατηγικών ασφαλείας.

➤ **CloudSimSDN**

Το CloudSimSDN δεν είναι εγγενώς ένα εργαλείο που εστιάζει στην ασφάλεια ωστόσο η εφαρμογή του παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική της ασφάλειας του δικτύου στα δίκτυα SDN και cloud.

Η ικανότητα του CloudSimSDN να προσομοιώνει περιβάλλοντα SDN και NetworkFunctionVirtualization (NFV) είναι βασική για την κατανόηση των σύγχρονων αρχιτεκτονικών ασφαλείας δικτύου. Με την ακριβή μοντελοποίηση αυτών των δομών δικτύου προσφέρει πληροφορίες για τις επιπτώσεις της ασφάλειας διαφόρων σχεδίων. Πηγές όπως η τεχνική τεκμηρίωση και οι ακαδημαϊκές εργασίες στο CloudSimSDN ρίχνουν φως στις δυνατότητες μοντελοποίησης δικτύου και τον αντίκτυπό τους στην ασφάλεια του δικτύου.

Στην εργασία των Son και Buyya[35] τονίζεται η σημασία της κρυπτογράφησης πακέτων ελέγχου SDN μεταξύ switches και controllers. Αυτή η κρυπτογράφηση είναι απαραίτητη για την προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση δεδομένων, διασφαλίζοντας την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα των λειτουργιών του δικτύου. Επιπλέον, το έγγραφο υπογραμμίζει την κρισιμότητα της προστασίας του ελεγκτή SDN από μη φυσιολογική πρόσβαση, ένα κομβικό σημείο για τη διατήρηση της σταθερότητας και της ασφάλειας του δικτύου.

Η εργασία ρίχνει επίσης φως στην ευαισθησία των αρχιτεκτονικών SDN σε επιθέσεις DDoS, ένα ζήτημα που πρέπει να λαμβάνει υπόψη το CloudSimSDN στις προσομοιώσεις του. Το κοινόχρηστο περιβάλλον δικτύου στις ρυθμίσεις cloud απαιτεί αυστηρά μέτρα ασφαλείας για την εξασφάλιση προστασίας από παραβιάσεις δεδομένων. Αυτή η πτυχή της ασφάλειας δικτύου είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας των μεμονωμένων χώρων.

Ενώ το CloudSimSDN δεν είναι ένα ειδικό εργαλείο προσομοίωσης ασφαλείας, η ικανότητά του να μοντελοποιεί με ακρίβεια περιβάλλοντα SDN και NFV είναι ανεκτίμητη για την ανάλυση πλαισίων ασφαλείας δικτύου. Με την προσομοίωση διαφόρων σχεδίων και πολιτικών δικτύου, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την ασφάλεια, το CloudSimSDN παρέχει μια πλατφόρμα για την αξιολόγηση του αντίκτυπου αυτών των διαμορφώσεων στη συνολική ασφάλεια και ανθεκτικότητα του δικτύου.

Στην έρευνα και τον ακαδημαϊκό χώρο, το CloudSimSDN χρησιμεύει ως ένα ζωτικό εργαλείο για την κατανόηση των τρωτών σημείων του δικτύου και την εκπαίδευση σχετικά με τις έννοιες ασφαλείας SDN. Οι δυνατότητες προσομοίωσης του επιτρέπουν τον πειραματισμό και τη δημιουργία πρωτοτύπων νέων αλγορίθμων και αρχιτεκτονικών ασφαλείας σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον SDN/cloud.

Η εργασία προτείνει επίσης τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του CloudSimSDN με εξωτερικά εργαλεία ασφαλείας. Αυτή η ενοποίηση μπορεί να βελτιώσει

την προσομοίωση συγκεκριμένων σεναρίων ασφαλείας, παρέχοντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του τοπίου ασφαλείας σε περιβάλλοντα SDN.

Ουσιαστικά, ενώ το CloudSimSDN δεν είναι εγγενώς σχεδιασμένο για προσομοίωση ασφάλειας, οι δυνατότητές του στην προσομοίωση περιβαλλόντων SDN προσφέρουν κρίσιμες πληροφορίες για την ασφάλεια του δικτύου. Με την ακριβή μοντελοποίηση των αρχιτεκτονικών δικτύων και τη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης με εργαλεία ασφαλείας, το CloudSimSDN γίνεται ένας σημαντικός πόρος για την κατανόηση και την αντιμετώπιση των προκλήσεων ασφαλείας στα δίκτυα SDN και cloud. Ωστόσο, η άμεση εφαρμογή του στην προσομοίωση συγκεκριμένων επιθέσεων ασφαλείας ή άμυνας είναι περιορισμένη, υπογραμμίζοντας τη σημασία της χρήσης του σε συνδυασμό με άλλα εξειδικευμένα εργαλεία ασφαλείας.

➤ NS-3

Ο προσομοιωτής NS-3 αν και ούτε αυτός δεν έχει σχεδιαστεί για λεπτομερή ανάλυση ασφάλειας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τα τρωτά σημεία του δικτύου και τους μηχανισμούς ασφαλείας στις προσομοιώσεις SDN.

Η εργασία των Garg κ.ά.[\[36\]](#)εξετάζει διάφορα θέματα ασφάλειας αν και επικεντρώνεται κυρίως σε δίκτυα 5G, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με πτυχές ασφάλειας σε περιβάλλοντα SDN που μπορούν να προεκταθούν σε προσομοιώσεις NS-3. Το βασικό στοιχείο για τις προσομοιώσεις NS-3 σε περιβάλλοντα SDN είναι η κρίσιμη σημασία των ισχυρών πρωτοκόλλων ασφαλείας για την αντιμετώπιση εγγενών τρωτών σημείων. Η εξερεύνηση της εργασίας ενός πρωτοκόλλου ελέγχου ταυτότητας με βάση κρυπτογραφική καμπύλη και μιας μονάδας ανίχνευσης εισβολής, αν και εντός ενός πλαισίου 5G, υπογραμμίζει την αναγκαιότητα προηγμένων μηχανισμών ασφαλείας στις αρχιτεκτονικές SDN.

Στις προσομοιώσεις NS-3 που επικεντρώνονται στο SDN, παρόμοιες προκλήσεις ασφαλείας, όπως ο αμοιβαίος έλεγχος ταυτότητας, η αντίσταση σε διάφορες επιθέσεις στον κυβερνοχώρο (π.χ. υποκλοπή, επανάληψη, παρακολούθηση και πλαστογράφηση) και η διασφάλιση της ακεραιότητας και του απορρήτου των δεδομένων είναι πρωταρχικής σημασίας. Η χρήση του

NS-3 στην αξιολόγηση του προτεινόμενου πλαισίου ασφαλείας στο έγγραφο υπογραμμίζει την ικανότητά του να προσομοιώνει πολύπλοκα σενάρια δικτύου και να αξιολογεί την αποτελεσματικότητα των λύσεων ασφαλείας σε μια εγκατάσταση SDN.

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στο έγγραφο για την ανίχνευση εισβολής, όπως η μείωση διαστάσεων με βάση τον tensor και η ομαδοποίηση Fuzzy C-Means, μπορεί να είναι ιδιαίτερα διορατικές για προσομοιώσεις NS-3. Αυτές οι μέθοδοι αντιμετωπίζουν τα προβλήματα του χειρισμού δεδομένων πολλών διαστάσεων και του αποτελεσματικού εντοπισμού πιθανών εισβολών στο δίκτυο, τα οποία είναι κοινά ζητήματα σε περιβάλλοντα SDN.

Επιπλέον, η προσέγγιση της εργασίας για την αξιολόγηση του αντίκτυπου στους πόρους του συστήματος ρίχνει φως στην κρίσιμη ισορροπία μεταξύ της διατήρησης ισχυρών μέτρων ασφαλείας και της διασφάλισης της βέλτιστης απόδοσης του συστήματος. Αυτή η πτυχή είναι ιδιαίτερα σημαντική στις προσομοιώσεις NS-3 που επικεντρώνονται στην ασφάλεια SDN. Η αξιολόγηση της μελέτης του γενικού κόστους υπολογισμού και επικοινωνίας που σχετίζονται με τα προτεινόμενα πρωτόκολλα ασφαλείας δείχνει την ανάγκη αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας και των απαιτήσεων πόρων των λύσεων ασφαλείας. Μια τέτοια ανάλυση είναι σημαντική για τις προσομοιώσεις NS-3 προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι υλοποιήσεις ασφαλείας δεν επηρεάζουν αρνητικά τη συνολική λειτουργικότητα και απόδοση του δικτύου.

Συνοπτικά, ενώ η εργασία επικεντρώνεται στο 5G, η εις βάθος εξέταση των θεμάτων και των λύσεων ασφάλειας SDN προσφέρει πολύτιμες γνώσεις για τη διεξαγωγή ανάλυσης υψηλού επιπέδου της ασφάλειας NS-3 σε προσομοιώσεις SDN. Η λύση έγκειται στην προσαρμογή των αρχών, των μεθοδολογιών και των ευρημάτων στις ιδιαιτερότητες των ζητημάτων ασφάλειας NS-3 και SDN.

4.5 Ικανοποίηση απαιτήσεων μετρήσεων από τα εργαλεία

4.5.1 Ακρίβεια

Κάθε εργαλείο από τα Mininet, CloudSimSDN και NS-3, έχει μοναδικά χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για συγκεκριμένα περιβάλλοντα δικτύου και σενάρια. Η κατανόηση των δυνατοτήτων ακριβείας τους είναι σημαντικά για την επιλογή του σωστού εργαλείου για εργασίες προσομοίωσης δικτύου.

Η ακρίβεια των μετρήσεων των τριών εργαλείων εξετάζεται πειραματικά στην επόμενη ενότητα.

4.5.2 Πόροι

➤ Mininet

Το Mininet είναι γνωστό για την ευκολία χρήσης του, την απλή εγκατάσταση και την αποτελεσματικότητά του στην εξομοίωση τοπολογιών δικτύου. Συγκεκριμένα, είναι σε θέση να δημιουργήσει δίκτυα με δεκάδες εικονικούς switches και εικονικούς hosts μέσα σε λίγα μόνο δευτερόλεπτα.

Ωστόσο ένας σημαντικός περιορισμός του Mininet είναι η εξάρτησή του από τους πόρους της μηχανής που χρησιμοποιείται. Η αποτελεσματικότητα του Mininet ισχύει εφόσον οι πόροι που απαιτούνται για τα πειράματα δεν υπερβαίνουν αυτό που μπορεί να προσφέρει ένα μόνο μηχάνημα. Αυτό σημαίνει ότι το Mininet είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις δικτύου μικρότερης κλίμακας ή λιγότερης χρήσης πόρων. Σε περιπτώσεις όπου γίνεται υπέρβαση των φυσικών πόρων του κεντρικού υπολογιστή, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης ενδέχεται να μην ευθυγραμμίζονται με εκείνα ενός πραγματικού σεναρίου. Αυτός ο περιορισμός υπογραμμίζει την ανάγκη για επεκτασιμότητα και διαχείριση πόρων στα εργαλεία εξομοίωσης δικτύου.

Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, η εργασία των DiLenak *α.* [\[20\]](#) προτείνει εργαλεία όπως το Maxinet και το MininetClusterEdition (MininetCE). Αυτά τα εργαλεία επεκτείνουν τις δυνατότητες του Mininet επιτρέποντάς του να διανέμεται σε ένα σύμπλεγμα κόμβων. Το Maxinet, για παράδειγμα, δημιουργεί διαφορετικές παρουσίες

Mininet σε κάθε φυσικό κόμβο ενός συμπλέγματος και συνδέει τους εικονικούς διακόπτες σε αυτούς τους κεντρικούς υπολογιστές χρησιμοποιώντας GRE. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την επεκτασιμότητα του Mininet και επιτρέπει την ακριβέστερη εξομοίωση μεγαλύτερων και πιο εντατικών πόρων τοπολογιών δικτύου.

Συνοπτικά, ενώ το Mininet είναι εξαιρετικά αποδοτικό και φιλικό προς το χρήστη για την εξομοίωση τοπολογιών δικτύου σε έναν μόνο κεντρικό υπολογιστή, η χωρητικότητά του περιορίζεται από τους πόρους αυτού του κεντρικού υπολογιστή.

➤ **CloudSimSDN**

Το CloudSimSDN, είναι ένα καινοτόμο event-driven εργαλείο προσομοίωσης αποτελεσματικό για την προσομοίωση της εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου και σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους και edge. Ο σχεδιασμός του, επικεντρωμένος στην προσομοίωση γεγονότων δικτύου σε πραγματικό χρόνο, είναι ιδιαίτερα ικανός στη μοντελοποίηση και τη διαχείριση πόρων δικτύου και υπολογιστών σε δυναμικές συνθήκες. Αυτή η ικανότητα είναι κρίσιμης σημασίας στον edge και στο cloud, όπου η διαχείριση πόρων είναι σημαντική για τη διασφάλιση της αποδοτικότητας και της βέλτιστης απόδοσης.

Η ακρίβεια του πλαισίου στη διαχείριση πόρων του έγκειται στην έμφαση που δίνει στη σημασία της ακριβούς δημιουργίας προφίλ και μοντελοποίησης των δεδομένων του πραγματικού κόσμου. Για σενάρια που απαιτούν υψηλή ακρίβεια στην αξιολόγηση και την πρόβλεψη, ειδικά όσον αφορά παραμέτρους που σχετίζονται με την υποδομή, η ακρίβεια του CloudSimSDN εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του προφίλ δεδομένων και της μοντελοποίησης. Η ακριβής αναπαραγωγή των πραγματικών συνθηκών εντός του περιβάλλοντος προσομοίωσης είναι επομένως απαραίτητη για την επίτευξη αποτελεσμάτων υψηλής πιστότητας[9].

Με πιθανές επεκτάσεις στον ορίζοντα, το CloudSimSDN είναι προορισμένο να γίνει ένα ακόμη πιο ισχυρό όργανο για προσομοίωση δικτύου,

αντιμετωπίζοντας την πολυπλοκότητα και τη δυναμική φύση των πόρων των σύγχρονων δικτυακών περιβαλλόντων.

➤ **NS-3**

Στις SDN προσομοιώσεις με NS-3, ιδιαίτερα εκείνες που αντιμετωπίζουν σύνθετα σενάρια δικτύων οι πόροι διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο. Το περιβάλλον προσομοίωσης που παρέχεται από το NS-3 αξιοποιείται για τη μοντελοποίηση και ανάλυση της συμπεριφοράς των δικτύων SDN σε ένα ρεαλιστικό πλαίσιο.

Ο πρωταρχικός πόρος σε αυτές τις προσομοιώσεις είναι η υπολογιστική ικανότητα η οποία είναι κρίσιμη για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων ενός δικτύου μεγάλης κλίμακας. Η κατανομή πόρων είναι ζωτικής σημασίας για την επεξεργασία των εργασιών και την αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας δεδομένων.

Ένας άλλος σημαντικός πόρος σε αυτές τις προσομοιώσεις είναι η χωρητικότητα αποθήκευσης. Καθώς τα δίκτυα παράγουν και επεξεργάζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων, η επαρκής αποθήκευση είναι ζωτικής σημασίας.

Συνοπτικά, οι προσομοιώσεις NS-3 SDN επικεντρώνονται στην αποτελεσματική διαχείριση και χρήση βασικών πόρων όπως η υπολογιστική ισχύς και η χωρητικότητα αποθήκευσης. Αυτοί οι πόροι είναι αναπόσπαστοι στην ικανότητα της προσομοίωσης να μοντελοποιεί και να αναλύει με ακρίβεια την απόδοση του SDN.[19]

4.5.3 Γενικότητα

➤ **Mininet**

Το Mininet ξεχωρίζει ως βασικό εργαλείο, χάρη στην εξαιρετική γενικότητα και ευελιξία του. Αυτή η γενικότητα είναι κυρίως εμφανής στην ικανότητα του Mininet να προσομοιώνει ένα ευρύ φάσμα τοπολογιών και σεναρίων δικτύου, που κυμαίνονται από απλές γραμμικές έως πολύπλοκες

προσαρμοσμένες διαμορφώσεις. Αυτή η ευελιξία είναι απαραίτητη για τους ερευνητές που στοχεύουν να μελετήσουν διαφορετικές καταστάσεις δικτύου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, διευρύνοντας έτσι το πεδίο εφαρμογής και τη δυνατότητα εφαρμογής των μελετών τους.

Περαιτέρω ενίσχυση της γενικότητάς του είναι η συμβατότητα του Mininet με διάφορους ελεγκτές SDN, συμπεριλαμβανομένων, ενδεικτικά, των OpenDaylight, Pox και Floodlight. Αυτή η συμβατότητα πολλαπλών ελεγκτών όχι μόνο διευκολύνει ένα εύελκτο περιβάλλον δοκιμών, αλλά είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την ολοκληρωμένη έρευνα SDN, τοποθετώντας το Mininet ως ένα εργαλείο καθολικής εφαρμογής σε διαφορετικές πλατφόρμες ελεγκτών.

Εξίσου σημαντική είναι η δυνατότητα του Mininet να προσομοιώνει ρεαλιστικά περιβάλλοντα δικτύου εκτελώντας πραγματικό κώδικα πυρήνα, switch και εφαρμογής. Αυτή η ικανότητα διασφαλίζει ότι οι προσομοιώσεις αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες του πραγματικού δικτύου όσο το δυνατόν περισσότερο, ενισχύοντας έτσι την εγκυρότητα και τη δυνατότητα μεταφοράς των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, η επεκτασιμότητα του Mininet είναι ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό, που επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση προσομοιώσεων μεγάλων δικτύων. Υποστηρίζει σημαντικό αριθμό switches και κεντρικών υπολογιστών, διατηρώντας υψηλή απόδοση χωρίς αξιοσημείωτη υποβάθμιση, παράγοντας που είναι κρίσιμος για την εφαρμογή του τόσο σε μικρής κλίμακας εκπαιδευτικά πειράματα όσο και σε μεγαλύτερα, πιο περίπλοκα ερευνητικά σενάρια.

Η επεκτασιμότητα του εργαλείου μέσω του Python API συμβάλλει περαιτέρω στην ευρεία εφαρμογή του. Αυτή η προσαρμογή επιτρέπει στους ερευνητές να προσαρμόσουν το Mininet σε συγκεκριμένες πειραματικές απαιτήσεις, επεκτείνοντας τη χρησιμότητά του πέρα από τις τυπικές δυνατότητες και ενισχύοντας ένα ευνοϊκό περιβάλλον για καινοτομία και εξερεύνηση σε διαμορφώσεις δικτύου και λύσεις SDN.

Συμπερασματικά, η γενικότητα του Mininet στην προσομοίωση και εξομοίωση δικτύων SDN εκδηλώνεται μέσω της υποστήριξής του για διαφορετικές τοπολογίες δικτύου, ενσωμάτωση με πολλαπλούς ελεγκτές SDN, ρεαλιστική εξομοίωση περιβαλλόντων δικτύου, δυνατότητα κλιμάκωσης και προσαρμογής, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη χρησιμότητα του τόσο σε εκπαιδευτικά όσο και ερευνητικά πλαίσια. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν συλλογικά το Mininet μια απαραίτητη, ισχυρή και ευέλικτη πλατφόρμα, καθοριστική για την προώθηση της έρευνας και εκπαίδευσης SDN και ιδανική επιλογή για τη διεξαγωγή ενός ευρέος φάσματος πειραμάτων και ερευνών σχετικά με τη δυναμική των δικτύων SDN.

➤ **CloudSimSDN**

Το CloudSimSDN ξεχωρίζει για την αξιοσημείωτη γενικότητα και την προσαρμοστικότητά του σε διάφορα σενάρια δικτύου. Η ευελιξία του είναι εξίσου αξιοσημείωτη, επιτρέποντας την προσαρμογή των διαμορφώσεων δικτύου σε ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι σημαντική σε σενάρια SDN, όπου οι συνθήκες και οι απαιτήσεις δικτύου είναι διαφορετικές και συνεχώς μεταβαλλόμενες.

Η επεκτασιμότητα του CloudSimSDN είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του. Αυτή η επεκτασιμότητα είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση περιβαλλόντων δικτύου διαφόρων μεγεθών και πολυπλοκότητας. Επιπλέον, η αξιοπιστία του CloudSimSDN στη διατήρηση της απόδοσης του δικτύου είναι σημαντική, διασφαλίζοντας σταθερές και συνεχείς λειτουργίες, μια κρίσιμη πτυχή για τις εφαρμογές δικτύου.

Οι Sonk.α. στην εργασία τους [\[9\]](#) υπογραμμίζουν την γενικότητα του CloudSimSDN. Το έγγραφο αναφέρει την ευελιξία του CloudSimSDN σε διάφορα σενάρια SDN, αποδεικνύοντας ότι είναι ένα ανεκτίμητο εργαλείο για εργασίες προσομοίωσης και βελτιστοποίησης δικτύου. Η ικανότητά του να χειρίζεται διαφορετικές κλίμακες δικτύου, από μικρές έως μεγάλες διαμορφώσεις, τονίζει την ευρεία εφαρμογή του στον τομέα της διαχείρισης δικτύου. Δεδομένων των αποδεδειγμένων

χαρακτηριστικών του, το CloudSimSDN δείχνει ισχυρές δυνατότητες υλοποίησης σε πραγματικό κόσμο σε διάφορα περιβάλλοντα SDN.

Οι πληροφορίες που παρέχονται στο έγγραφο θέτουν τα θεμέλια για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη, ιδιαίτερα στη βελτιστοποίηση των τοποθετήσεων ελεγκτών SDN. Αυτό συμβάλλει σημαντικά στην εξέλιξη των τεχνολογιών SDN και υποδεικνύει την προοδευτική φύση του CloudSimSDN στην έρευνα δικτύου.

Ουσιαστικά, η γενικότητα και η δυνατότητα εφαρμογής του CloudSimSDN σε περιβάλλοντα SDN, όπως τεκμηριώνεται από την εργασία, είναι κρίσιμες για την κατανόηση του ρόλου του στην τρέχουσα και μελλοντική προσομοίωση και διαχείριση δικτύου. Η αποτελεσματικότητά του, η ευελιξία, η επεκτασιμότητα και η αξιοπιστία του το καθιστούν απαραίτητο πόρο στη προσομοίωση του SDN, ανοίγοντας το δρόμο για καινοτόμες λύσεις και προόδους.

➤ NS-3

Η γενικότητά του NS-3 στις προσομοιώσεις SDN, είναι πολύπλευρη και κρίσιμη για την προώθηση τόσο της ακαδημαϊκής εξερεύνησης όσο και της ανάπτυξης πρακτικών λύσεων δικτύου.

Η ενσωμάτωση του NS-3 με το moduleOpenFlow 1.3 (OFSwitch13), σηματοδοτεί ένα σημαντικό βήμα στην εξέλιξή του [\[22\]](#). Αυτή η συμβατότητα επεκτείνει τις δυνατότητες προσομοίωσης του NS-3 για την αποτελεσματική μοντελοποίηση και ανάλυση δικτύων SDN. Επιτρέπει σε ερευνητές και προγραμματιστές να εμβαθύνουν στις αποχρώσεις των συμπεριφορών SDN, διευκολύνοντας μια βαθύτερη κατανόηση και καινοτομία σε αυτόν τον τομέα.

Η υποστήριξη διπλής γλώσσας για scripting στο NS-3, που περιλαμβάνει τόσο τη C++ όσο και την Python, υπογραμμίζει την ευελιξία και την περιεκτικότητά του. Αυτή η ευελιξία στο περιβάλλον ανάπτυξης είναι σημαντική για την κάλυψη διαφορετικών ερευνητικών αναγκών και μεθοδολογιών. Ο συνδυασμός της προσβασιμότητας της Python και των

δυνατοτήτων απόδοσης της C++ καθιστά το NS-3 μια προτιμώμενη πλατφόρμα για ένα ευρύ πεδίο σεναρίων προσομοίωσης δικτύου.

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός του NS-3, που χαρακτηρίζεται από ένα εκτεταμένο πλήθος libraries δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να διεξάγουν λεπτομερείς προσομοιώσεις αποστολής πακέτων δεδομένων. Η open-source διανομή του NS-3 ενθαρρύνει τροποποιήσεις και επεκτάσεις, ενισχύοντας περαιτέρω την εφαρμογή του σε συγκεκριμένες ερευνητικές απαιτήσεις.

Η συμβατότητα του NS-3 σε διάφορα λειτουργικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των Linux, macOS και Windows (μέσω περιβαλλόντων όπως το Cygwin), διασφαλίζει την προσβασιμότητά του σε ένα ευρύ φάσμα χρηστών. Αυτή η υποστήριξη πολλαπλών πλατφορμών είναι καθοριστική για να γίνει το NS-3 ένα παγκόσμιο εργαλείο για τη δικτύωση έρευνας και εκπαίδευσης.

Συνοπτικά, η εξέχουσα θέση του NS-3 στην προσομοίωση δικτύου πηγάζει από την ολοκληρωμένη υποστήριξη λειτουργικών μονάδων SDN, το ευέλικτο περιβάλλον ανάπτυξης, τη συμμόρφωση με τις θεμελιώδεις αρχές προγραμματισμού δικτύου, το εκτεταμένο σύστημα βιβλιοθηκών και την προσβασιμότητα από ευρεία πλατφόρμα.. Η ικανότητά του να προσαρμόζεται και να ενσωματώνεται με τις εξελισσόμενες τεχνολογίες SDN διασφαλίζει ότι το NS-3 παραμένει ένα ζωτικό και σχετικό πλεονέκτημα στο δυναμικό τοπίο της σύγχρονης έρευνας δικτύου.

4.5.4 Απλότητα

➤ Mininet

Το Mininet, είναι γνωστό για την απλότητά του το οποίο αποτελεί κρίσιμο στοιχείο τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε επαγγελματικό τοπίο. Αυτή η απλότητα, η οποία διαπερνά διάφορες πτυχές του σχεδιασμού και της λειτουργικότητάς του, καθιστά το Mininet απαραίτητο εργαλείο για ένα ευρύ φάσμα χρηστών, από φοιτητές και εκπαιδευτικούς έως ερευνητές και επαγγελματίες του δικτύου.

Η ευκολία εγκατάστασης και χρήσης είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του Mininet. Με τη δυνατότητα εκκίνησης μιας προσομοίωσης δικτύου χρησιμοποιώντας μία μόνο εντολή (sudo mn), το Mininet συστήνει τη προσομοίωση δικτύου σε ένα ευρύ κοινό, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων με περιορισμένο τεχνικό υπόβαθρο. Η γραμμή εντολών του Mininet (CLI) ενισχύει περαιτέρω αυτήν την απλότητα, προσφέροντας απλές εντολές (help, net, nodes, links, dump) που επιτρέπουν στους χρήστες να χειρίζονται με ευκολία τις τοπολογίες δικτύου.

Η χρήση εικονικοποίησης του Mininet προσφέρει γρήγορες ταχύτητες προσομοίωσης, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητά του και τη φιλικότητα προς τον χρήστη. Αυτή η δυνατότητα γρήγορου testing είναι ένας σημαντικός λόγος για τη δημοτικότητά του στις εξομοιώσεις SDN.

Ο προγραμματισμός σε Python του Mininet είναι καθοριστικός στην απλότητά του. Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν και να προσαρμόσουν τις τοπολογίες δικτύου, επιτρέποντας τη δημιουργία διαφορετικών σεναρίων δικτύου για εκπαιδευτικούς και πειραματικούς σκοπούς. Αυτή η δυνατότητα όχι μόνο προσφέρει ευελιξία στη σχεδίαση δικτύου αλλά απλοποιεί επίσης τη διαδικασία διαμόρφωσης δικτύου, ευθυγραμμίζοντας με τις ανάγκες διαφόρων πειραμάτων και μελετών SDN.

Η ενσωμάτωση με controllers SDN στο Mininet είναι αποτελεσματική, διευκολύνοντας την εξομοίωση πολύπλοκων περιβαλλόντων SDN. Αυτή η ενοποίηση είναι ζωτικής σημασίας για την εφαρμογή των βασικών αρχών του SDN, όπως ο διαχωρισμός control-dataplane και η ανάπτυξη εφαρμογών που χρησιμοποιούν το OpenFlow και άλλες τεχνολογίες SDN.

Ουσιαστικά, η απλότητα του Mininet στις προσομοιώσεις SDN πηγάζει από τη φιλική προς τον χρήστη χρήση του, τον προγραμματισμό σε Python, την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με ελεγκτές SDN και την ικανότητα προσομοίωσης αυθεντικών εικονικών δικτύων. Αυτός ο συνδυασμός απλότητας και λειτουργικότητας διασφαλίζει ότι το Mininet παραμένει στην πρώτη γραμμή των εργαλείων προσομοίωσης δικτύου, αναπόσπαστο μέρος της συνεχούς εξέλιξης και εφαρμογής των τεχνολογιών δικτύωσης.

Ωστόσο, όπως επισημαίνουν στην εργασία τους οι Leek.α.[\[23\]](#) το Mininet παρουσιάζει περιορισμούς στην ακριβή μίμηση πιο περίπλοκων και ρεαλιστικών περιβαλλόντων δικτύου. Αυτό το μειονέκτημα υποδηλώνει ότι ενώ το Mininet είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις βασικού έως μεσαίου επιπέδου, μπορεί να μην είναι η ιδανική επιλογή για προηγμένα ή εξαιρετικά ρεαλιστική μοντελοποίηση δικτύου. Αυτή η κατανόηση είναι απαραίτητη για ερευνητές και εκπαιδευτικούς στον τομέα της δικτύωσης, καθώς καθοδηγεί την αποτελεσματική εφαρμογή του Mininet σε σενάρια όπου βρίσκεται πιο συμφέρουσα και κατάλληλη, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της εντός του επιχειρησιακού της πλαισίου.

➤ **CloudSimSDN**

Το CloudSimSDN, ενώ είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση SDN, παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις χρηστικότητας, ιδιαίτερα για χρήστες που είναι νέοι στην πλατφόρμα ή για όσους έχουν περιορισμένο τεχνικό υπόβαθρο στο προγραμματισμό και το SDN.

Ενώ το CloudSimSDN παρέχει τεχνική τεκμηρίωση, συχνά προϋποθέτει έναν ορισμένο βαθμό προϋπάρχουσας γνώσης αποξενώνοντας ενδεχομένως τους αρχάριους ή όσους αναζητούν πιο απλές οδηγίες. Το τεχνικό κομμάτι αν και είναι σημαντικό για προχωρημένους χρήστες, μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για όσους είναι νέοι στο εργαλείο ή στον τομέα.

Η υποστήριξη για το CloudSimSDN είναι μικρότερη σε σύγκριση με πιο καθιερωμένες πλατφόρμες. Αυτή η έλλειψη μιας ισχυρής κοινότητας χρηστών οδηγεί σε λιγότερα σεμινάρια, φόρουμ και πρακτικά παραδείγματα τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη μάθηση, τον πειραματισμό και την αντιμετώπιση προβλημάτων, ειδικά για αρχάριους.

Οι ερευνητικές δημοσιεύσεις στο CloudSimSDN τείνουν να εστιάζουν περισσότερο σε θεωρητικές πτυχές και συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης αντί να προσφέρουν πρακτική καθοδήγηση. Αν και αυτά τα έγγραφα είναι ανεκτίμητα για την κατανόηση των δυνατοτήτων και των εφαρμογών του CloudSimSDN, συνήθως δεν χρησιμεύουν ως λειτουργικοί οδηγοί για νέους χρήστες.

Το υπάρχον περιεχόμενο στο CloudSimSDN είναι άκρως τεχνικό και απαιτεί επάρκεια στον προγραμματισμό Java και πλήρη κατανόηση των εννοιών του υπολογιστικού νέφους και του SDN. Αυτό το επίπεδο τεχνικής μπορεί να τρομάζει όσους δεν έχουν υπόβαθρο σε αυτούς τους τομείς, θέτοντας μια σημαντική καμπύλη μάθησης.

Υπάρχει ένα αξιοσημείωτο κενό στη διαθεσιμότητα περιεκτικών, και εύκολων στην παρακολούθηση guides για το CloudSimSDN. Η ανάπτυξη πιο περιεκτικού εκπαιδευτικού υλικού θα μπορούσαν να βελτιώσουν σημαντικά την προσβασιμότητα του CloudSimSDN. Τέτοιοι πόροι θα πρέπει να στοχεύουν στην εξυπηρέτηση ενός διαφορετικού κοινού, από αρχάριους έως πιο προχωρημένους χρήστες, και θα πρέπει ιδανικά να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ της θεωρητικής κατανόησης και της πρακτικής εφαρμογής.

Ουσιαστικά, το CloudSimSDN, ενώ είναι ένα εξελιγμένο εργαλείο για προσομοιώσεις SDN, παρουσιάζει αξιοσημείωτες προκλήσεις χρηστικότητας, κυρίως λόγω της απότομης καμπύλης εκμάθησης και της έλλειψης πόρων φιλικών για αρχάριους. Η τρέχουσα τεκμηρίωση και το υποστηρικτικό υλικό τείνουν να ευνοούν τους χρήστες με μέση έως προηγμένη κατανόηση της Java και του SDN. Για να διευρυνθεί η χρηστικότητα και η ελκυστικότητά του, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για πιο ολοκληρωμένο, φιλικό προς τον χρήστη εκπαιδευτικό υλικό. Αυτά θα πρέπει να στοχεύουν στην απλοποίηση της λειτουργικότητας του CloudSimSDN και στην προώθηση μιας πιο περιεκτικής εμπειρίας χρήστη, διευκολύνοντας έτσι την ευρύτερη υιοθέτηση αυτού του εργαλείου σε διάφορα εκπαιδευτικά και ερευνητικά πλαίσια. Η ανάπτυξη τέτοιων πόρων όχι μόνο θα ωφελήσει τους αρχάριους χρήστες αλλά θα εμπλουτίσει επίσης την κοινότητα του CloudSimSDN, ενισχύοντας ένα πιο συνεργατικό και υποστηρικτικό περιβάλλον μάθησης.

➤ NS-3

Η απλότητα της χρήσης του NS-3 για προσομοιώσεις SDN είναι ένα θέμα με διάφορες πτυχές, ανάλογα με το ιστορικό και την εμπειρία του χρήστη στη δικτύωση και τον προγραμματισμό.

Η εγκατάσταση του NS-3, ειδικά με το moduleOpenFlow 1.3 (OFSwitch13), μπορεί να είναι κάπως περίπλοκη, ιδιαίτερα στα πιο πρόσφατα λειτουργικά συστήματα Linux, λόγω των νέων standards στις προεπιλεγμένες εκδόσεις του compiler. Η επιτυχής ενσωμάτωση του NS-3 με το module OFSwitch13 απαιτεί την σειρά συγκεκριμένων διαδικασιών, οι οποίες μπορεί να μην είναι απλές για αρχάριους. Η διαδικασία περιλαμβάνει πολλά βήματα και μπορεί να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως αποτυχίες compiler, υποδεικνύοντας ένα ορισμένο επίπεδο πολυπλοκότητας στη ρύθμιση.

Για χρήστες που είναι νέοι στην προσομοίωση δικτύου στο SDN, το NS-3 ενδέχεται να παρουσιάζει μια απότομη καμπύλη μάθησης λόγω της λεπτομερούς και τεχνικής φύσης του. Η κατανόηση των αποχρώσεων της προσομοίωσης δικτύου και η αποτελεσματική χρήση των δυνατοτήτων του NS-3 πιθανότατα θα απαιτούσε σημαντική επένδυση χρόνου και προσπάθειας στη μάθηση και τον πειραματισμό.

Συμπερασματικά, ενώ το NS-3 είναι ένα ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο για προσομοιώσεις SDN, η απλότητα ή η πολυπλοκότητά του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τεχνικό υπόβαθρο και την εξοικείωση του χρήστη με έννοιες προσομοίωσης δικτύου και γλώσσες προγραμματισμού όπως η C++ και η Python. Για έμπειρους χρήστες ή άτομα με ισχυρή τεχνική βάση, το NS-3 προσφέρει εκτεταμένες δυνατότητες και επιλογές προσαρμογής. Ωστόσο, για αρχάριους ή μη προγραμματιστές, το NS-3 μπορεί να παρουσιάζει προκλήσεις λόγω της λεπτομερούς διαδικασίας εγκατάστασης, των απαιτήσεων προγραμματισμού και του βάθους κατανόησης που απαιτείται για την αποτελεσματική χρήση των δυνατοτήτων του για προσομοιώσεις SDN. Η πολυπλοκότητα του NS-3, επομένως, ποικίλλει ανάλογα με την οπτική γωνία και το επίπεδο εμπειρίας του χρήστη.

4.5.5 WiFi- IoT

➤ Mininet

Το Mininet έχει επεκτείνει τη λειτουργικότητά του μέσω του Mininet-IoT και του Mininet-WiFi, επιτρέποντας ολοκληρωμένες προσομοιώσεις του SDN που ενσωματώνουν ασύρματα δίκτυα και Internet of Things (IoT). Αυτή η λειτουργία είναι σημαντική σήμερα που το IoT και η ασύρματη συνδεσιμότητα γίνονται ολοένα και περισσότερο συνυφασμένες με τις υποδομές δικτύου.

Η επέκταση Mininet-IoT επεκτείνεται στις βασικές λειτουργίες του Mininet ενσωματώνοντας εικονικές συσκευές IoT, χρησιμοποιώντας ασύρματα πρότυπα όπως τα προγράμματα οδήγησης ασύρματης προσομοίωσης 6LoWPAN και 802.15.4. Αυτή η ενοποίηση επιτρέπει την εξομοίωση συσκευών IoT εντός προσομοιώσεων δικτύου, μια ζωτική πτυχή για την ολοκληρωμένη κατανόηση της δυναμικής και των συμπεριφορών του δικτύου IoT σε περιβάλλοντα SDN.

Ομοίως, το Mininet-WiFi επεκτείνει τις δυνατότητες του Mininet στον ασύρματο τομέα, κρίσιμο για τις προσομοιώσεις SDN που περιλαμβάνουν δίκτυα Wi-Fi και σενάρια IoT. Παρέχει λειτουργίες για την εξομοίωση ασύρματων δικτύων που ορίζονται από λογισμικό ενσωματώνοντας εικονικούς σταθμούς Wi-Fi και σημεία πρόσβασης. Αυτή η δυνατότητα βασίζεται σε τυπικά προγράμματα οδήγησης ασύρματης σύνδεσης Linux και στο πρόγραμμα οδήγησης ασύρματης προσομοίωσης 80211_hwsim, καθιστώντας το ένα ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση περιβαλλόντων Wi-Fi/IoT.

Σύμφωνα με την εργασία των Alikai Abdulqader [\[24\]](#), το Mininet-WiFi είναι καθοριστικό για την προσομοίωση πιο περίπλοκων τοπολογιών δικτύου. Υποστηρίζει τη δημιουργία σεναρίων δικτύου με πολλαπλά σημεία πρόσβασης, επιτρέποντας την προσομοίωση περίπλοκων ασύρματων δικτύων μέσα σε ένα πλαίσιο SDN. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μελέτη και την επίδειξη των λειτουργιών των ασύρματων δικτύων σε περιβάλλοντα SDN.

Επιπλέον, η συζήτηση της εργασίας σχετικά με την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων IoT-VANET και WiFi-VANET, χρησιμοποιώντας Mininet-IoT και Mininet-WiFi, αντίστοιχα, υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα αυτών

των επεκτάσεων σε ρεαλιστικές προσομοιώσεις δικτύου. Η σύγκριση δείχνει ότι το IoT-VANET, που ενεργοποιείται από το Mininet-IoT, είναι πιο αποτελεσματικό από το WiFi-VANET όσον αφορά την καθυστέρηση και την απόδοση, υπογραμμίζοντας την ικανότητα του Mininet να προσομοιώνει με ακρίβεια προηγμένα σενάρια ασύρματου IoT.

Συμπερασματικά οι επεκτάσεις του Mininet, δηλαδή το Mininet-IoT και το Mininet-WiFi, αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πρόοδο στα εργαλεία προσομοίωσης δικτύου, ιδιαίτερα για περιβάλλοντα SDN που ενσωματώνουν IoT. Η ικανότητά τους να προσομοιώνουν πολύπλοκα σενάρια ασύρματου IoT, όπως διατυπώνεται και στο paper, τα τοποθετεί ως κρίσιμα εργαλεία για ερευνητές και προγραμματιστές στους τομείς SDN και IoT. Ο συνδυασμός αυτών των επεκτάσεων με τις βασικές δυνατότητες του Mininet επιτρέπει την εξερεύνηση προηγμένων ιδεών δικτύωσης, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης δικτύων, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου οι ασύρματες τεχνολογίες και το IoT είναι όλο και πιο σημαντικές.

➤ **CloudSimSDN**

Το CloudSimSDN εστιάζει κυρίως σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους που είναι ενσωματωμένα με το SDN αλλά όσον αφορά τις προσομοιώσεις Wi-Fi/IoT δεν υποστηρίζει εγγενώς τέτοια περιβάλλοντα.

Αν και το ίδιο το CloudSimSDN δεν εξυπηρετεί Wi-Fi/IoT, το ευρύτερο πλαίσιο CloudSim θα μπορούσε ενδεχομένως να επεκταθεί για να συμπεριλάβει σενάρια IoT.

Οι ερευνητές συχνά αξιοποιούν το CloudSim ή τις παραλλαγές του για τη μοντελοποίηση περιβάλλοντος IoT άρα το ευρύτερο πλαίσιο του θα μπορούσε ενδεχομένως να επεκταθεί για να συμπεριλάβει σενάρια IoT. Ωστόσο, η ενσωμάτωση λειτουργιών IoT στο CloudSim ή στο CloudSimSDN απαιτεί ουσιαστική προσαρμογή και ανάπτυξη.

Η ενσωμάτωση του CloudSimSDN με ειδικά εργαλεία προσομοίωσης IoT θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την προσομοίωση περιβαλλόντων cloud-IoT. Ωστόσο, αυτή η ολοκλήρωση θα απαιτούσε

σημαντικές αναπτυξιακές προσπάθειες για να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ προσομοιώσεων κέντρων δεδομένων cloud και προσομοιώσεων δικτύου IoT. Μια τέτοια προσπάθεια θα συνεπαγόταν μια βαθιά κατανόηση τόσο του υπολογιστικού νέφους όσο και της δυναμικής του δικτύου IoT.

Αυτό θα μπορούσε να συνεπάγεται την τροποποίηση του CloudSimSDN για την ενσωμάτωση μοντέλων IoT ή τη δημιουργία ενός υβριδικού πλαισίου προσομοίωσης που συνδυάζει τα δυνατά σημεία του CloudSimSDN με έναν ειδικό προσομοιωτή IoT. Ένα τέτοιο υβριδικό πλαίσιο θα επέτρεπε στους ερευνητές να διερευνήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των κέντρων δεδομένων cloud και των δικτύων IoT, προσφέροντας πληροφορίες για την απόδοση, την επεκτασιμότητα και την αποδοτικότητα.

Συνοπτικά, το CloudSimSDN, όπως έχει σήμερα, δεν υποστηρίζει εγγενώς προσομοιώσεις Wi-Fi ή IoT. Ωστόσο, το ευρύτερο πλαίσιο CloudSim παρέχει μια πιθανή βάση για προσαρμοσμένες εξελίξεις που στοχεύουν στην ενσωμάτωση των αναγκών προσομοίωσης IoT-cloud. Η προοπτική συνδυασμού του CloudSimSDN με τα εργαλεία προσομοίωσης IoT παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη αλλά προκλητική επιλογή για έρευνα, ανοίγοντας δυνατότητες για ολοκληρωμένες προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν τόσο υποδομές υπολογιστικού νέφους όσο και δίκτυα Wi-Fi/IoT. Αυτή η ενοποίηση, αν και θεωρητικά εφικτή, απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια ανάπτυξης και έρευνας για την υλοποίηση ενός περιβάλλοντος προσομοίωσης που αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πολυπλοκότητα και τη δυναμική των ολοκληρωμένων συστημάτων IoT-cloud.

➤ NS-3

Η υλοποίηση WiFi/IoT στο NS-3 δείχνει την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα του εργαλείου στην προσομοίωση πολύπλοκων δικτυακών περιβαλλόντων.

Η υποστήριξη του NS-3 για μια ολοκληρωμένη σειρά WiFi standards, όπως το 802.11a/b/g/n/ac/ax, είναι στοιχείο της ικανότητάς του να προσομοιώνει διάφορα σενάρια IoT. Κάθε πρότυπο καλύπτει διαφορετικές ανάγκες δικτύου

όσον αφορά το εύρος ζώνης και τον ρυθμό δεδομένων, τα οποία είναι κρίσιμα για την ακριβή αναπαράσταση διαφορετικών περιβαλλόντων IoT[25].

Εκτός από τα πρότυπα WiFi, το NS-3 επιτρέπει την προσομοίωση διαφόρων τύπων συσκευών IoT, καθεμία με ξεχωριστές υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες. Αυτό είναι απαραίτητο για τη δημιουργία ρεαλιστικών μοντέλων δικτύων IoT όπου διαφορετικές συσκευές αλληλοεπιδρούν εντός της ίδιας υποδομής δικτύου.

Το NetSim και ο προσομοιωτής IoT στο NS-3 παρέχουν λειτουργίες για την προσομοίωση συσκευών σε ρεαλιστικές συνθήκες και τη διαμόρφωση φυσικών συσκευών και σεναρίων για δίκτυα IoT.

Το NetSim επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν και να αναλύουν την απόδοση των δικτύων IoT χρησιμοποιώντας στοιχεία όπως πύλες 6LoWPAN, πρωτόκολλα δρομολόγησης (π.χ. RPL, AODV) και πρότυπα IEEE 802.15.4 για datalink και physicallayers. Περιλαμβάνει επίσης τη συλλογή ενέργειας, η οποία είναι κρίσιμη για τη διάρκεια και την αποτελεσματικότητα των συσκευών IoT.

Οι δυνατότητες του NetSim στη βελτιστοποίηση διαδρομής για δίκτυα IoT που βασίζονται σε RPL και η προσομοίωση επιθέσεων παρέχουν μια εις βάθος κατανόηση των τρωτών σημείων του δικτύου IoT και των μέτρων ασφαλείας.

Ενώ το NS-3 προσφέρει εκτεταμένες δυνατότητες για προσομοιώσεις WiFi/IoT, υπάρχουν εγγενείς προκλήσεις, όπως η πολυπλοκότητα της ακριβούς αναπαράστασης σεναρίων IoT του πραγματικού κόσμου και η φύση των προσομοιώσεων μεγάλης κλίμακας.

Το NS-3, με το ευρύ φάσμα της υποστήριξης προτύπων WiFi και των δυνατοτήτων προσομοίωσης συσκευών IoT, χρησιμεύει ως ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση δικτύων WiFi/IoT. Η συμπερίληψη των λειτουργιών NetSim και IoT Simulator ενισχύει την ικανότητά του να μοντελοποιεί πολύπλοκα σενάρια IoT, να αναλύει την ενεργειακή απόδοση, να βελτιστοποιεί τη δρομολόγηση και να αξιολογεί την ασφάλεια του δικτύου.

Αυτό καθιστά το NS-3 πολύτιμο πλεονέκτημα για την εξερεύνηση και την ανάπτυξη προηγμένων ιδεών και λύσεων δικτύου WiFi/IoT.

Table4-3: Δυνατότητες εργαλείων [20,21,9,22,23,24,25,26]

Λειτουργία	Mininet + Επεκτάσεις	CloudSimSDN	NS-3
Προσομοίωση SDN	Ναι	Ναι	Ναι
Προδιαγραφή OpenFlow	1.3.1	Εστιασμένο σε αρχές SDN, όχι συγκεκριμένη έκδοση OpenFlow	1.3(με το ofswitch13)
Προσομοίωση Ασύρματου Δικτύου	Ναι (με Mininet-WiFi)	Όχι	Ναι
Προσομοίωση IoT	Ναι (με Mininet-IoT)	Όχι	Ναι
Λειτουργία Emulation	Ναι	Όχι	Ναι
Συμβατότητα με Controller	Ναι	Όχι	Εξαρτάται από την υλοποίηση
Επεκτασιμότητα	Ναι	Ναι	Ναι
Υποστήριξη GUI	Ναι	Όχι	Ναι
Υποστήριξη Προτύπων WiFi	802.11 a/b/g/n/ac/ax	Όχι	802.11 a/b/g/n/ac/ax
Προσομοίωση Σεναρίων με Πολλά AP	Ναι (με Mininet-WiFi)	Όχι	Ναι
Μοντελοποίηση Συσκευών IoT	Ναι (με Mininet-IoT)	Με επεκτάσεις	Ναι
Ρεαλιστική Μοντελοποίηση Κίνησης	Ναι	Με επεκτάσεις	Ναι
Μοντελοποίηση Κατανάλωσης Ενέργειας	Όχι	Όχι	Ναι [25]
Προσομοίωση	Όχι	Όχι	Ναι

Λειτουργία	Mininet + Επεκτάσεις	CloudSimSDN	NS-3
VANET			
Υποστήριξη 6LoWPAN	Ναι (με Mininet-IoT)	Όχι	Ναι
Υποστήριξη 802.15.4	Ναι (με Mininet-IoT)	Όχι	Ναι
Υποστηριζόμενα πρωτόκολλα δικτύου	OpenFlow, OVSDB; P4, NETCONF/YANG, κλπ.	Όχι	OpenFlow, P4 (μέσω επεκτάσεων) κλπ.

Ο παραπάνω πίνακας (Table 4-4) παρέχει μια συγκριτική ανάλυση των Mininet, CloudSimSDN και NS-3, εστιάζοντας στις δυνατότητές τους σε προσομοιώσεις SDN και IoT. Υπογραμμίζει βασικά χαρακτηριστικά, όπως υποστήριξη OpenFlow, προσομοίωση ασύρματου δικτύου, μοντελοποίηση συσκευών IoT και υποστηριζόμενα πρωτόκολλα δικτύου.

Μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων και τεχνολογιών που έχουν προκύψει για την υποστήριξη SDN και προγραμματισμού δικτύου, τα OpenFlow, P4, NETCONF, YANG, RESTCONF, OVSDB, BGP-LS, SegmentRouting, gRPC και Thrift είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτα.

Το OpenFlow είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο στο τοπίο SDN, παρέχοντας μια τυποποιημένη διεπαφή μεταξύ των επιπέδων ελέγχου και προώθησης των συσκευών με δυνατότητα SDN. Επιτρέπει τον απομακρυσμένο προγραμματισμό του επιπέδου προώθησης, επιτρέποντας τη δυναμική διαχείριση της ροής του δικτύου.

Το P4 (ProgrammingProtocol-IndependentPacketProcessors) επεκτείνει τις δυνατότητες των συσκευών δικτύου επιτρέποντας τα επίπεδα δεδομένων τους να προγραμματίζονται για να επεξεργάζονται πακέτα με εξαιρετικά ευέλικτο τρόπο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο Mininet, έναν εξομοιωτή δικτύου SDN, όπου το P4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πολύπλοκων σεναρίων δικτύου. Η χρήση του P4 στο Mininet διευκολύνεται από επεκτάσεις όπως το p4-utils, οι οποίες παρέχουν τα απαραίτητα εργαλεία

και βιβλιοθήκες για την ανάπτυξη και τη δοκιμή προγραμμάτων P4 σε περιβάλλον προσομοίωσης δικτύου[27].

Το NETCONF και το YANG συνεργάζονται για να παρέχουν ένα ισχυρό πλαίσιο για τη διαμόρφωση και τη διαχείριση συσκευών δικτύου. Το NETCONF προσφέρει ένα πρωτόκολλο για την τροποποίηση των διαμορφώσεων δικτύου, ενώ το YANG χρησιμεύει ως γλώσσα μοντελοποίησης για τον καθορισμό της δομής των διαμορφώσεων δικτύου και των δεδομένων κατάστασης.

Το RESTCONF αξιοποιεί το HTTP για τη διαχείριση συσκευών δικτύου, προσφέροντας ένα RESTful API για πρόσβαση σε δεδομένα που ορίζονται στο YANG, απλοποιώντας έτσι τις αλληλεπιδράσεις με συσκευές δικτύου.

Το πρωτόκολλο OVSDB χρησιμοποιείται για τη διαχείριση παρουσιών OpenvSwitch, ένα βασικό στοιχείο σε πολλές αναπτύξεις SDN, επιτρέποντας προσαρμογές δυναμικής διαμόρφωσης δικτύου.

Το BGP-LS και το SegmentRouting εισάγουν προηγμένες δυνατότητες μηχανικής κυκλοφορίας διανέμοντας πληροφορίες τοπολογίας δικτύου και ενσωματώνοντας διαδρομές δρομολόγησης απευθείας στις κεφαλίδες πακέτων, αντίστοιχα.

Το gRPC και το Thrift παρέχουν ισχυρά πλαίσια RPC που υποστηρίζουν αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ υπηρεσιών, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την κατανεμημένη φύση των περιβαλλόντων SDN.

Στο πλαίσιο της έρευνας και ανάπτυξης του SDN, εργαλεία όπως το Mininet, το CloudSimSDN και το NS-3 παίζουν καθοριστικό ρόλο. Το Mininet επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων δικτύων σε ένα μόνο μηχάνημα και η υποστήριξή του για τεχνολογίες SDN, συμπεριλαμβανομένου του P4 μέσω επεκτάσεων όπως το p4-utils, το καθιστά πολύτιμο εργαλείο για τη δημιουργία πρωτοτύπων και τη δοκιμή εφαρμογών SDN.

Το NS-3 παρέχει ενότητες για προσομοίωση ελεγκτών και διακοπών SDN, καθώς και υποστήριξη για OpenFlow. Οι δυνατότητες του NS-3 επεκτείνονται

περαιτέρω μέσω συνεισφορών από την ερευνητική κοινότητα, η οποία περιλαμβάνει μοντέλα για την προσομοίωση προηγμένων σεναρίων δικτύου και πρωτοκόλλων που σχετίζονται με το SDN και τη δυνατότητα προγραμματισμού δικτύου. Ο προσομοιωτής NS-3, που τώρα ενσωματώνει το P4 έως το NS4, επιδεικνύει την προσαρμοστικότητά του στην προσομοίωση προηγμένων σεναρίων SDN, συνδυάζοντας θεωρητικά μοντέλα με πρακτικές εφαρμογές. Αυτή η ενοποίηση, που περιγράφουν λεπτομερώς στο έγγραφο τους οι Bai κ.α. [28], αποτελεί παράδειγμα της δέσμευσης του NS-3 στην εξελισσόμενη έρευνα δικτύου, που επεκτείνεται πέρα από το P4 για να περιλαμβάνει πρωτόκολλα όπως το OpenFlow και άλλα, ζωτικής σημασίας για τις μελέτες SDN.

Το CloudSimSDN, αν και δεν συνδέεται ρητά με μια συγκεκριμένη έκδοση του OpenFlow, έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει αρχές SDN που συνδέονται στενά με τις έννοιες του OpenFlow. Το CloudSimSDN ενδέχεται να μην προσομοιώνει τις λεπτομερείς ιδιαιτερότητες των μηνυμάτων OpenFlow ή των χαρακτηριστικών που αφορούν την έκδοση, αλλά εστιάζει στις πτυχές ενορχήστρωσης και διαχείρισης υψηλότερου επιπέδου του SDN.

Το CloudSimSDN εστιάζει κυρίως στην προσομοίωση των αρχών του SDN σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους, βασιζόμενο στενά στην υποστήριξη και την ενσωμάτωση του OpenFlow για τη διαχείριση της εικονικής δικτυακής υποδομής. Η σαφής αναφορά στην υποστήριξη του P4 και άλλα πρωτόκολλα λείπει από την τρέχουσα τεκμηρίωση. Αυτό υποδηλώνει μια πιθανή ευκαιρία για την κοινότητα SDN να προσθέσει προηγμένες δυνατότητες επεξεργασίας πακέτων μέσω P4, ενισχύοντας την ικανότητα του CloudSimSDN να προσομοιώνει πιο σύνθετα δικτυακά σενάρια. Αυτή η προοπτική για επέκταση τονίζει την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα του CloudSimSDN ως εργαλείου προσομοίωσης, παρέχοντας μια σταθερή βάση για την εξερεύνηση των δυνατοτήτων του SDN πέρα από τις τρέχουσες υλοποιήσεις του OpenFlow.

Συμπερασματικά, το τοπίο του SDN εμπλουτίζεται από ένα ποικίλο σύνολο πρωτοκόλλων και τεχνολογιών που αντιμετωπίζουν διάφορες πτυχές προγραμματισμού και διαχείρισης δικτύου. Εργαλεία όπως το Mininet, το

CloudSimSDN και το NS-3 παρέχουν πολύτιμες πλατφόρμες για την εξερεύνηση και την προώθηση των εννοιών SDN, με το καθένα να συνεισφέρει μοναδικά στο πεδίο. Καθώς το SDN συνεχίζει να εξελίσσεται, η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των πρωτοκόλλων, τεχνολογιών και εργαλείων θα οδηγήσει αναμφίβολα σε νέες καινοτομίες και βελτιώσεις στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου.

5 Πειραματική σύγκριση

5.1 Μεθοδολογία

Για την πραγματοποίηση της συγκριτικής μελέτης ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Εγκατάσταση του κατάλληλου λογισμικού
- Καθορισμός σεναρίων εκτέλεσης
- Καθορισμός μετρικών και μέθοδοι συλλογής αυτών
- Ανάλυση και συζήτηση των αποτελεσμάτων

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνεται στον Πίνακα 5-1

Table5-1: Λίστα λογισμικού

Λογισμικό	Λειτουργία	Έκδοση
Mininet	Εξομοιωτής Δικτύου	2.3.0
Onos	Controller	2.6.0
ns-3(OFSwitch13)	Προσομοιωτής Δικτύου	3.39
Iperf	Εργαλείο Μετρήσεων	2.0.10
Linux (Ubuntu)	Λειτουργικό Σύστημα	16.04
Python	Γλώσσα Προγραμματισμού	2.7.17
CloudSimSDN	Προσομοιωτής Δικτύου	v2.0.1-beta
Eclipse IDE	Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης κώδικα	4.28.0
Oracle VM VirtualBox	Προσομοιωτής Εικονικών Μηχανών	7.0.14

Στην παρούσα μελέτη, επιλέγεται ένα σενάριο προσομοίωσης που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των δικτύων SDN. Το σενάριο αυτό είναι βασισμένο στην εργασία των Sonk.a.[9] και στοχεύει στην αναπαράσταση των δυνατοτήτων και περιορισμών των προσομοιωτών SDN.

Η δομή του σεναρίου αποτελείται από μια τοπολογία δέντρου βάθους δύο, με τέσσερις hosts. Υπάρχει ένας κεντρικός διακόπτης (coreswitch) που συνδέεται με δύο edgswitches. Κάθε ένας από τους edgswitches συνδέεται με δύο φυσικές μηχανές (physical machines). Σε αυτό το πλαίσιο, δημιουργείται μια εικονική μηχανή (VM) για κάθε φυσική μηχανή στο CloudSimSDN, ενώ στο Mininet και το NS-3, που δεν υποστηρίζουν προσομοίωση VM, κάθε VM αντιπροσωπεύει μια φυσική μηχανή. Οι ταχύτητες συνδέσεων μεταξύ των κεντρικών και των διακοπών άκρης, καθώς και μεταξύ των διακοπών άκρης και των hosts, καθορίζονται στον Πίνακα 5-2.

Table 5-2: Ρύθμιση συνδέσεων

Τύπος Σύνδεσης	Εύρος Ζώνης
Coreswitch ↔ edgswitches	10 Mbps (1.25 MBytes/sec)
edgswitches ↔ hosts	10 Mbps (1.25 MBytes/sec)

Στο πλαίσιο του σεναρίου που περιγράφεται στον Πίνακα 5-2, κάθε υπολογιστής προσαρμόζεται ώστε να στέλνει δεδομένα διαφόρων μεγεθών σε έναν άλλο υπολογιστή ταυτόχρονα, προκαλώντας την κοινή χρήση των συνδέσεων ανάμεσα σε πολλαπλές συνδέσεις.

Table 5-3: Σενάριο

Αποστολέας	Παραλήπτης	Μέγεθος Δεδομένων
VM1	VM4	10 MBytes
VM2	VM4	10 MBytes
VM3	VM4	10 MBytes

Αυτό το απλό σενάριο παρέχει μια ιδανική βάση για την αξιολόγηση των εργαλείων προσομοίωσης SDN, επιτρέποντας τη σύγκριση των διαφορετικών δυνατοτήτων τους υπό διάφορες συνθήκες.

Για την αξιολόγηση του σεναρίου, εστίασαμε σε τρεις κρίσιμες μετρικές που επέτρεψαν τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών προσομοιωτών ως προς την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητά τους ορίζονται ως εξής:

- χρόνος μετάδοσης
- χρήση CPU (CPU usage)
- χρήση μνήμης (memory usage)

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και η μετρική της υπεραπόδοσης. Η υπεραπόδοση αναφέρεται στη σχετική βελτίωση της απόδοσης ενός εργαλείου έναντι ενός άλλου, μετρούμενη σε διάφορες κρίσιμες παραμέτρους όπως ο χρόνος μετάδοσης, η χρήση της CPU και της μνήμης.

Το σκεπτικό πίσω από την εστίαση στην υπεραπόδοση είναι η ικανότητά του να παρέχει ένα σαφές μέτρο για το πώς ένα εργαλείο υπερέχει ή υπολείπεται σε σύγκριση με άλλα υπό παρόμοιες συνθήκες. Αυτή η συγκριτική μέτρηση μας επιτρέπει όχι μόνο να προσδιορίζουμε τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία κάθε εργαλείου, αλλά και να κατανοούμε τις ανταλλαγές που συνεπάγεται η επιλογή του ενός έναντι του άλλου για συγκεκριμένες εργασίες προσομοίωσης και εξομοίωσης δικτύου.

Σε αυτήν την ανάλυση, εφαρμόζουμε έναν τυποποιημένο τύπο για υπεραπόδοση:

$$P_O = (M_B - M_A) / M_A * 100$$

Όπου M_A και M_B αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις απόδοσης δύο διαφορετικών εργαλείων. Μέσω αυτού στοχεύουμε να αναλύσουμε την απόδοση των NS-3, Mininet και CloudSimSDN, προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με το ποιο εργαλείο θα μπορούσε να είναι καταλληλότερο για διάφορες εφαρμογές.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τους υπολογισμούς υπεραπόδοσης με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και θα συζητήσουμε τις επιπτώσεις αυτών των ευρημάτων στο πλαίσιο της έρευνας SDN και δικτύου.

5.2 Υλοποίηση πειραματικών μετρήσεων

5.2.1 Mininet

Η υλοποίηση στο Mininet πραγματοποιήθηκε μέσα στο περιβάλλον MininetVM εγκατεστημένο στο OracleVirtualBox. Ξεκινά με τη δημιουργία μιας τοπολογίας δέντρου βάθους δύο. Αυτό περιλαμβάνει την κατασκευή ενός κεντρικού διακόπτη coreswitch, δύο edgeswitches, και τέσσερις hosts εφόσον το Mininet δεν υποστηρίζει την προσομοίωση VMs. Οι διακόπτες και οι hosts δημιουργούνται μέσω της κλάσης Topo του Mininet και συνδέονται μεταξύ τους μέσω των συνδέσεων addLink. Οι συνδέσεις αυτές παραμετροποιούνται με ταχύτητες 10 Mbps και καθυστερήσεις που κυμαίνονται σε 2ms.

Για τη συλλογή μετρικών, χρησιμοποιείται το εργαλείο iperf για την μέτρηση του χρόνου μετάδοσης δεδομένων και το πακέτο psutil της Python για την παρακολούθηση της χρήσης του CPU και της μνήμης. Οι μετρήσεις γίνονται για τρία διαφορετικά σενάρια μετάδοσης μεταξύ των hosts. Κάθε σενάριο εκτελείται πολλές φορές για να εξασφαλιστεί συνέπεια και ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Κατά την εκτέλεση της εξομοίωσης, τα δεδομένα μεταδίδονται από τον κάθε host προς έναν κεντρικό παραλήπτη (VM4 στο σενάριο) με την εντολή iperf. Οι χρόνοι μετάδοσης καταγράφονται μαζί με τις μετρήσεις χρήσης CPU και μνήμης, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του δικτύου και των πόρων του συστήματος.

5.2.2 CloudSimSDN

Η υλοποίηση στο CloudSimSDN ξεκινά με την εγκατάσταση του CloudSim και ακολούθως του CloudSimSDN στο περιβάλλον Eclipse. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την ρύθμιση των βιβλιοθηκών και την προετοιμασία του περιβάλλοντος ανάπτυξης για τη δημιουργία της προσομοίωσης.

Η τοπολογία δικτύου δημιουργείται με βάση δύο διαφορετικά αρχεία JSON: ένα για τη φυσική τοπολογία και ένα για την εικονική τοπολογία. Η φυσική τοπολογία αποτελείται από έναν κεντρικό switch, δύο edgeswitches και τέσσερις hosts με συγκεκριμένες προδιαγραφές υλικού (iops, ram, storage).

Η εικονική τοπολογία περιλαμβάνει τέσσερις εικονικές μηχανές (VMs), η καθεμία αντιστοιχίζεται σε έναν host της φυσικής τοπολογίας. Οι συνδέσεις μεταξύ των VMs ορίζονται με βάση τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Στο Workload καθορίζεται το φορτίο εργασίας μέσω ενός αρχείου CSV, όπου ορίζονται τα σενάρια μεταφοράς δεδομένων μεταξύ των VMs.

Ο κώδικας του CloudSimSDN αρχίζει με την εκκίνηση του CloudSim και την αρχικοποίηση του NetworkOperatingSystemSimple. Αυτή η κλάση διαχειρίζεται την λειτουργία του δικτύου και επιτρέπει την δυναμική δημιουργία και διαχείριση της τοπολογίας δικτύου.

Χρησιμοποιείται η κλάση SDNDatacenter, η οποία αναπαριστά ένα κέντρο με δυνατότητες SDN. Η συγκεκριμένη κλάση επιτρέπει την ανάθεση και την διαχείριση εικονικών μηχανημάτων (VMs) με βάση πολιτικές SDN.

Για τη διαχείριση των VMs, χρησιμοποιείται η κλάση VmAllocationPolicyCombinedLeastFullFirst, που προσφέρει μια στρατηγική ανάθεσης VM με βάση την ελάχιστη χρήση πόρων.

HSDNBroker αναλαμβάνει την υποβολή και διαχείριση των φορτίων εργασίας. Η κλάση αυτή επιτρέπει την υποβολή εφαρμογών και αιτημάτων στο κέντρο, καθώς και τη συλλογή στατιστικών δεδομένων.

Η κλάση Metrics αναλύει και καταγράφει μετρικές απόδοσης όπως χρόνος μετάδοσης, χρήση CPU, και κατανάλωση μνήμης για κάθε σενάριο μετάδοσης δεδομένων. Η μέτρηση της χρήσης μνήμης διαχειρίζεται με διαφορετικό τρόπο από το Mininet. Στο CloudSimSDN, η χρήση μνήμης υπολογίζεται μέσω της συνολικής κατανομής RAM σε όλα τα VM που φιλοξενούνται σε έναν συγκεκριμένο host.. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια στατική εικόνα της κατανομής της μνήμης και όχι την πραγματική χρήση της μνήμης σε πραγματικό χρόνο.

Η κλάση PhysicalTopologyParser χρησιμοποιείται για την ανάλυση της φυσικής τοπολογίας δικτύου από ένα αρχείο JSON. Επιπλέον, η μέθοδος

calculateTransmissionTime και άλλες βοηθητικές μέθοδοι υπολογίζουν τον χρόνο μετάδοσης βάσει των παραμέτρων δικτύου και των συνδέσεων VM.

5.2.3 NS-3

Η προσομοίωση στο NS-3, με την ενσωμάτωση του OFSwitch13 module επιτρέπει τη δημιουργία ενός δικτύου SDN με χρήση του πρωτοκόλλου OpenFlow 1.3. Ο κώδικας αυτός αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Ubuntu, εγκατεστημένο στο Oracle VM VirtualBox.

Δημιουργούνται κόμβοι για τον πυρήνα (core), τους edges και τους hosts και συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας την βοηθητική κλάση PointToPointHelper, η οποία παρέχει διασυνδέσεις σημείου προς σημείο.

Εφαρμόζεται το πρωτόκολλο Internet και ανατίθενται διευθύνσεις IP στους κόμβους.

Η κλάση Ipv4AddressHelper χρησιμοποιείται για την ανάθεση διευθύνσεων IP.

Χρησιμοποιείται η κλάση OnOffHelper για την παραγωγή κίνησης TCP στο δίκτυο και ορίζονται οι παράμετροι της κίνησης (όπως ρυθμός δεδομένων και μέγεθος πακέτου).

Χρησιμοποιείται η κλάση FlowMonitor για την παρακολούθηση της απόδοσης του δικτύου και συλλέγονται στατιστικά για κάθε ροή δεδομένων, όπως όγκος δεδομένων και χρόνος μετάδοσης. Για την χρήση CPU και μνήμης, χρησιμοποιούνται εντολές shell που εκτελούνται μέσω του προσομοιωτή, παρέχοντας πραγματικό χρόνο απόδοσης του συστήματος.

Γίνεται υπολογισμός του χρόνου μετάδοσης, της χρήσης CPU και της μνήμης. Ο χρόνος μετάδοσης υπολογίζεται μέσω της διαφοράς των χρόνων έναρξης και λήξης των ροών. Αυτός ο τρόπος είναι κατάλληλος για τη μέτρηση της τελικής καθυστέρησης στο δίκτυο.

Η χρήση της CPU μετράτε μέσω εντολών συστήματος (vmstat), οι οποίες εκτελούνται μέσω της εντολής `topen`. Αυτό μετρά τη χρήση CPU του συστήματος που τρέχει την προσομοίωση, όχι εντός των προσομοιωμένων κόμβων. Η χρήση μνήμης καταγράφεται με παρόμοιο τρόπο με τη χρήση CPU, μέσω της εντολής `free -m`. Αυτό αφορά τη χρήση μνήμης του συστήματος που διεξάγει την προσομοίωση, όχι της μνήμης στους προσομοιωμένους κόμβους.

5.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

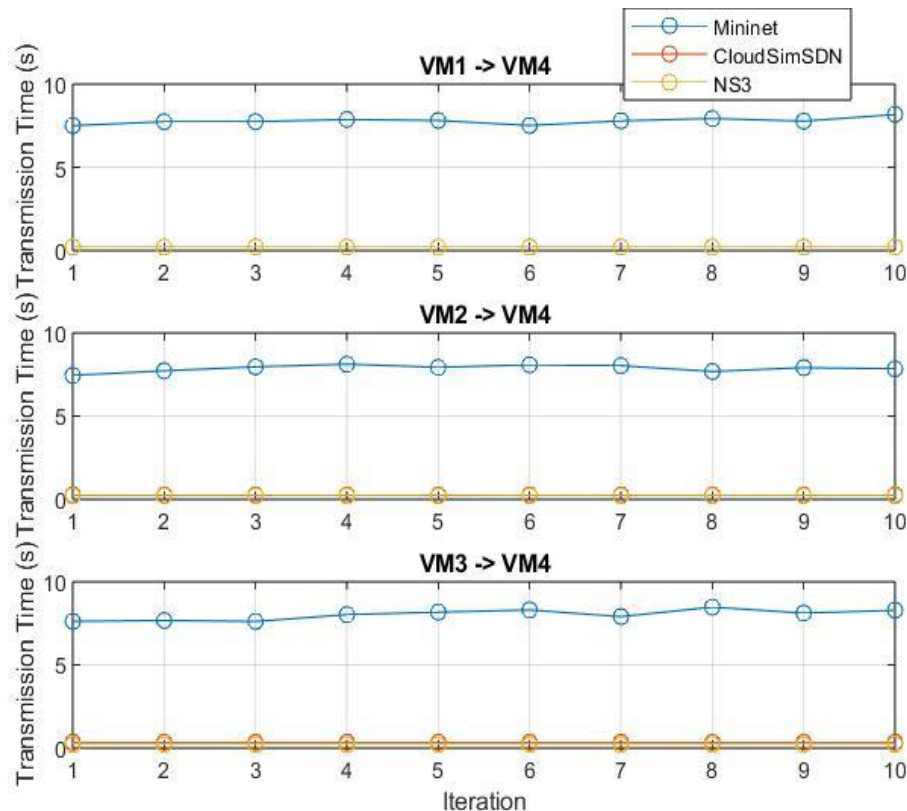
Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζουμε της ανάλυσης μετρήσεων απόδοσης των προσομοιώσεων σε Mininet, CloudSimSDN και NS-3. Εμβαθύνουμε στις περίπλοκες λεπτομέρειες της αξιολόγησης της κατανάλωσης πόρων, δίνοντας έμφαση στο χρόνο μετάδοσης, στη χρήση της CPU και της RAM ως βασικούς δείκτες της αποδοτικότητας του συστήματος και της απόδοσης του δικτύου. Ξεκινάμε με μια ολοκληρωμένη επισκόπηση αυτών των μετρήσεων, ακολουθούμενη από μια σχολαστική εξέταση της εφαρμογής και ερμηνείας τους στα δύο πλαίσια προσομοίωσης.

Οι μετρήσεις κατανάλωσης πόρων είναι θεμελιώδεις για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ προσομοιωμένων σεναρίων δικτύου και του υποκείμενου υλικού. Παρακολουθώντας τη χρήση της CPU και της μνήμης RAM, μπορούμε να μετρήσουμε πόσο εντατικά προσομοιώνει τους πόρους του συστήματος, διευκολύνοντας τις γνώσεις σχετικά με την αποτελεσματικότητα και τον ρεαλισμό των προσομοιωμένων περιβαλλόντων.

Στα πειράματα, τα αποτελέσματα από τους τρεις προσομοιωτές/εξομοιωτές επαναλήφθηκαν πολλές φορές, και χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή για συγκρίσεις. Η ανάλυση αυτή επικεντρώνεται στην απόδοση, χρήσης CPU και μνήμης για το Mininet, το CloudSimSDN και το NS-3.

5.3.1 Χρόνος Μετάδοσης

Mininet: Οι μέσοι χρόνοι μετάδοσης για τα σενάρια VM1 προς VM4, VM2 προς VM4 και VM3 προς VM4 είναι 7.78s, 7.87s και 8.10s αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια σταθερή απόδοση με σχετικά μικρές διακυμάνσεις. Οι χρόνοι μετάδοσης στο Mininet αντικατοπτρίζουν τη λεπτομερή εξομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς υλικού.



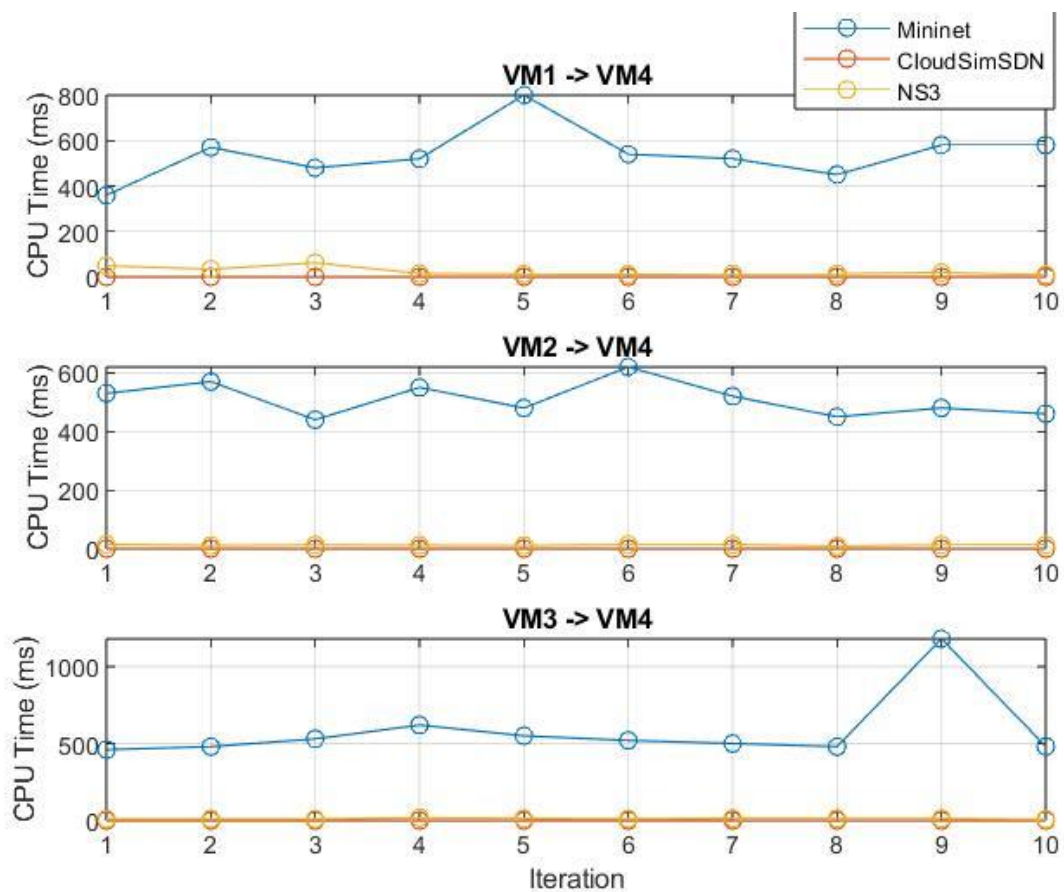
Εικόνα 11 Χρόνοι μετάδοσης ανά link

CloudSimSDN: Οι χρόνοι μετάδοσης είναι σταθερά χαμηλοί σε όλες τις συνδέσεις και τις επαναλήψεις, κατά μέσο όρο περίπου 0.21 έως 0.35 δευτερόλεπτα. Αυτό υποδηλώνει μια εξαιρετικά αποτελεσματική διαδικασία μετάδοσης δεδομένων στο προσομοιωμένο περιβάλλον του CloudSimSDN.

NS-3: Οι μέσοι χρόνοι μετάδοσης είναι περίπου 0.204s, 0.203s και 0.205s για τα τρία σενάρια, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι σημαντικά χαμηλότερες από το Mininet, υποδεικνύοντας ταχύτερη μετάδοση στο προσομοιωμένο περιβάλλον του NS-3.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι γρήγοροι χρόνοι μετάδοσης του NS-3 και του CloudSimSDN είναι πιθανό να οφείλονται στον αποτελεσματικό χειρισμό των πρωτοκόλλων δικτύου και στην επεξεργασία πακέτων, καθιστώντας τα κατάλληλα για προσομοιώσεις δικτύου υψηλής ταχύτητας. Αντίθετα, οι μεγαλύτεροι χρόνοι μετάδοσης του Mininet αντικατοπτρίζουν τη λεπτομερή εξομίωση της πραγματικής συμπεριφοράς υλικού, προσφέροντας πιο ρεαλιστικές πληροφορίες αλληλεπίδρασης δικτύου, καθώς είναι σχεδιασμένο να τρέχει σε μία μόνο μηχανή, μοιράζοντας πόρους υλικού ανάμεσα στα στοιχεία του, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση, όπως σημειώνει και στην εργασία του ο Noring[37].

5.3.2 Χρόνος CPU



Εικόνα 12 Καταναλωση CPU ανά link

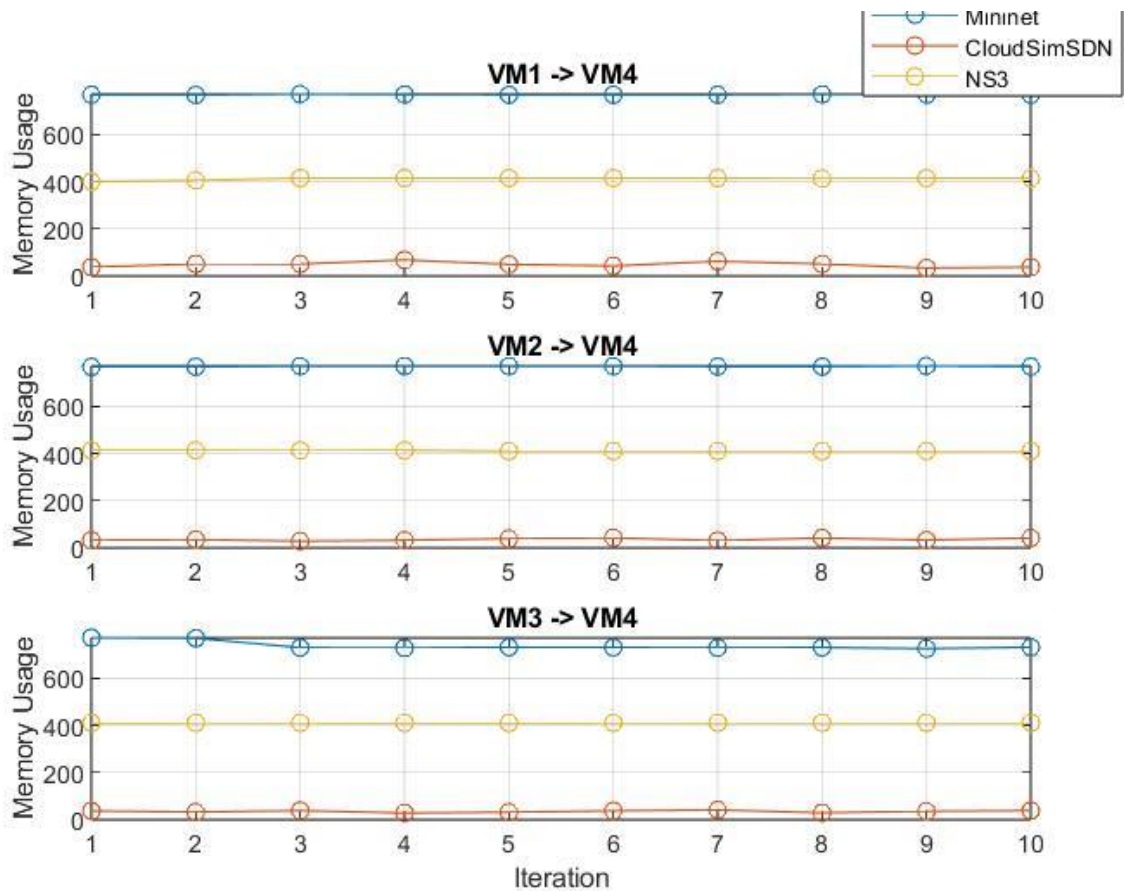
Mininet: Οι χρόνοι CPU παρουσιάζουν μεταβλητότητα, με τον μέσο χρόνο CPU για VM1 έως VM4 να είναι ο υψηλότερος στα 540ms. Αυτό υποδηλώνει υψηλότερη υπολογιστική κατανάλωση σε αυτό το σενάριο.

CloudSimSDN: Ο μέσος χρόνος CPU είναι σταθερά χαμηλός στα 0,10ms σε όλα τα σενάρια. Αυτό υποδηλώνει ελάχιστη χρήση της CPU, η οποία μπορεί να οφείλεται στο επίπεδο προσομοίωσης του CloudSimSDN και στην εξαιρετικά συντομευμένη διάρκεια των προσομοιώσεων (περίπου 1,192 δευτερόλεπτα), που δεν επιτρέπει σημαντικές διακυμάνσεις στη χρήση πόρων.

NS-3: Η χρήση της CPU καταγράφεται ως ένα εύρος χρόνων από 8 ms έως 62 ms σε διαφορετικές επαναλήψεις, με μέσους όρους που κυμαίνονται από 12,5 ms έως 24 ms. Αυτό υποδεικνύει ένα μέτριο επίπεδο χρήσης της CPU, αντικατοπτρίζοντας την ισορροπία του NS-3 μεταξύ της λεπτομέρειας της προσομοίωσης και της υπολογιστικής απόδοσης.

Κατά τη σύγκριση της χρήσης CPU, ο σταθερά χαμηλός χρόνος CPU του CloudSimSDN δείχνει την ελαφριά, υψηλού επιπέδου προσέγγιση προσομοίωσης, ιδανική για σενάρια δικτύωσης cloud. Από την άλλη πλευρά, η μέτρια χρήση της CPU του NS-3 υποδηλώνει μια ισορροπημένη προσέγγιση, καλύπτοντας τόσο τη λεπτομερή συμπεριφορά του δικτύου όσο και την υπολογιστική απόδοση.

5.3.3 Χρήση Μνήμης



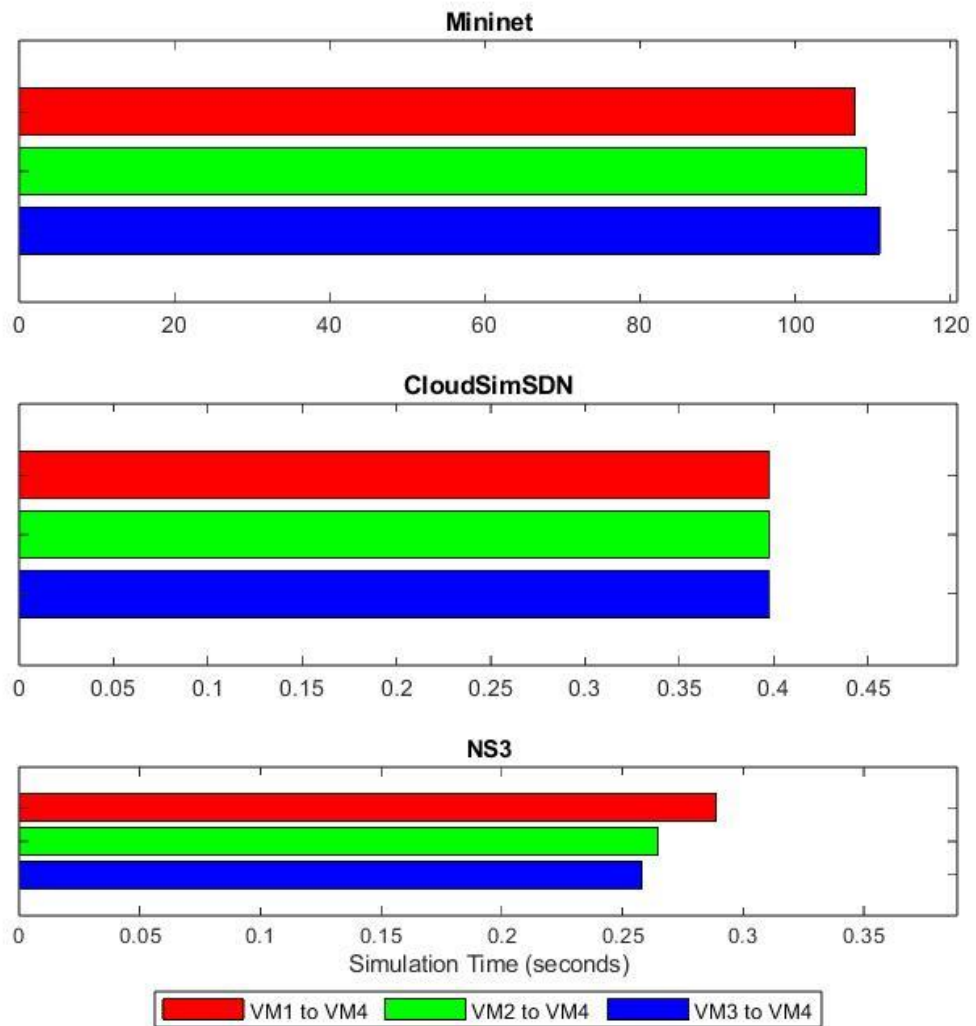
Εικόνα 13 Καταναλωση μνήμης ανά link

Mininet: Η χρήση της μνήμης είναι συνεπής σε όλα τα σενάρια, με μια ελαφρά αύξηση στο σενάριο VM3 σε VM4. Η χρήση κυμαίνεται από 768 MB έως 771 MB.

CloudSimSDN: Στην προσομοίωση η μέτρηση χρήσης μνήμης παρέμεινε σταθερή σε όλες τις επαναλήψεις προφανώς εξαιτίας της στατικής διαμόρφωσης και του ομοιόμορφου φόρτου εργασίας. Για να συγκεντρώσουμε πιο ολοκληρωμένα δεδομένα, χρησιμοποιήσαμε το VisualVM, ένα ευέλικτο εργαλείο για την παρακολούθηση εφαρμογών Java. Η VisualVM μας παρείχε δυνατότητες παρακολούθησης της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντάς μας να παρατηρούμε τη χρήση της μνήμης. Η χρήση του VisualVM εμπλούτισε έτσι την ανάλυσή μας, προσφέροντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα όσον αφορά τη χρήση της μνήμης οποία ποικίλλει περισσότερο από ό,τι στο Mininet, και κυμαίνεται από περίπου 31,61 MB έως 67,76 MB. Αυτό υποδηλώνει μια πιο δυναμική κατανομή πόρων μνήμης στο CloudSimSDN.

NS-3: Η χρήση της μνήμης είναι σχετικά σταθερή, κατά μέσο όρο περίπου 410 MB έως 412 MB. Αυτό είναι σημαντικά χαμηλότερο από το Mininet, υποδεικνύοντας μια πιο αποτελεσματική διαχείριση μνήμης στο NS-3.

5.3.4 Διάρκεια Προσομοίωσης



Εικόνα 14 Διάρκεια προσομοίωσης ανά link

Mininet: Η διάρκεια για τις προσομοιώσεις κυμαίνεται από 107,67 δευτερόλεπτα έως 110,91 δευτερόλεπτα, υποδεικνύοντας μεγαλύτερους χρόνους προσομοίωσης σε σύγκριση με άλλα εργαλεία.

CloudSimSDN: Η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης για το CloudSimSDN είναι η ταχύτερη, με συνολικό χρόνο περίπου 1,192

δευτερόλεπτα για όλα τα σενάρια. Αυτό δείχνει την ικανότητα του CloudSimSDN να διεξάγει γρήγορες και αποδοτικές προσομοιώσεις.

NS-3: Οι χρόνοι προσομοίωσης είναι πολύ καλοί, με όλα τα σενάρια να ολοκληρώνονται σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο (0,288s, 0,264s, 0,258s). Αυτό υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα του NS-3 στην εκτέλεση προσομοιώσεων, πιθανώς λόγω του βελτιστοποιημένου περιβάλλοντος προσομοίωσης δικτύου.

Το CloudSimSDN δείχνει τους ταχύτερους χρόνους μετάδοσης, υποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του στην προσομοίωση μεταφοράς δεδομένων δικτύου. Το NS-3 δείχνει επίσης πολύ γρήγορη μετάδοση ενώ το Mininet έχει τους μεγαλύτερους χρόνους μετάδοσης, πιθανώς λόγω της στενότερης εξομοίωσης πραγματικών περιβαλλόντων δικτύου.

5.3.5 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η συγκριτική ανάλυση των Mininet, CloudSimSDN και NS-3 σε βασικές μετρήσεις απόδοσης—χρόνος μετάδοσης, χρήση CPU και κατανάλωση μνήμης— υπογραμμίζει διαφορετικά λειτουργικά προφίλ που καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες προσομοίωσης.

Το Mininet, με τη λεπτομερή εξομοίωση υλικού του, προσφέρει μια πιο κοντινή προσέγγιση στη συμπεριφορά δικτύου του πραγματικού κόσμου, καθιστώντας το κατάλληλο για σενάρια όπου οι αλληλεπιδράσεις ειδικά για το υλικό είναι ζωτικής σημασίας.

Το CloudSimSDN, με την ταχύτερη συνολική απόδοση και την ελάχιστη κατανάλωση πόρων, ξεχωρίζει για την αποτελεσματικότητά του, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα δικτύωσης cloud όπου οι γρήγορες προσομοιώσεις και τα χαμηλά έξοδα αποτελούν προτεραιότητα.

Το NS-3, εξισορροπώντας τους γρήγορους χρόνους προσομοίωσης με μέτρια χρήση πόρων, αναδεικνύεται ως ένα ευέλικτο εργαλείο, ικανό να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες συμπεριφοράς δικτύου διατηρώντας παράλληλα την υπολογιστική απόδοση. Αυτές οι ιδέες καθοδηγούν συλλογικά τους ερευνητές και τους επαγγελματίες στην επιλογή του καταλληλότερου εργαλείου με βάση

τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς των σεναρίων προσομοίωσης δικτύου τους.

5.4 Μελέτη υπεραπόδοσης

Στον τομέα της προσομοίωσης και εξομοίωσης δικτύου, η αξιολόγηση της απόδοσης εργαλείων όπως το NS-3, το Mininet και το CloudSimSDN είναι σημαντική για την κατανόηση της αποτελεσματικότητάς τους σε διαφορετικά σενάρια.

Για να συγκεκριμενοποιήσουμε την κατανόησή μας για τις σχετικές αποδόσεις των NS-3, Mininet και CloudSimSDN, εφαρμόσαμε τον τύπο υπεραπόδοσης

$P_O = (M_B - M_A) / M_A * 100$ στα δεδομένα που συλλέξαμε. Αυτός ο τύπος μας επέτρεψε να αξιολογήσουμε ποσοτικά την απόδοση κάθε εργαλείου σε σύγκριση με τα άλλα σε τρεις κρίσιμες παραμέτρους: χρόνο μετάδοσης, χρήση CPU και κατανομή μνήμης.

Το M_A υποδηλώνει τη μετρική τιμή είτε από το Mininet είτε από το CloudSimSDN, ανάλογα με το σενάριο που δοκιμάζεται. Αυτά μπορεί να είναι μετρήσεις όπως ο χρόνος μετάδοσης, η χρήση της CPU ή η κατανομή μνήμης. Αντιστρόφως, το M_B αντιστοιχεί στην ίδια μετρική τιμή αλλά λαμβάνεται από το NS-3, το βασικό μας εργαλείο. Αυτή η μέθοδος υπολογισμού μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε ποσοτικά τον τρόπο με τον οποίο το Mininet και το CloudSimSDN συσσωρεύονται έναντι του NS-3, παρέχοντας σαφή εικόνα για τα δυνατά και αδύνατα σημεία των σχετικών επιδόσεων.

Καθιερώσαμε το NS-3 ως το baseline εργαλείο για τη σύγκριση και η εστίασή μας ήταν στον υπολογισμό της υπεραπόδοσης στη σύνδεση από το VM1 στο VM4. Αυτή η σύνδεση επιλέχθηκε λόγω της συνάφειάς της σε τυπικά σενάρια δικτύου που είναι πιθανό να συναντήσουν αυτά τα εργαλεία.

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τα ευρήματα αυτής της ανάλυσης, προσφέροντας μια λεπτομερή προοπτική για τη δυναμική απόδοση αυτών των εργαλείων σε έξυπνα προγραμματιζόμενα περιβάλλοντα δικτύου.

5.4.1 Αποτελέσματα Υπεραπόδοσης

Η ανάλυσή μας περιλάμβανε μια σειρά από σενάρια επικοινωνίας VM σε VM, συγκρίνοντας κάθε εργαλείο με τα άλλα με βάση τις μέσες τιμές του χρόνου μετάδοσης, της χρήσης CPU και της κατανομής μνήμης.

Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4 έχουν ως εξής:

I. VM1 σε VM4:

- Χρόνος μετάδοσης
Μέσοιόροι: NS-3: 0,204607s, Mininet: 7,78s, CloudSimSDN: 0,2100s

$$\text{NS-3 - Mininet:PO} = (7.78 - 0.204607) / 0.204607 \times 100 = 3702.41\%$$

$$\text{NS-3 - CloudSimSDN: PO} = (0.2100 - 0.204607) / 0.204607 \times 100 = 2.64\%$$

$$\text{Mininet - CloudSimSDN: PO} = (0.2100 - 7.78) / 7.78 \times 100 = -97.30\%$$

- CPU
Μέσοιόροι: NS-3: 24 ms, Mininet: 540 ms, CloudSimSDN: 0.10 ms

$$\text{NS-3 - Mininet: PO} = (540 - 24) / 24 \times 100 = 2150.00\%$$

$$\text{NS-3 - CloudSimSDN: PO} = (0.10 - 24) / 24 \times 100 = -99.58\%$$

$$\text{Mininet - CloudSimSDN: PO} = (0.10 - 540) / 540 \times 100 = -99.98\%$$

- Χρήση μνήμης
Μέσοιόροι: NS-3: 412,1 MB, Mininet: 768 MB, CloudSimSDN: 48,87 MB

$$\text{NS-3 - Mininet: PO} = (768 - 412.1) / 412.1 \times 100 = 86.36\%$$

$$\text{NS-3 - CloudSimSDN: PO} = (48.87 - 412.1) / 412.1 \times 100 = -88.14\%$$

$$\text{Mininet - CloudSimSDN: PO} = (48.87 - 768) / 768 \times 100 = -93.64\%$$

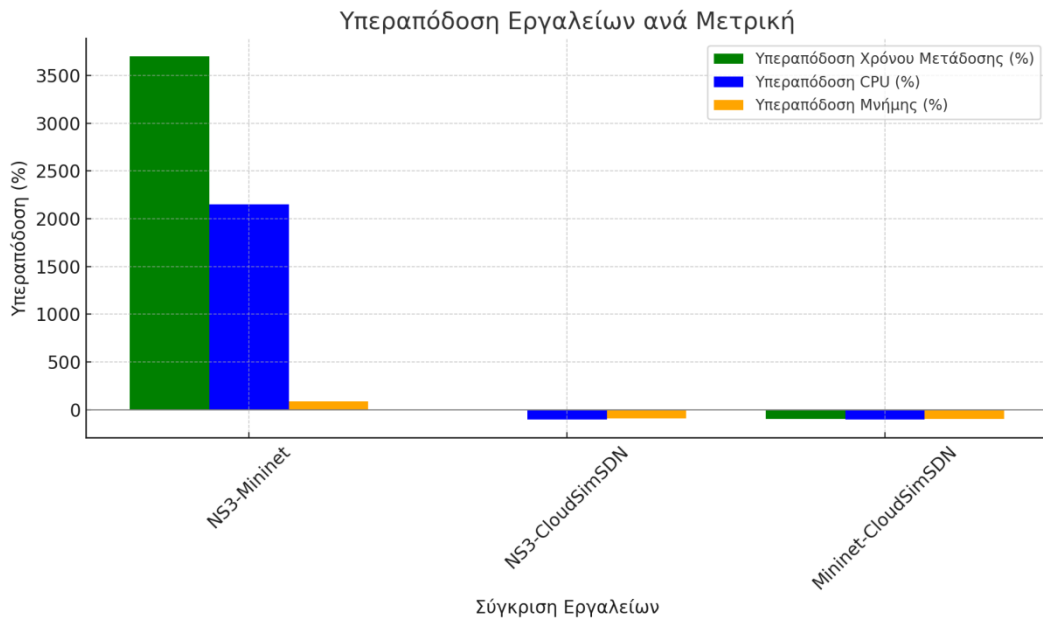
Table5-4Αποτελέσματα υπολογισμού Υπεραπόδοσης

Εργαλείο	Χρόνος μετάδοσης(s)	ΧρόνοςμετάδοσηςΥπεραποδοση(%)	Χρόνος CPU (ms)	CPU Υπεραποδοση(%)	Χρήσημνήμης (MB)	ΜνήμηΥπεραποδοση(%)
NS-3	0.204607	-	24.0	-	412.10	-
Mininet	7.78	3702.41↑	540.0	2150.0 ↑	768.00	86.36 ↑
CloudSimSDN	0.2100	2.64 ↑	0.1	-99.58 ↓	48.87	-88.14 ↓

- ↑ υποδηλώνει αύξηση στη χρήση πόρων ή μείωση στην απόδοση.
- ↓ υποδηλώνει μείωση της χρήσης πόρων ή βελτίωση της απόδοσης.

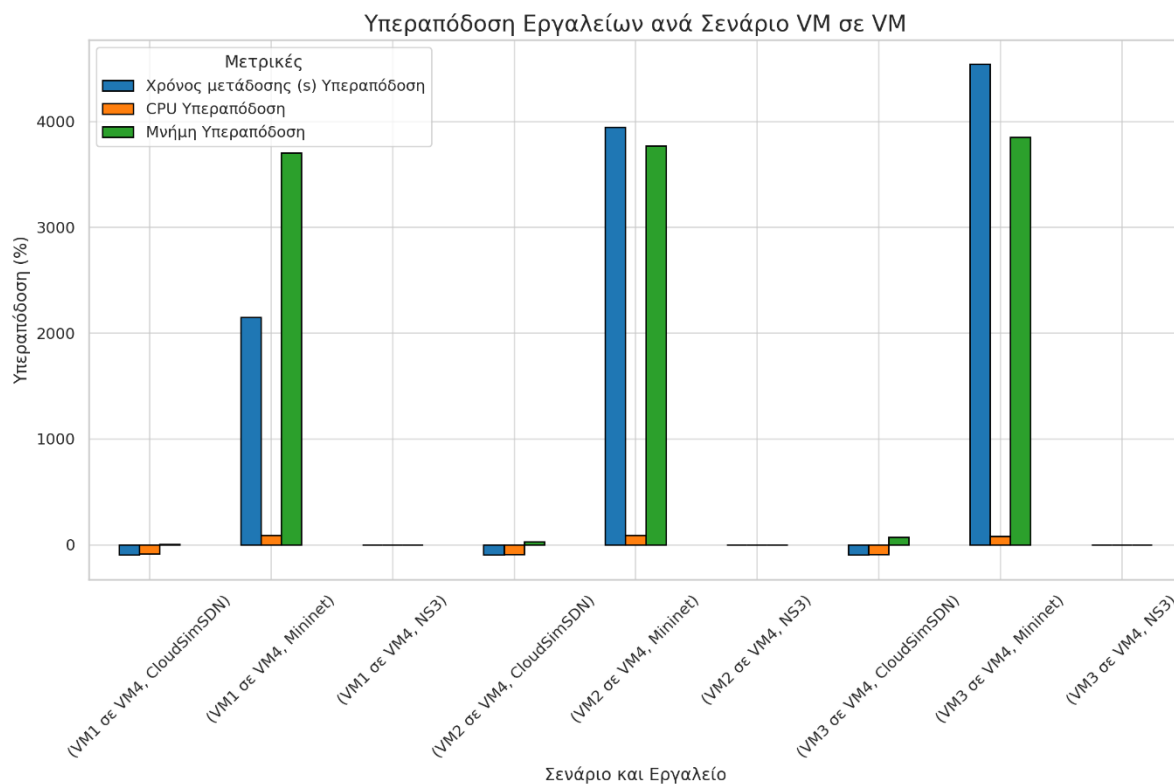
- NS-3 - Mininet: Στο χρόνο μετάδοσης, το NS-3 παρουσίασε μια εκπληκτική υπεραπόδοση 3702,41%. Αυτή η τάση συνεχίστηκε σε χρόνο CPU με υπεραπόδοση2150,00%, και χρήση μνήμης με 86,36%.
- NS-3 - CloudSimSDN: Το NS-3 έδειξε μέτρια υπεραπόδοση στο χρόνο μετάδοσης στο 2,64%. Ωστόσο, είχε χαμηλότερη απόδοση σε χρόνο CPU κατά -99,58% και σε χρήση μνήμης κατά -88,14%.
- Mininet - CloudSimSDN: Εδώ, το Mininet σημείωσε σημαντικά χαμηλότερες επιδόσεις σε χρόνο μετάδοσης κατά -97,30%, χρόνο CPU κατά -99,98% και χρήση μνήμης κατά 93,64%.

Το επόμενο γράφημα παρουσιάζει μια περιεκτική επισκόπηση των υπολογισμών υπεραπόδοσης, που περιλαμβάνει τις μετρήσεις μας σε NS-3, Mininet και CloudSimSDN. Αυτή η γραφική αναπαράσταση εμφανίζει το ποσοστό υπεραπόδοσης για κάθε εργαλείο.



Εικόνα 15 Υπεραποδοση ανά εργαλείο και μετρική

Στο επόμενο γράφημα προσφέρεται μια λεπτομερή σύγκριση σε όλα τα σενάρια για τα τρία εργαλεία μετά τους υπολογισμούς υπεραποδοσης που διεξήγαμε. Ο άξονας x κατηγοριοποιεί τις συγκρίσεις, συνδυάζοντας κάθε σενάριο VM με τα εργαλεία που συγκρίνονται, ενώ ο άξονας y ποσοτικοποιεί την υπεραπόδοση σε ποσοστιαία βάση. Κάθε σύνολο ράβδων αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό σενάριο σύζευξης VM, υπογραμμίζοντας τις σχετικές βελτιώσεις ή ελλείμματα απόδοσης κατά τη μετάβαση από το ένα VM στο άλλο στα διάφορα εργαλεία.



Εικόνα 16 Αποτελέσματα σύγκρισης υπεραπόδοσης ανά link και εργαλείο

Αυτή η συγκριτική ανάλυση των NS-3, Mininet και CloudSimSDN, με έμφαση στην αξιολόγηση απόδοσης, αποκαλύπτει κρίσιμες πληροφορίες για τις δυνατότητες αυτών των εργαλείων πέρα από τυπικές λειτουργικές παραμέτρους. Η μελέτη δείχνει ότι κάθε εργαλείο παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα όταν ωθείται στα όρια της απόδοσης.

✓ Χρόνος μετάδοσης: Το NS-3 παρουσίασε σημαντικό πλεονέκτημα στο χρόνο μετάδοσης σε σύγκριση με το Mininet και το CloudSimSDN, υποδηλώνοντας την πιθανή του αποτελεσματικότητα στον χειρισμό της μετάδοσης δεδομένων, πιθανότατα λόγω πιο βελτιστοποιημένων αλγορίθμων δρομολόγησης ή καλύτερης διαχείρισης της κυκλοφορίας δικτύου. Αυτός ο παράγοντας είναι κρίσιμος για σενάρια όπου η μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι ζωτικής σημασίας.

✓ Χρήση CPU: Η ελάχιστη χρήση CPU του CloudSimSDN υποδηλώνει υψηλότερη απόδοση πόρων, η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί σε ελαφρύτερες απαιτήσεις επεξεργασίας ή πιο αποτελεσματική εκτέλεση κώδικα, καθιστώντας το κατάλληλο για περιβάλλοντα με περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ.

✓ Χρήση μνήμης: Ομοίως, η ανώτερη διαχείριση μνήμης του CloudSimSDN μπορεί να αντικατοπτρίζει την ικανότητά του να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά σε περιορισμένες ρυθμίσεις. Αυτή η πτυχή είναι ιδιαίτερα σημαντική για προσομοιώσεις μεγάλης διάρκειας, όπου το η αύξηση της μνήμης θα μπορούσε να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα.

Πλεονεκτήματα και περιορισμοί για συγκεκριμένα εργαλεία:

NS-3: Η ισχυρή του απόδοση μετάδοσης δεδομένων το καθιστά ιδανικό για προσομοιώσεις όπου η ταχύτητα και η αποτελεσματικότητα του δικτύου είναι υψηλής προτεραιότητας.

Mininet: Αν και δεν υπερέχει στις μετρημένες μετρήσεις, η δυνατότητα εξομοίωσης σε πραγματικό χρόνο και η ευκολία χρήσης του Mininet το τοποθετούν καλό για γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων.

CloudSimSDN: Με χαμηλότερη χρήση CPU και μνήμης, είναι μια εξέχουσα επιλογή για προσομοιώσεις όπου η αποδοτικότητα των πόρων είναι κρίσιμη. Ωστόσο, αυτό μπορεί να έχει το κόστος λιγότερο λεπτομερούς προσομοίωσης συμπεριφοράς δικτύου σε σύγκριση με το NS-3.

Η εξερεύνησή μας στη δυναμική απόδοσης των NS-3, Mininet και CloudSimSDN υπό διάφορες ή εξειδικευμένες συνθήκες παρείχε μια ολοκληρωμένη κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών τους. Αυτή η εξέταση είναι καθοριστική για τους επαγγελματίες στην επιλογή του κατάλληλου εργαλείου για απαιτητικές καταστάσεις και συμβάλλει στην ευρύτερη έρευνα, εντοπίζοντας τομείς για μελλοντική ανάπτυξη και καινοτομία. Αντιμετωπίζοντας τόσο τη βελτιωμένη απόδοση όσο και τα ελλείμματα απόδοσης αυτών των εργαλείων, η μελέτη μας όχι μόνο καθοδηγεί την επιλογή πρακτικής, αλλά εμπνέει επίσης την επόμενη γενιά εργαλείων προσομοίωσης και εξομοίωσης δικτύου, με στόχο ολοένα και υψηλότερα πρότυπα αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας.

5.5 Η σημασία της συλλογής στατιστικών στοιχείων στην προσομοίωση SDN

Στα δίκτυα SDN, η συλλογή στατιστικών στοιχείων χρησιμεύει ως βάση για την έξυπνη λήψη αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση του δικτύου. Η προσομοίωση/εξομοίωση SDN, η οποία εξαρτάται από την πιστότητα και την ακρίβεια αυτών των στατιστικών, είναι ζωτικής σημασίας για την επικύρωση της λειτουργικής ακεραιότητας και του στρατηγικού σχεδιασμού του δικτύου. Είναι τα στατιστικά δεδομένα που περιλαμβάνουν την κυκλοφορία, τις κατανομές φορτίου και τη δυναμική τοπολογία δικτύου— που εξουσιοδοτούν τους ελεγκτές SDN να ενορχηστρώνουν τους πόρους του δικτύου. Αυτό το κεφάλαιο διερευνά πώς η σχολαστική συλλογή και ανάλυση τέτοιων στατιστικών στηρίζει την αποτελεσματικότητα και την εξέλιξη των SDN, διαμορφώνοντας την προσαρμοστικότητα, την ασφάλεια και τη αξιοπιστία ενός δικτύου.

Κρισιμότητα των στατιστικών δικτύου:

A. Ενημερωμένη Λήψη Αποφάσεων: Στα SDN, ο κεντρικός ελεγκτής λαμβάνει αποφάσεις με βάση την κατάσταση του δικτύου. Τα ακριβή και έγκαιρα στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις ροές κυκλοφορίας, το φορτίο και την τοπολογία είναι απαραίτητα για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από τον ελεγκτή. Αυτές οι αποφάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν προσαρμογές δρομολόγησης, εξισορρόπηση φορτίου και ανάπτυξη πολιτικών δικτύου.

B. Βελτιστοποίηση απόδοσης: Αναλύοντας μοτίβα κυκλοφορίας και φορτία, οι προσομοιώσεις δικτύου μπορούν να εντοπίσουν σημεία συμφόρησης και να προβλέψουν μελλοντικά σημεία συμφόρησης. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύου να βελτιστοποιούν προληπτικά το δίκτυο για καλύτερη απόδοση.

C. Ασφάλεια και ανίχνευση ανωμαλιών: Η συλλογή στατιστικών στοιχείων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια στα SDN. Οι τάσεις της κυκλοφορίας μπορούν να αποκαλύψουν ανωμαλίες ή πιθανές παραβιάσεις της ασφάλειας, επιτρέποντας τη θέσπιση στρατηγικών ταχείας μείωσης προτού κλιμακωθούν σε πιο σημαντικές απειλές.

D. Διαχείριση πόρων: Τα SDN έχουν σχεδιαστεί για την αποτελεσματική διαχείριση πόρων δικτύου. Μέσω της συλλογής στατιστικών όπως η χρήση εύρους ζώνης, η απώλεια πακέτων και η καθυστέρηση, οι ελεγκτές SDN μπορούν να καταναείμουν δυναμικά πόρους για την κάλυψη συμφωνιών επιπέδου υπηρεσίας και λειτουργικών απαιτήσεων.

E. Σχεδιασμός Δικτύου και Επεκτασιμότητα: Τα προσομοιωμένα στατιστικά στοιχεία προσφέρουν πληροφορίες για το πώς μπορεί να αποδώσει το δίκτυο υπό διαφορετικές κλίμακες και συνθήκες, καθοδηγώντας την επέκταση του δικτύου. Επιτρέπει τη μοντελοποίηση πρόβλεψης για μελλοντική ανάπτυξη, διασφαλίζοντας ότι το δίκτυο μπορεί να κλιμακωθεί χωρίς συμβιβασμούς στην απόδοση.

F. Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Ποιότητα Εμπειρίας (QoE): Οι προσομοιώσεις SDN που συλλέγουν και αναλύουν στατιστικά στοιχεία μπορούν να προσαρμόσουν τις διαμορφώσεις δικτύου για την επίτευξη των στόχων QoS, επηρεάζοντας άμεσα την QoE του τελικού χρήστη. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές και υπηρεσίες υψηλής έντασης δικτύου, όπου η καθυστέρηση και το jitter πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

G. Αποδοτικότητα κόστους: Με την κατανόηση του φορτίου και της απόδοσης του δικτύου, οι οργανισμοί μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση της υποκείμενης υποδομής, οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την προσομοίωση SDN σε περιβάλλοντα cloud, όπου η χρήση πόρων επηρεάζει άμεσα τις λειτουργικές δαπάνες.

Στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου, θα διερευνήσουμε τις μεθοδολογίες και τα εργαλεία για τη συλλογή και την ερμηνεία στατιστικών στοιχείων δικτύου σε προσομοιώσεις SDN, εστιάζοντας συγκεκριμένα στη συγκριτική ανάλυση των Mininet, CloudSimSDN και NS-3. Αυτή η εξέταση θα αποτελέσει τη βάση για την αξιολόγηση αυτών των εργαλείων όχι μόνο ως προς τις ικανότητές τους προσομοίωσης αλλά και για την αποτελεσματικότητά τους στη συλλογή στατιστικών στοιχείων, η οποία είναι αναπόσπαστο στοιχείο για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού των SDN.

5.5.1 Η προσέγγιση των προσομοιωτών/εξομοιωτών στη συλλογή στατιστικών στοιχείων

❖ Mininet

Το ίδιο το Mininet δεν παράγει στατιστικά στοιχεία, αλλά διευκολύνει τα πειράματα SDN μιμούμενο ένα δίκτυο εικονικών κεντρικών υπολογιστών, switches, δρομολογητών και links. Ωστόσο, η συλλογή στατιστικών στοιχείων στα εξομοιούμενα δίκτυα του Mininet είναι κατά κύριο λόγο μια αλληλεπίδραση μεταξύ του ελεγκτή SDN και των στοιχείων δικτύου:

- **SDN Controllers:** Ο SDN controller που είναι συνδεδεμένος στο Mininet χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο δικτύου για να δώσει εντολή στους virtual switches να αναφέρουν διάφορα στατιστικά στοιχεία. Αυτό περιλαμβάνει στατιστικά στοιχεία ροής, τα οποία περιλαμβάνουν μετρήσεις πακέτων καθώς και συγκεντρωτικά στατιστικά στοιχεία που συνοψίζουν δεδομένα σε όλες τις ροές.
- **Ενσωμάτωση με εξωτερικά εργαλεία:** Η ανοιχτή αρχιτεκτονική του Mininet του επιτρέπει να ενσωματωθεί με μια ποικιλία εργαλείων ανάλυσης και παρακολούθησης δικτύου. Αυτά τα εργαλεία συνδέονται με τα στοιχεία δικτύου ή αγγίζουν το επίπεδο δεδομένων για να παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο ή ιστορικά δεδομένα σχετικά με την κίνηση και την απόδοση του δικτύου.
- **Προσαρμοσμένα σενάρια:** Η χρήση προσαρμοσμένων σεναρίων είναι συνηθισμένη στο Mininet για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής στατιστικών στοιχείων. Αυτά τα σενάρια συνήθως αλληλοεπιδρούν με τον ελεγκτή SDN ή απευθείας με στοιχεία δικτύου χρησιμοποιώντας εργαλεία γραμμής εντολών ή API για την εξαγωγή των απαιτούμενων μετρήσεων.

Μέσω αυτών των μέσων, το Mininet μπορεί να βοηθήσει στη συγκέντρωση ενός ευρέως φάσματος μετρήσεων απόδοσης, όπως η χρήση εύρους ζώνης, η καθυστέρηση, το jitter, τα ποσοστά απώλειας πακέτων, τα ποσοστά σφαλμάτων και άλλα που είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου.

- **Εργαλεία οπτικοποίησης:** Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν στη συνέχεια να οπτικοποιηθούν για την ερμηνεία της απόδοσης του δικτύου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πληροφορίες που οδηγούν στη βελτιστοποίηση και την αντιμετώπιση προβλημάτων στο περιβάλλον SDN.

Για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς, η ικανότητα του Mininet να μιμείται σύνθετες τοπολογίες το καθιστά ένα ανεκτίμητο εργαλείο για τη συλλογή στατιστικών στοιχείων που βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου κάτω από διάφορα σενάρια και συνθήκες.

Σε μια συγκριτική ανάλυση, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενώ το Mininet δεν παρέχει ενσωματωμένες δυνατότητες συλλογής στατιστικών στοιχείων, η δύναμή του έγκειται στην ευελιξία και τη συμβατότητά του με ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών εργαλείων και ελεγκτών. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλα εργαλεία προσομοίωσης που μπορεί να έχουν πιο ολοκληρωμένες λειτουργίες στατιστικών στοιχείων, αλλά θα μπορούσαν να είναι λιγότερο ευέλικτα ή ρεαλιστικά στις δυνατότητες εξομοίωσης δικτύου τους. Η επιλογή του Mininet για μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης μπορεί επομένως να εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις για τη συλλογή στατιστικών στοιχείων και το επίπεδο ενοποίησης με άλλα εργαλεία και συστήματα που είναι απαραίτητα για το έργο.

❖ CloudSimSDN

Από τα ισχυρά χαρακτηριστικά του προσομοιωτή CloudSimSDN είναι η δυνατότητα συλλογής στατιστικών στοιχείων. Παρέχει ακριβή και περιεκτικά στατιστικά στοιχεία τα οποία διευκολύνουν τη βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της ροής δεδομένων, την αποτελεσματικότητα της κατανομής πόρων και τη λεπτομερή ρύθμιση του λειτουργικού κόστους.

Επεκτείνει το Cloudsim, το οποίο προσομοιώνει τις υποδομές του cloudcomputing, ενσωματώνοντας τις συμπεριφορές της κυκλοφορίας δικτύου και του ελεγκτή SDN, διευκολύνοντας έτσι μια πιο ξεχωριστή ανάλυση τόσο υπολογιστικών όσο και δικτύων.

- Διαμόρφωση και ανάλυση τοπολογίας δικτύου:

Η προσομοίωση δημιουργεί μια πολύπλοκη τοπολογία δικτύου που περιλαμβάνει core και edgeswitches και πολλαπλούς hosts.

Κάθε κόμβος (switch ή host) ορίζεται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως IOPS, εύρος ζώνης και διαμορφώσεις port.

Αυτή η λεπτομερής διαμόρφωση στηρίζει την ικανότητα της προσομοίωσης να αναπαράγει με ακρίβεια σενάρια δικτύου πραγματικού κόσμου και να μετρήσει τον αντίκτυπο διαφορετικών τοπολογικών δομών στην απόδοση του δικτύου.

- Μετρήσεις κατανομής πόρων και απόδοσης:

Το CloudSimSDN προσομοιώνει αποτελεσματικά την κατανομή πόρων, όπως αποδεικνύεται από την εγκατάσταση και τη διαχείριση εικονικών μηχανών σε διαφορετικούς κεντρικούς υπολογιστές.

Τα λεπτομερή στατιστικά στοιχεία για τη δημιουργία VM, συμπεριλαμβανομένης της τοποθέτησής τους σε συγκεκριμένους κεντρικούς υπολογιστές και την κατανομή εύρους ζώνης, αντικατοπτρίζουν την ικανότητα του CloudSimSDN να μοντελοποιεί πολύπλοκα περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους[35].

- Διαχείριση Bandwidth και ανάλυση NetworkTraffic:

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υποδεικνύουν σενάρια κατανομής bandwidth, επισημαίνοντας περιπτώσεις όπου τα αιτήματα δεν μπορούσαν να ικανοποιηθούν πλήρως, με αποτέλεσμα προσαρμοσμένες κατανομές.

Αυτή η πτυχή είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της ικανότητας του δικτύου να χειρίζεται την κίνηση υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου και για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των πολιτικών SDN στη διαχείριση του εύρους ζώνης.

- Καθυστέρηση και μετάδοση:

Οι μετρήσεις καθυστέρησης για κάθε link παρέχουν πληροφορίες για τους χρόνους απόκρισης του δικτύου, οι οποίοι είναι σημαντικές για εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνίες με μικρή καθυστέρηση.

Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο χρόνος μετάδοσης ποικίλλει σε διαφορετικά σημεία του δικτύου μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση του δικτύου και τις προσπάθειες αντιμετώπισης προβλημάτων.

- Διαχείριση φόρτου εργασίας και ανάλυση ServiceTime:

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιγράφουν λεπτομερώς τον συνολικό χρόνο εξυπηρέτησης για φόρτια εργασίας, κατανεμημένους σε CPU και στοιχεία δικτύου, επιτρέποντας μια συνολική εικόνα της απόδοσης του δικτύου και της υπολογιστικής απόδοσης.

Η ανάλυση αυτών των μετρήσεων είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση του πόσο καλά η υποδομή δικτύου υποστηρίζει ποικίλες απαιτήσεις φόρτου εργασίας, ειδικά σε περιβάλλον cloud.

- Κλιμάκωση και εξισορρόπηση φορτίου:

Η ικανότητα να χειρίζεται πολλά VM και διαφορετικά προφίλ κυκλοφορίας δικτύου δείχνει την καταλληλότητα του CloudSimSDN για μελέτες επεκτασιμότητας και εξισορρόπησης φορτίου.

Αυτές οι πτυχές είναι κρίσιμες για τα κέντρα δεδομένων cloud, τα οποία πρέπει να κλιμακώσουν αποτελεσματικά τους πόρους και να εξισορροπήσουν τα φορτία για να διατηρήσουν τη βέλτιστη απόδοση.

- Θέματα κατανάλωσης ενέργειας:

Η ικανότητα του CloudSimSDN να προσομοιώνει τη χρήση ενέργειας είναι ουσιαστική για το σχεδιασμό και τη λειτουργία βιώσιμων και οικονομικά αποδοτικών κέντρων δεδομένων.

Τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας, που συνήθως περιλαμβάνονται στις προσομοιώσεις CloudSimSDN, είναι σημαντικά για την αξιολόγηση των

περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του λειτουργικού κόστους των υπηρεσιών cloud.

Συνοπτικά, το CloudSimSDN είναι ένα εργαλείο εξαιρετικά αποτελεσματικό στη μοντελοποίηση και την ανάλυση πολύπλοκων περιβαλλόντων cloud με δυνατότητα SDN. Τα λεπτομερή στατιστικά που συγκεντρώνει καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων, από την απόδοση του δικτύου έως την κατανομή πόρων, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση και τη διαχείριση των λειτουργιών του κέντρου δεδομένων cloud. Η ικανότητα του εργαλείου να προσομοιώνει πραγματικές συνθήκες το καθιστά ανεκτίμητο εργαλείο τόσο για την ακαδημαϊκή έρευνα όσο και για πρακτικές εφαρμογές στον υπολογιστικό νέφος και τη διαχείριση δικτύου.

❖ NS-3

Ο προσομοιωτής NS-3 συνοδεύεται από μια σειρά από ενσωματωμένα modules και εργαλεία που έχουν σχεδιαστεί για να διευκολύνουν τη συλλογή και ανάλυση ενός ευρέος φάσματος στατιστικών στοιχείων δικτύου. Αυτά τα modules είναι εξοπλισμένα για να χειρίζονται λεπτομέρειες σε επίπεδο πακέτων, μετρήσεις διεκπεραιότητας, καθυστερήσεις, jitter και ρυθμούς απώλειας, μεταξύ άλλων κρίσιμων σημείων δεδομένων για λεπτομερή ανάλυση δικτύου.

- Ενσωματωμένα στατιστικά εργαλεία:

Υπάρχει μια ποικιλία από modules που διατίθενται στο NS-3 και επιτρέπουν στους ερευνητές να προσαρμόσουν το περιβάλλον προσομοίωσης στις συγκεκριμένες ανάγκες τους. Για παράδειγμα, στην εργασία των Maygusak.a.[\[38\]](#), προτείνεται ένα ολοκληρωμένο στατιστικό πλαίσιο. Αυτό το πλαίσιο ενισχύει τις δυνατότητες του NS-3, παρέχοντας προηγμένα εργαλεία για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων, καλύπτοντας έτσι τις αυξανόμενες απαιτήσεις της έρευνας δικτύου και επιτρέπει μια βαθιά εξέταση των συμπεριφορών του δικτύου, υποστηρίζοντας τους ερευνητές στην εξαγωγή ουσιαστικών γνώσεων από τις προσομοιώσεις τους. Η ενσωμάτωση τέτοιων

πλαισίων στο NS-3 υπογραμμίζει την προσαρμοστικότητα του προσομοιωτή και τη δέσμευσή του για την προώθηση της έρευνας δικτύου μέσω καινοτόμων εργαλείων και μεθοδολογιών.

Αρχεία Trace:

Ένας από τους κύριους μηχανισμούς που χρησιμοποιεί το NS-3 για τη συλλογή στατιστικών στοιχείων είναι μέσω αρχείων trace. Το NS-3 μπορεί να καταγράψει λεπτομερή ίχνη γεγονότων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως μεταδόσεις πακέτων, λήψεις, απώλειες κ.λπ. Αυτά τα αρχεία ανίχνευσης μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν για την εξαγωγή στατιστικών δεδομένων.

- FlowMonitorModule:

Το NS-3 περιλαμβάνει μια σουίτα flowmonitor, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη συλλογή στατιστικών στοιχείων σχετικά με τις ροές δικτύου. Μπορεί να παρακολουθεί και να αναφέρει διάφορα στατιστικά στοιχεία ροής, όπως απόδοση, καθυστέρηση και ρυθμούς απώλειας πακέτων, καθιστώντας το ένα πολύτιμο εργαλείο για την ανάλυση απόδοσης.

- Οπτικοποίηση και ανάλυση:

Ενώ το ίδιο το NS-3 δεν εστιάζει σε μεγάλο βαθμό στη γραφική απεικόνιση, τα δεδομένα που δημιουργεί μπορούν να εξαχθούν και να χρησιμοποιηθούν με εργαλεία εξωτερικής οπτικοποίησης και ανάλυσης για την καλύτερη κατανόηση και απεικόνιση των συμπεριφορών του δικτύου.

- Προσαρμοσμένη συλλογή δεδομένων:

Το NS-3 επιτρέπει στους χρήστες να εφαρμόζουν προσαρμοσμένους μηχανισμούς συλλογής δεδομένων. Οι χρήστες μπορούν να γράψουν τα δικά τους σενάρια στο περιβάλλον NS-3 για τη συλλογή συγκεκριμένων τύπων δεδομένων που τους ενδιαφέρουν.

- Άμεση ενσωμάτωση με πρωτόκολλα και σενάρια δικτύου:

Σε αντίθεση με το Mininet, το οποίο μιμείται ένα δίκτυο πάνω από έναν υπάρχοντα πυρήνα λειτουργικού συστήματος, το NS-3 προσομοιώνει απευθείας πρωτόκολλα και σενάρια δικτύου. Αυτό επιτρέπει πιο μεγάλο έλεγχο σχετικά με τα στατιστικά στοιχεία που συλλέγονται και τον τρόπο κατασκευής των σεναρίων δικτύου.

Συνοπτικά, το NS-3 είναι αυτόνομο όσον αφορά τη συλλογή στατιστικών στοιχείων για προσομοίωση δικτύου, παρέχοντας διάφορους μηχανισμούς και ενότητες για τη συλλογή ενός ευρέος φάσματος δεδομένων. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο για λεπτομερή ανάλυση δικτύου, ειδικά σε ερευνητικά σενάρια όπου συγκεκριμένες συμπεριφορές και χαρακτηριστικά του δικτύου πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά.

5.5.2 Ακρίβεια μετρήσεων

Για να εμβαθύνουμε στην ακρίβεια αυτών των τριών εργαλείων θεωρούμε το ακόλουθο σενάριο: τρεις εικονικές μηχανές (VM1, VM2 και VM3) στέλνουν ταυτόχρονα 10 MByte δεδομένων σε ένα τέταρτο μηχανήμα (VM4) και υποθέτουμε ότι το εύρος ζώνης από τους edgeswitches στο VM4 είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στους συνδέσμους μεταξύ των VM. Στην ανάλυση σεναρίων των προσομοιώσεων δικτύου, υπολογίσαμε τον εκτιμώμενο χρόνο μετάδοσης για μεταφορές δεδομένων εντός ενός δικτύου SDN σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

Theoretical Transmission Time=Data Size in MegaBits/Bandwidth in Mbps

Theoretical Transmission Time=10 Mbits/10 Mbps=1sec

Όπως υπολογίζεται, το αποτελεσματικό εύρος ζώνης για μετάδοση κάθε VM βρέθηκε να είναι περίπου 0,4167 MByte ανά δευτερόλεπτο.

Αυτό οδηγεί σε έναν εκτιμώμενο χρόνο μετάδοσης 1 δευτερολέπτου για κάθε VM για να στείλει το πακέτο δεδομένων του στο VM4, με την υπόθεση ίσου διαμοιρασμού εύρους ζώνης και χωρίς άλλη κίνηση δικτύου. Ενώ όπως ο υπολογισμός παρέχει μια θεωρητική βάση για το χρόνο μετάδοσης, οι πραγματικές μετρήσεις απόδοσης που λαμβάνονται από εργαλεία προσομοίωσης όπως το Mininet, το CloudSimSDN και το NS-3 ενδέχεται να διαφέρουν, λόγω παραγόντων όπως η επιβάρυνση πρωτοκόλλου, το latency και

οι ιδιαιτερότητες της εφαρμογής δικτύου κάθε περιβάλλοντος προσομοίωσης. Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της εξέτασης της φύσης των πόρων του δικτύου και των πιθανών επιπτώσεων στους χρόνους μετάδοσης σε περιβάλλοντα SDN.

➤ **Mininet**

Το Mininet αναπαράγει με ακρίβεια τις πραγματικές συμπεριφορές δικτύου. Η προσέγγισή της εξομοίωσης επιτρέπει υψηλό βαθμό πιστότητας στα χαρακτηριστικά απόδοσης, μιμούμενη στενά τις πραγματικές λειτουργίες δικτύου. Αυτό αναφέρουν οι Hennik.a. στην εργασία τους [\[20\]](#), η οποία ερευνά την ακρίβεια του Mininet στη διαχείριση και τη μέτρηση δικτύου SDN. Το έγγραφο υπογραμμίζει την ικανότητα του Mininet να υπολογίζει με ακρίβεια τη χρήση του bandwidth και να προσαρμόζεται σε δυναμικές συνθήκες δικτύου. Ωστόσο, η ακρίβεια του Mininet είναι εγγενώς συνδεδεμένη με το υλικό στο οποίο λειτουργεί. Η μελέτη αντιμετωπίζει έμμεσα αυτό τονίζοντας τον συμβιβασμό μεταξύ της συχνότητας δειγματοληψίας (polling frequency) και της ακρίβειας παρακολούθησης στα δίκτυα SDN. Σε σενάρια που περιλαμβάνουν δίκτυα μεγάλης κλίμακας, η ικανότητα του Mininet να προσομοιώνει με ακρίβεια τις συνθήκες περιορίζεται από τους διαθέσιμους πόρους υλικού, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις από την απόδοση του πραγματικού κόσμου. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων υλικού για τη βελτίωση της ακρίβειας εξομοίωσης του Mininet σε εκτεταμένα περιβάλλοντα δικτύου.

Στην εμπειρική μας αξιολόγηση του εργαλείου προσομοίωσης Mininet, αξιοποιήσαμε τη μέτρηση σχετικού σφάλματος $R(p_i) = \frac{p_i - \bar{p}_i}{p_i}$, $1 \leq i \leq n$ για να ποσοτικοποιήσουμε την ακρίβεια των προσομοιωμένων χρόνων μετάδοσης σε σχέση με το θεωρητικά καθορισμένο σημείο αναφοράς 8 δευτερολέπτων. Τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

Table5-5: Πίνακας αποτελεσμάτων μέτρησης σχετικού σφάλματος στο χρόνο μετάδοσης του Mininet

Link	Εκτιμώμενος Χρόνος Μετάδοσης (δευτ.)	Μέσος Χρόνος Μετρήσεως (δευτ.)	Σχετικό Σφάλμα (%)
VM1 προς VM4	1	1.13	13.0
VM2 προς VM4	1	1.11	11.0
VM3 προς VM4	1	1.11	11.0

Η ανάλυση αποκαλύπτει πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιωμένων και των αναμενόμενων χρόνων μετάδοσης, αντικατοπτρίζοντας την υψηλή ακρίβεια του Mininet. Για παράδειγμα, στο σενάριο VM1 προς VM4, το μέσο σχετικό σφάλμα ήταν 13.0%, ενώ για το VM2 προς VM4 ήταν 11.00%, και για το VM3 προς VM4 ήταν πάλι 11,00%. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν ότι το Mininet είναι σε θέση να προσομοιώσει τους χρόνους μετάδοσης με σημαντική ακρίβεια, με μικρές αποκλίσεις από τον εκτιμώμενο χρόνο μετάδοσης των 8 δευτερολέπτων.

Αυτά τα ευρήματα επιβεβαιώνουν την ικανότητα του Mininet να εξομοιώνει με ακρίβεια δικτυακές λειτουργίες και να παρέχει πολύτιμα δεδομένα για την αξιολόγηση δικτυακών σεναρίων. Επιπλέον, αυτή η ανάλυση υποδεικνύει ότι, για πιο περίπλοκα ή εκτεταμένα πειράματα, είναι κρίσιμο να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική του δικτύου και να πραγματοποιούνται βελτιώσεις στα μοντέλα προσομοίωσης για να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες. Τέλος, αυτή η ανάλυση επιβεβαιώνει την αξία του Mininet ως εργαλείου για την ανάπτυξη και επικύρωση δικτυακών στρατηγικών, ενώ τονίζει την ανάγκη για συνεχή επαγρύπνηση όσον αφορά τους περιορισμούς του υλικού και του λογισμικού.

➤ CloudSimSDN

Το CloudSimSDN είναι ένα εργαλείο εξαιρετικά σημαντικό για την προσομοίωση σύνθετων περιβαλλόντων δικτύου. Η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια του CloudSimSDN στην αναπαραγωγή συμπεριφορών δικτύου, προσφέρει επιβεβαίωση της χρησιμότητάς του στην ακριβή προσομοίωση των

SDN δικτύων. Ωστόσο ένας παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια αυτών των προσομοιώσεων είναι η ακρίβεια των χαρακτηριστικών του υλικού και η μοντελοποίηση των δεδομένων του πραγματικού κόσμου. Αυτό συνεπάγεται μια άμεση συσχέτιση μεταξύ της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και της ακρίβειας με την οποία τα δεδομένα και οι παράμετροι του πραγματικού κόσμου αντιγράφονται στο περιβάλλον προσομοίωσης. Η ακρίβεια γίνεται ακόμη πιο κρίσιμη όταν ασχολούμαστε με παραμέτρους που σχετίζονται με την υποδομή, όπου η σχολαστική και ακριβής δημιουργία προφίλ δεδομένων είναι απαραίτητη.

Και εδώ πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί σχετικού σφάλματος χρησιμοποιώντας εκτιμώμενο βασικό χρόνο μετάδοσης 1 δευτερολέπτου για κάθε σύνδεση.

Table5-6: Πίνακας αποτελεσμάτων μέτρησης σχετικού σφάλματος στο χρόνο μετάδοσης του CloudSimSDN

Link	Εκτιμώμενος Χρόνος Μετάδοσης (δευτ.)	Μέσος Χρόνος Μετρήσεως (δευτ.)	Σχετικό Σφάλμα (%)
VM1 προς VM4	1	0.21	79.0
VM2 προς VM4	1	0.26	74.0
VM3 προς VM4	1	0.35	65.0

Η ανάλυση αποκάλυψε σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιωμένων και των αναμενόμενων χρόνων μετάδοσης. Για παράδειγμα, στο σενάριο VM1 σε VM4, ο μέσος καταγεγραμμένος χρόνος μετάδοσης ήταν 0,21 δευτερόλεπτα, οδηγώντας σε ένα σχετικό σφάλμα περίπου -79.0%. Παρόμοιες τάσεις παρατηρήθηκαν στις συνδέσεις VM2 και VM3, με σχετικά σφάλματα -74.0% και -65.0%, αντίστοιχα. Αυτές οι σημαντικές παραλλαγές δείχνουν ότι το CloudSimSDN υποτιμά σημαντικά τον πραγματικό χρόνο μετάδοσης. Αυτή η απόκλιση θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στον τρόπο με τον οποίο το CloudSimSDN μοντελοποιεί τη συμπεριφορά του δικτύου, ιδιαίτερα όσον αφορά την κατανομή εύρους ζώνης και τη συμφόρηση δικτύου, σε σύγκριση με τα σενάρια του πραγματικού κόσμου.

Τέτοια ευρήματα είναι κρίσιμα για τους χρήστες του CloudSimSDN, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για προσεκτική εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι υποθέσεις μοντελοποίησης του εργαλείου ευθυγραμμίζονται με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και χαρακτηριστικά των περιβαλλόντων δικτύου τους. Καταλαβαίνουμε επίσης ότι για εφαρμογές όπου ο ακριβής χρονισμός είναι κρίσιμος, μπορεί να χρειαστεί πρόσθετη βαθμονόμηση των παραμέτρων προσομοίωσης ή βελτιώσεις στους αλγόριθμους μοντελοποίησης για να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ της προσομοίωσης και της πραγματικής απόδοσης δικτύου. Τα σημαντικά ποσοστά σχετικών σφαλμάτων υπογραμμίζουν τη σημασία της συνεχούς επικύρωσης και προσαρμογής των εργαλείων προσομοίωσης για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματά τους παραμένουν ισχυρά και αξιόπιστα για την πρόβλεψη των συμπεριφορών του δικτύου στον πραγματικό κόσμο.

➤ **NS-3**

Το NS-3 ξεχωρίζει ως ένα εξαιρετικά ακριβές εργαλείο προσομοίωσης στον τομέα του SDN , ιδιαίτερα στη μοντελοποίηση περίπλοκων σεναρίων. Η αποτελεσματικότητα του εργαλείου υπογραμμίζεται μέσω μιας λεπτομερούς σύγκρισης με φυσικά περιβάλλοντα δικτύου, δείχνοντας την ικανότητά του να αντικατοπτρίζει στενά τις πραγματικές συνθήκες δικτύου.

Η υψηλή ακρίβεια του NS-3 είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προσομοίωση περίπλοκων σεναρίων δικτύου. Η ικανότητα ακριβούς μοντελοποίησης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς του δικτύου υπό διάφορες συνθήκες επικυρώνει τη χρησιμότητά του για ερευνητές και μηχανικούς δικτύου.

Συνοπτικά, το NS-3 αναδεικνύεται ως ένα ισχυρό και ακριβές εργαλείο για την προσομοίωση δικτύου, προσφέροντας υψηλό βαθμό αξιοπιστίας στη μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας δικτύων. Η ακρίβειά του, που αποδεικνύεται από διάφορες μετρήσεις απόδοσης, το καθιερώνει ως βασικό εργαλείο για την

ανάπτυξη, τη δοκιμή και την επικύρωση στρατηγικών δικτύου τόσο στη θεωρητική έρευνα όσο και στις πρακτικές εφαρμογές.

Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του NS-3, εφαρμόζοντας υπολογισμούς σχετικού σφάλματος η ανάλυση αποκαλύπτει ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των πραγματικών χρόνων μετάδοσης και των αναμενόμενων.

Table5-7: Πίνακας αποτελεσμάτων μέτρησης σχετικού σφάλματος στο χρόνο μετάδοσης του NS-3

Link	Μέσος Χρόνος Μετάδοσης (δευτερόλεπτα)	Εκτιμώμενος Χρόνος Μετάδοσης (δευτερόλεπτα)	Σχετικό Σφάλμα (%)
VM1 προς VM4	0.204607	1	79.54
VM2 προς VM4	0.203307	1	79.67
VM3 προς VM4	0.205107	1	79.49

Συγκεκριμένα, για τα σενάρια VM1 προς VM4, VM2 προς VM4 και VM3 προς VM4, τα σχετικά σφάλματα βρέθηκαν να είναι περίπου -79.54%, -79.67% και -79.49% αντίστοιχα. Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν μια πιθανή υπερεκτίμηση της απόδοσης δικτύου στην προσομοίωση, η οποία μπορεί να οφείλεται σε λάθη στη μοντελοποίηση σε άλλους παράγοντες όπως η απουσία δικτυακής συμφόρησης και απωλειών πακέτων. Επιπλέον, τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία της ακριβούς επιλογής και διαμόρφωσης παραμέτρων στις προσομοιώσεις NS-3 για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύουν πιστά τις πραγματικές συνθήκες δικτύου. Ενώ το NS-3 είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη και επικύρωση στρατηγικής δικτύου τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πρακτικές εφαρμογές, οι χρήστες πρέπει να ασκούν προσεκτική βαθμονόμηση και επικύρωση σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις απόδοσης δικτύου.

5.6 Δυνατότητα κλιμάκωσης προσομοιώσεων

Στον εξελισσόμενο τομέα της δικτύωσης SDN, η κλιμάκωση αποτελεί βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής των προσομοιωτών SDN. Η δυνατότητα αξιόπιστης κλίμακας προσομοιώσεων δικτύου δεν είναι απλώς μια τεχνική απαίτηση, αλλά μια θεμελιώδης αναγκαιότητα για να διασφαλιστεί ότι οι γνώσεις που αποκτώνται από αυτές τις προσομοιώσεις παραμένουν σχετικές και εφαρμόσιμες σε σενάρια πραγματικού κόσμου. Αυτό το κεφάλαιο διερευνά την κρίσιμη σημασία της επεκτασιμότητας στους προσομοιωτές SDN, διερευνώντας πώς επηρεάζει το σχεδιασμό, τη δοκιμή και την ανάπτυξη λύσεων SDN σε διαφορετικά περιβάλλοντα, από δίκτυα επιχειρήσεων μικρής κλίμακας έως μεγάλα, πολύπλοκα κέντρα δεδομένων και υποδομές cloud.

Καθώς τα δίκτυα αυξάνονται σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, η ικανότητα του προσομοιωτή να κλιμακώνεται γίνεται ζωτικής σημασίας. Πρέπει να αναπαράγει με ακρίβεια τις συμπεριφορές και τις αλληλεπιδράσεις, εκατοντάδων αν όχι χιλιάδων, οντοτήτων δικτύου για να παρέχει ουσιαστικά δεδομένα και πληροφορίες.

Η επεκτασιμότητα είναι απαραίτητη για την κατανόηση της απόδοσης μιας λύσης SDN υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Βοηθά στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων συμφόρησης και υποβάθμισης της απόδοσης που μπορεί να προκύψουν καθώς κλιμακώνεται το δίκτυο.

Με την προσομοίωση δικτύων μεγάλης κλίμακας, οι προσομοιωτές SDN μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανομή πόρων, τον σχεδιασμό χωρητικότητας και τις στρατηγικές βελτιστοποίησης, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου.

Ένα βασικό στοιχείο του SDN είναι ο controller, ο οποίος διαχειρίζεται τις πολιτικές δικτύου και τον έλεγχο ροής. Η κλιμάκωση στις προσομοιώσεις βοηθά στη δοκιμή της ικανότητας του ελεγκτή να χειρίζεται έναν αυξανόμενο αριθμό κόμβων και τη σχετική πολυπλοκότητα.

Οι προσομοιωτές με δυνατότητα κλιμάκωσης επιτρέπουν σε ερευνητές και προγραμματιστές να πειραματιστούν με νέες αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες

δικτύου, διασφαλίζοντας ότι οι νέες εξελίξεις μπορούν να αντέξουν τις απαιτήσεις της μελλοντικής επέκτασης του δικτύου.

Θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά επεκτασιμότητας σημαντικών προσομοιωτών SDN όπως NS-3, Mininet και CloudSimSDN. Αυτή η ανάλυση όχι μόνο θα υπογραμμίσει τις δυνατότητές τους στην προσομοίωση δικτύων μεγάλης κλίμακας, αλλά θα συζητήσει επίσης τις ανταλλαγές και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα σε αυτά τα περιβάλλοντα. Η κατανόηση αυτών των πτυχών είναι σημαντική για οποιονδήποτε εμπλέκεται στην ανάπτυξη, τη δοκιμή ή την ανάπτυξη λύσεων SDN, καθώς επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των σχεδίων δικτύου σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου.

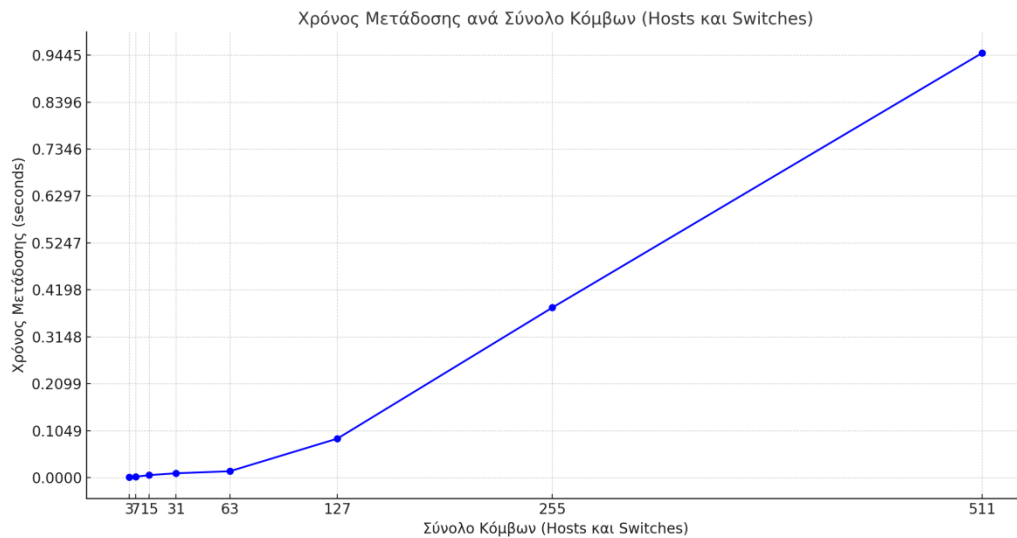
Mininet

Η επεκτασιμότητα σε εξομοιωτές όπως το Mininet είναι μια κρίσιμη παράμετρος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ακριβή αναπαραγωγή και πειραματισμό με μεγάλες και πολύπλοκες τοπολογίες δικτύου.

Επιδιώκοντας να κατανοήσουμε την επεκτασιμότητα του Mininet ως εργαλείο εξομοίωσης δικτύου, διεξήγαμε μια σειρά πειραμάτων με στόχο την αξιολόγηση των ορίων αυτού του περιβάλλοντος. Η εστίαση ήταν στη σταδιακή αύξηση του αριθμού των κεντρικών υπολογιστών και των switches για να παρατηρηθεί ο αντίκτυπος σε βασικές μετρήσεις απόδοσης, όπως ο χρόνος μετάδοσης, η χρήση της CPU και η κατανάλωση μνήμης.

Τα αποτελέσματα, αν και διορατικά, περιορίστηκαν από τους περιορισμούς του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή. Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε μια εγκατάσταση που επέκτεινε μέχρι 256 hosts και 255 switches. Τα πειράματα περιλάμβαναν τη διεξαγωγή δοκιμών εύρους ζώνης TCP με iperf μεταξύ ζευγών κεντρικών υπολογιστών, με έναν κεντρικό υπολογιστή ανά switch να ενεργεί ως πελάτης και έναν άλλο ως διακομιστής. Πέρα από ένα σημείο, οι περιορισμοί των υπολογιστικών πόρων έγιναν εμφανείς, επηρεάζοντας την ικανότητα περαιτέρω κλιμάκωσης της τοπολογίας του δικτύου μέσα στο Mininet.

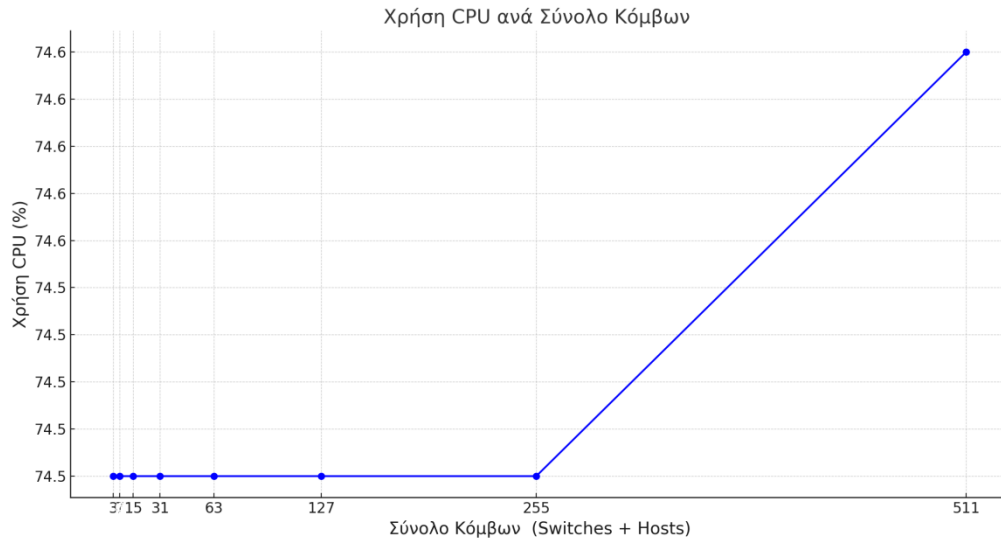
❖ Χρόνος μετάδοσης:



Εικόνα 19 Κλιμάκωση χρόνου μετάδοσης στο Mininet

Το σχήμα απεικονίζει τον χρόνο μετάδοσης σε όλο το δίκτυο καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων. Αρχικά, η αύξηση του χρόνου μετάδοσης είναι σταδιακή· ωστόσο, καθώς το δίκτυο επεκτείνεται, παρατηρείται μια σημαντική κλιμάκωση στον χρόνο μετάδοσης. Ειδικότερα, ενώ ο χρόνος μετάδοσης αυξάνεται λίγο περισσότερο από το διπλάσιο καθώς ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται από 3 σε 31, παρουσιάζεται μια δραματική άνοδος κατά την επέκταση από 127 σε 511 κόμβους, δείχνοντας ότι η απόδοση προώθησης πακέτων του Mininet ίσως υπόκειται σε σημαντικές καθυστερήσεις σε μεγαλύτερες κλίμακες.

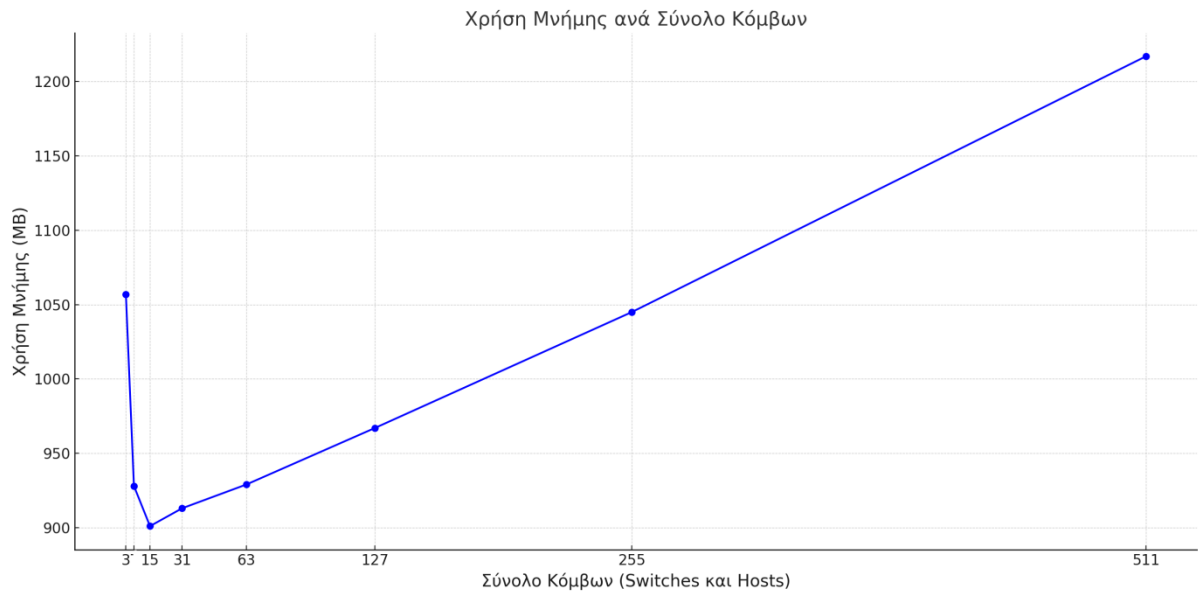
❖ Χρήση CPU



Εικονα17 Κλιμάκωση CPU στο Mininet

- ❖ Το γράφημα δείχνει ότι η χρήση της CPU διατηρείται εξαιρετικά σταθερή κατά τις πρώτες επαναλήψεις, με μια αύξηση κατά την τελευταία επανάληψη. Αυτό υποδεικνύει ότι το σύστημα διατηρεί σταθερή την απόδοση του CPU ακόμη και καθώς ο αριθμός των διακοπών και των κεντρικών υπολογιστών διπλασιάζεται σε κάθε επανάληψη, μέχρι ένα δίκτυο μεγέθους 255 switches και 256 hosts. Η ελαφρά αυτή αύξηση στο τέλος μπορεί να δείχνει την αρχή της επίδρασης κλιμάκωσης στους πόρους της CPU.

❖ Κατανάλωση μνήμης:



Εικόνα 18 Κλιμάκωση μνήμης στο Mininet

Η χρήση της μνήμης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα, δείχνει μια γενικά αυξητική τάση στη χρήση της μνήμης σε σχέση με το μέγεθος του δικτύου, με μια αρχική μείωση ακολουθούμενη από μια σταθερή αύξηση καθώς ο αριθμός των διακοπών και των κεντρικών υπολογιστών μεγαλώνει. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως πιο αποδοτική διαχείριση μνήμης του περιβάλλοντος προσομοίωσης σε μικρότερες κλίμακες, αλλά με ανάγκη για σταδιακά περισσότερη μνήμη καθώς το μέγεθος του δικτύου επεκτείνεται.

Τα πειράματα τόνισαν τον αντίκτυπο των περιορισμών υλικού στην προσομοίωση δικτύου. Η χρήση της CPU και η κατανάλωση μνήμης κλιμακώθηκαν σε μεγαλύτερες τοπολογίες δικτύου, υποδεικνύοντας τον αγώνα του υλικού να συμβαδίσει με την αυξανόμενη ζήτηση.

Χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή POX, οι προσομοιώσεις χρειάστηκαν πάνω από 20 λεπτά για μεγαλύτερες τοπολογίες, υποδηλώνοντας ότι η ικανότητα του controller να διαχειρίζεται έναν αυξανόμενο αριθμό κόμβων επηρεάζει τη συνολική απόδοση.

Ενώ υπάρχει υποβάθμιση της απόδοσης όσο τα δίκτυο επεκτείνεται τα αποτελέσματα δεν καθόρισαν οριστικά τον μέγιστο αριθμό κόμβων που θα μπορούσαν να προσομοιωθούν. Υποδεικνύει ότι με προσεκτική διαχείριση και πιθανές βελτιστοποιήσεις, μεγαλύτερες προσομοιώσεις θα μπορούσαν να είναι εφικτές, ακόμη και σε μέτριο υλικό.

Με αυτά τα αποτελέσματα σαν αφετηρία μπορούμε να στραφούμε στην εργασία των Muelask.a.[39] για περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στα όρια της κλιμάκωσης.

Αυτό το paper παρέχει μια ολοκληρωμένη μελέτη της απόδοσης του Mininet, εστιάζοντας ιδιαίτερα στην κατανάλωση πόρων και την υποβάθμιση της απόδοσης λόγω του προγραμματισμού των νημάτων εκτέλεσης, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τα πειραματικά αποτελέσματα. Διερευνά διαφορετικά σενάρια για να αξιολογήσει πώς οι στρατηγικές τοποθέτησης νημάτων και οι συνθήκες δικτύου όπως η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση και το jitter επηρεάζουν τη συνολική απόδοση και την κατανάλωση πόρων των αναπτύξεων Mininet.

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία υποδηλώνουν ότι το Mininet μπορεί να μιμηθεί αποτελεσματικά δίκτυα με έως και 1500 κεντρικούς υπολογιστές, με τον RT) να παραμένει κάτω από 1 ms για δίκτυα με 1000 ή λιγότερους κεντρικούς υπολογιστές και μόλις κοντά στο 1 ms για ένα δίκτυο με 1500 hosts. Αυτές οι πληροφορίες υποδηλώνουν τη δυνατότητα κλιμάκωσης πέρα από τα όρια που καθορίστηκαν στις δοκιμές μου.

Η εργασία διερευνά επίσης τον τρόπο με τον οποίο το Mininet αντιμετωπίζει εκτεταμένο φόρτο εργασίας δικτύου, μια λεπτομέρεια που επηρεάζει άμεσα την πρακτικότητα των προσομοιώσεων δικτύου. Αποκαλύπτει πώς η απόδοση του Mininet δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη έως και 10 switches, διατηρώντας μια σταθερή μέση τιμή κοντά στα 22-23 Gb/s bandwidth. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τα όρια υποβάθμισης της απόδοσης που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές μου, όπου η χρήση της CPU αυξήθηκε αλλά οι χρόνοι μετάδοσης παρέμειναν σταθεροί μέχρι τη δοκιμασμένη κλίμακα. Η εργασία βασίζεται σε αυτά τα ευρήματα, παρέχοντας ποσοτικά δεδομένα

σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο οι μετρήσεις απόδοσης του Mininet — όπως το συγκεντρωτικό εύρος ζώνης και το RTT— αλλάζουν με την εισαγωγή περισσότερων κόμβων και μεγαλύτερου traffic.

Η περιεκτική ανάλυση της εργασίας παρέχει ένα σημείο αναφοράς για τον μέγιστο αριθμό κόμβων και το επίπεδο φόρτου εργασίας που μπορεί να χειριστεί το Mininet, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για την εστίαση στην επεκτασιμότητα. Αυτά τα σημεία αναφοράς όχι μόνο επικυρώνουν τα ευρήματά μου, αλλά τα επεκτείνουν επιδεικνύοντας τις συνθήκες υπό τις οποίες η απόδοση του Mininet παραμένει αποτελεσματική ή αρχίζει να επιδεινώνεται.

Συνοπτικά, η εξερεύνηση της επεκτασιμότητας του Mininet επιβεβαιώνει ότι είναι ικανό να χειριστεί αποτελεσματικά ένα πολύπλοκο δίκτυο, δεδομένων των κατάλληλων συνθηκών και πόρων. Τα αποτελέσματα της εργασίας υποδεικνύουν ότι με τη στρατηγική διαχείριση και βελτιστοποίηση πόρων, το Mininet μπορεί να προωθηθεί για την προσομοίωση ακόμη πιο εκτεταμένων και απαιτητικών δικτυακών περιβαλλόντων, κάτι που αποτελεί σημαντικό βήμα για μελλοντική έρευνα στην προσομοίωση δικτύου.

CloudSimSDN

Καθώς το cloudcomputing συνεχίζει να εξελίσσεται, τα δίκτυα εντός των υποδομών γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, απαιτώντας ισχυρά και επεκτάσιμα εργαλεία προσομοίωσης. Η προσομοίωση δικτύων μεγάλης κλίμακας δεν είναι απλώς θέμα αντιγραφής κόμβων αλλά περιλαμβάνει την περίπλοκη αναπαραγωγή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφόρων στοιχείων δικτύου, όπως εικονικές μηχανές (VMs), switches και controllers. Η αποτελεσματικότητα αυτών των αλληλεπιδράσεων, ιδιαίτερα υπό τον έλεγχο των πολιτικών SDN, είναι σημαντικά για την κατανόηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης των πραγματικών δικτύων cloud.

Όπως και με το mininet στόχος είναι να διερευνήσουμε και να αναλύσουμε πώς λειτουργεί το CloudSimSDN υπό συνθήκες εκτεταμένης προσομοίωσης

δικτύου. Συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να προσδιοριστεί όχι μόνο η μέγιστη κλίμακα που μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά το CloudSimSDN, αλλά και να παρατηρηθεί πώς εξελίσσονται οι μετρήσεις απόδοσης δικτύου καθώς το δίκτυο μεγαλώνει σε πολυπλοκότητα και μέγεθος.

Η κατανόηση της επεκτασιμότητας του CloudSimSDN είναι απαραίτητη για διάφορους λόγους. Πρώτον, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα του εργαλείου να μοντελοποιεί περιβάλλοντα cloud μεγάλης κλίμακας, κάτι που είναι κρίσιμο για πολλούς σκοπούς. Δεύτερον, βοηθά στον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης ή περιορισμών απόδοσης, καθοδηγώντας έτσι βελτιστοποιήσεις και βελτιώσεις στον προσομοιωτή. Τέλος, βοηθά τους αρχιτέκτονες και τους ερευνητές δικτύων να επιλέξουν τα σωστά εργαλεία για τις συγκεκριμένες ανάγκες προσομοίωσης, διασφαλίζοντας ότι τα μοντέλα και τα ευρήματά τους αντικατοπτρίζουν τα σενάρια του πραγματικού κόσμου.

Σε αντίθεση με τα πειράματα στο Mininet όπου περιοριστήκαμε στους 60 κόμβους το CloudSimSDN επέτρεψε την προσομοίωση μεγαλύτερων δικτύων, φτάνοντας τους 1024 κόμβους. Αυτή η σημαντική αύξηση της επεκτασιμότητας μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις των δύο προσομοιωτών, με το CloudSimSDN να είναι πιο ελαφρύ και να χρειάζεται λιγότερους πόρους στη λειτουργία του.

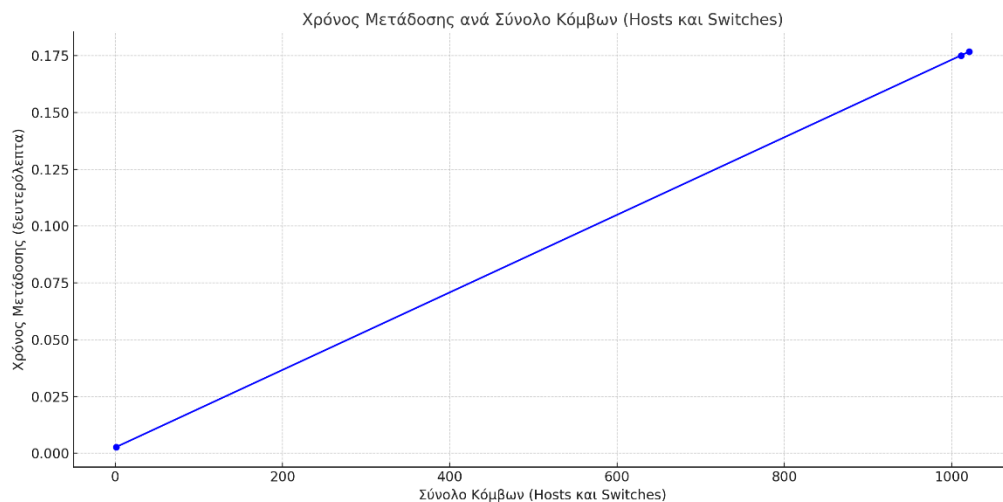
Η πειραματική ρύθμιση για το CloudSimSDN περιλάμβανε μια αρχική διαμόρφωση που αντικατόπτριζε ένα απλοποιημένο δίκτυο κέντρων δεδομένων. Το βασικό σενάριο αποτελούνταν από έναν coreswitch συνδεδεμένο με πολλούς edgeswitches, καθένας από τους οποίους είχε δύο hosts: ο ένας ενεργούσε ως αποστολέας και ο άλλος ως δέκτης. Αυτή η εγκατάσταση είναι ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο ενός βασικού δικτύου κέντρων δεδομένων cloud, που επιτρέπει τη μελέτη των συμπεριφορών του δικτύου σε ένα ελεγχόμενο αλλά ρεαλιστικό περιβάλλον.

Για την κλιμάκωση του δικτύου, ο αριθμός των nodes αυξήθηκε σταδιακά και η τελική διαμόρφωση περιλάμβανε την κλιμάκωση σε ένα δίκτυο με 512 edgeswitches, ο καθένας συνδεδεμένος στον coreswitch και φιλοξενώντας δύο

κόμβους, προσομοιώνοντας αποτελεσματικά ένα δίκτυο με 1024 κόμβους συνολικά.

Μία από τις βασικές προκλήσεις στη ρύθμιση των πειραμάτων CloudSimSDN ήταν η δημιουργία των απαραίτητων φυσικών και εικονικών αρχείων τοπολογίας, καθώς και των αρχείων φόρτου εργασίας για την προσομοίωση. Το CloudSimSDN προσφέρει γεννήτριες τοπολογίας (το `org.cloudbus.cloudsim.sdn.example.topogenerators`) που διευκολύνουν τη δημιουργία αυτών των αρχείων. Αυτές οι γεννήτριες επιτρέπουν την προσαρμογή διαφόρων παραμέτρων και μπορούν να ενσωματώσουν διαφορετικές κατανομές εντός της τοπολογίας. Αυτά τα εργαλεία συνέβαλαν στην αποτελεσματική δημιουργία πολύπλοκων τοπολογιών δικτύου και αντίστοιχων φόρτων εργασίας, προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες των επιδιωκόμενων σεναρίων προσομοίωσης.

❖ Χρόνος μετάδοσης:



Εικόνα 20 Κλιμάκωση χρόνου μετάδοσης στο CloudSimSDN

Ο χρόνος μετάδοσης έδειξε σταδιακή αύξηση καθώς ο αριθμός των κόμβων κλιμακώθηκε, ξεκινώντας από 0,00273 δευτερόλεπτα στον πρώτο σύνδεσμο και φτάνοντας τα 0,17715 δευτερόλεπτα στον σύνδεσμο 1022-1023.

Καθώς ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο αυξάνεται, παρατηρούμε μια γραμμική αύξηση του χρόνου μετάδοσης. Αυτό είναι ενδεικτικό του χειρισμού

του CloudSimSDN προσομοιώσεων μεγαλύτερων δικτύων, όπου η καθυστέρηση διάδοσης, ο χρόνος επεξεργασίας και οι καθυστερήσεις στην ουρά σε κάθε κόμβο συμβάλλουν σφαιρικά στο συνολικό χρόνο μετάδοσης.

Η γραμμική τάση δείχνει ότι η επεκτασιμότητα του δικτύου, όσον αφορά τον χρόνο μετάδοσης, είναι προβλέψιμη και διαχειρίσιμη μέχρι τον δοκιμασμένο αριθμό κόμβων. Αυτή η προβλεψιμότητα είναι σημαντική για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση υποδομών δικτύων cloud μεγάλης κλίμακας.

Ωστόσο, η συνέπεια αυτής της γραμμικής αύξησης συνεπάγεται επίσης ότι καθώς το δίκτυο μεγαλώνει, οι καθυστερήσεις μετάδοσης θα γίνουν πιο σημαντικές, γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει εφαρμογές που απαιτούν μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο ή αλληλεπιδράσεις χαμηλής καθυστέρησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για υπηρεσίες όπως το VoIP, τα διαδικτυακά παιχνίδια ή οποιεσδήποτε εφαρμογές που βασίζονται σε cloud όπου η εμπειρία του τελικού χρήστη είναι ευαίσθητη.

Το γράφημα δεν εμφανίζει ξαφνικές αιχμές ή ανωμαλίες, κάτι που υποδηλώνει ότι η προσομοίωση CloudSimSDN διατηρεί μια σταθερή αύξηση του latency χωρίς ξαφνικές υποβαθμίσεις απόδοσης σε συγκεκριμένες κλίμακες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πρόκειται για μια εξιδανικευμένη αναπαράσταση και παράγοντες του πραγματικού κόσμου, όπως η συμφόρηση δικτύου, οι περιορισμοί υλικού και οι ανεπάρκειες λογισμικού θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια λιγότερο ομαλή καμπύλη.

❖ Χρήση CPU

Η χρήση της CPU παρέμεινε σταθερή στο 0,12466 σε όλες τις προσομοιώσεις, ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου.

Η σταθερή χρήση της CPU που παρατηρείται στα αποτελέσματα του CloudSimSDN είναι ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα. Δείχνει ότι καθώς το δίκτυο κλιμακώνεται από λίγους κόμβους σε πάνω από χίλιους, το φορτίο της CPU

δεν αυξάνεται. Αυτή η συνέπεια υποδηλώνει πολλά πράγματα σχετικά με το περιβάλλον CloudSimSDN και τον χειρισμό των προσομοιώσεων δικτύου:

- **Αποδοτικότητα διαχείρισης πόρων:** Το CloudSimSDN φαίνεται να διαχειρίζεται τους υπολογιστικούς του πόρους με υψηλή απόδοση, χρησιμοποιώντας μια σταθερή ποσότητα ισχύος CPU ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου. Αυτή η αποτελεσματικότητα θα μπορούσε να οφείλεται στην ικανότητα του προσομοιωτή να εκτελεί παράλληλα τις εργασίες ή σε έναν καλά σχεδιασμένο taskscheduler που διατηρεί σταθερό φορτίο CPU.
- **ScalableSimulationArchitecture:** Η αρχιτεκτονική προσομοίωσης φαίνεται να είναι εξαιρετικά επεκτάσιμη, διαχειριζόμενη μεγαλύτερα δίκτυα χωρίς αναλογική αύξηση του φορτίου της CPU. Αυτή η επεκτασιμότητα είναι επωφελής για την προσομοίωση εκτεταμένων τοπολογιών δικτύου και θα μπορούσε να αντικατοπτρίζει μια υποκείμενη βελτιστοποίηση εντός του CloudSimSDN που χειρίζεται την πολυπλοκότητα του δικτύου χωρίς πρόσθετες υπολογιστικές απαιτήσεις.
- **Ομοιόμορφη πολυπλοκότητα εργασιών:** Οι εργασίες προσομοίωσης, που σχετίζονται με αποφάσεις επεξεργασίας πακέτων δικτύου και δρομολόγησης, μπορεί να έχουν σταθερή πολυπλοκότητα που δεν κλιμακώνεται με τον αριθμό των κόμβων. Εάν οι εργασίες της CPU είναι απλές ή εάν η αύξηση των κόμβων δεν προσθέτει πιο σύνθετες λειτουργίες, τότε η χρήση της CPU φυσικά θα αυξηθεί.
- **Περιορισμός λεπτομέρειας προσομοίωσης:** Η σταθερή χρήση της CPU μπορεί επίσης να υποδηλώνει μια απλοποίηση στο μοντέλο προσομοίωσης. Εάν το CloudSimSDN δεν λαμβάνει υπόψη όλες τις περιπλοκές που θα αντιμετωπίσει ένας πραγματικός ελεγκτής SDN, όπως δυναμικές αλλαγές πολιτικής ή ανάλυση κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, τότε η χρήση της CPU δεν θα αντικατοπτρίζει τις πραγματικές απαιτήσεις της κλιμάκωσης σε ένα περιβάλλον παραγωγής.

Συνοπτικά, η σταθερή χρήση της CPU σε έναν αυξανόμενο αριθμό κόμβων υποδηλώνει ότι το CloudSimSDN μπορεί να προσομοιώσει δίκτυα μεγάλης

κλίμακας χωρίς γραμμική αύξηση στις απαιτήσεις πόρων της CPU. Αυτό το αποτέλεσμα μιλά για τις δυνατότητες του CloudSimSDN ως εργαλείου για την προσομοίωση και τη μελέτη μεγάλων δικτύων. Ωστόσο, υπογραμμίζει επίσης τη σημασία της κατανόησης των περιορισμών των προσομοιωμένων περιβαλλόντων κατά τον σχεδιασμό πραγματικών αναπτύξεων.

❖ Κατανάλωση μνήμης:

Η χρήση της μνήμης όπως και η μετάδοση δεδομένων παρουσίασε προοδευτική αύξηση, ξεκινώντας από το 0,50586 και σταδιακά ανέβηκε στα 6,49414, σε σχέση με την κλιμάκωση του δικτύου και αντανακλά την αυξανόμενη ζήτηση πόρων του προσομοιωτή με μεγαλύτερα μεγέθη δικτύου. Ωστόσο, η εξέλιξη είναι σταθερή και ελεγχόμενη, υποδηλώνοντας καλή επεκτασιμότητα χωρίς απότομες αυξήσεις στην κατανάλωση πόρων και αποκαλύπτει αρκετές σημαντικές πτυχές της απόδοσης της προσομοίωσης και της διαχείρισης πόρων:

- **Επεκτασιμότητα της κατανομής πόρων:** Τα αποτελέσματα αντικατοπτρίζουν έναν επεκτάσιμο μηχανισμό κατανομής πόρων εντός του CloudSimSDN. Η σταδιακή αύξηση στη χρήση μνήμης μας δείχνει ότι ο προσομοιωτής διαχειρίζεται αποτελεσματικά τους πόρους μνήμης, κατανέμοντας περισσότερους όπως απαιτείται χωρίς σπατάλη ή απροσδόκητες αυξομειώσεις που θα μπορούσαν να υποδηλώνουν αναποτελεσματικότητα ή διαρροή μνήμης.

- **Μηχανισμοί Buffering και Caching:** Ο προσομοιωτής φαίνεται να χειρίζεται αποτελεσματικά τα buffering και caching. Καθώς το δίκτυο μεγαλώνει, αυξάνεται και ο όγκος των δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν στην προσωρινή μνήμη και η αύξηση της χρήσης μνήμης υποδηλώνει ότι το CloudSimSDN έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί αυτήν την ανάπτυξη. Αυτό είναι ενδεικτικό μιας ισχυρής πλατφόρμας προσομοίωσης που μπορεί να χειριστεί το αυξημένο φορτίο χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης.

- Διαχείριση κατάστασης: Σε οποιοδήποτε δίκτυο, οι μεγαλύτερες τοπολογίες απαιτούν περισσότερη μνήμη για τη διαχείριση των πληροφοριών. Η αναλογική αύξηση στη χρήση μνήμης με τον αριθμό των κόμβων υποδηλώνει ότι το CloudSimSDN διατηρεί λεπτομερείς πληροφορίες κατάστασης για κάθε κόμβο και σύνδεση, κάτι που είναι κρίσιμο για την ακριβή προσομοίωση των συμπεριφορών δικτύου.
- Επιπτώσεις για προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας: Η παρατηρούμενη τάση χρήσης μνήμης υποδηλώνει ότι ενώ το CloudSimSDN μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερες προσομοιώσεις δικτύου, οι απαιτήσεις μνήμης θα συνεχίσουν να αυξάνονται γραμμικά με το μέγεθος του δικτύου. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό προσομοιώσεων σε υλικό με περιορισμένους πόρους μνήμης.

Συνοπτικά, τα δεδομένα της χρήσης μνήμης υποστηρίζουν το συμπέρασμα ότι το CloudSimSDN κλιμακώνει τη RAM του με γραμμικό και προβλέψιμο τρόπο καθώς μεγαλώνει η τοπολογία του δικτύου. Αυτό αντανακλά καλά την αρχιτεκτονική της προσομοίωσης και τις δυνατότητες διαχείρισης πόρων, υποδηλώνοντας ότι μπορεί να είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για την προσομοίωση περιβαλλόντων δικτύου μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, οι χρήστες θα πρέπει να γνωρίζουν τη γραμμική αύξηση στις απαιτήσεις μνήμης για να διασφαλίσουν ότι η υποδομή προσομοίωσης μπορεί να καλύψει αυτές τις ανάγκες, ιδιαίτερα για πολύ μεγάλα μοντέλα δικτύου.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Mininet, όπου οι περιορισμοί υλικού μας περιόρισαν την επεκτασιμότητα σε 511 κόμβους, το CloudSimSDN παρουσιάζει την ικανότητα να χειρίζεται πολύ μεγαλύτερες κλίμακες, επιτρέποντάς μας να φτάσουμε τους 1024 κόμβους. Αυτή η ανώτερη επεκτασιμότητα θα μπορούσε να αποδοθεί στη φύση του CloudSimSDN που βασίζεται στην προσομοίωση, το οποίο μπορεί να μην μιμείται τις αλληλεπιδράσεις όσο το Mininet, επιτρέποντάς όμως να κλιμακωθεί περαιτέρω πριν αντιμετωπίσει περιορισμούς πόρων.

Παρά τα αρχικά εμπόδια στη διαμόρφωση και τη δημιουργία των απαραίτητων αρχείων, το CloudSimSDN έχει επιδείξει μια ισχυρή ικανότητα

να χειρίζεται τις κλιμακούμενες απαιτήσεις δικτύου χωρίς συμβιβασμούς στην απόδοση.

Οι βασικές μετρήσεις - χρόνος μετάδοσης, χρήση CPU και χρήση μνήμης - παρουσίασαν μια προβλέψιμη γραμμική αύξηση, η οποία μιλάει πολύ για την αρχιτεκτονική του προσομοιωτή. Αυτή η χαρακτηριστική γραμμικότητα είναι ενδεικτική ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος που μπορεί να χειριστεί αυξητικά φορτία με κλιμακωτό τρόπο. Είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο ότι η σταθερή χρήση της CPU υποδηλώνει τη βέλτιστη χρήση υπολογιστικών πόρων, οι οποίοι δεν παρουσίαζαν διακυμάνσεις ακόμη και όταν αυξανόταν η πολυπλοκότητα του δικτύου.

Τέτοια χαρακτηριστικά απόδοσης ενισχύουν τον CloudSimSDN ως μια αξιόπιστη και επεκτάσιμη πλατφόρμα προσομοίωσης. Είναι ικανό να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του δικτύου, κάτι που είναι χρήσιμο τόσο για τη θεωρητική διερεύνηση των αρχών του δικτύου όσο και για την πρακτική ανάπτυξη των υπηρεσιών cloud.

Τα ευρήματα από αυτήν την ανάλυση είναι απαραίτητα για αρχιτέκτονες και μηχανικούς δικτύων που θέλουν να αναπτύξουν δίκτυα cloud μεγάλης κλίμακας. Παρέχουν ένα σημείο αναφοράς για την αναμενόμενη απόδοση και μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με το σχεδιασμό του δικτύου, την κατανομή πόρων και την πιθανή ανάγκη για κλιμάκωση ή αναβάθμιση της υποδομής καθώς το δίκτυο μεγαλώνει. Υπογραμμίζει επίσης τη σημασία της διεξαγωγής τέτοιων προσομοιώσεων πριν από την πραγματική ανάπτυξη για την πρόβλεψη και τον μετριασμό των προβλημάτων επεκτασιμότητας.

NS-3

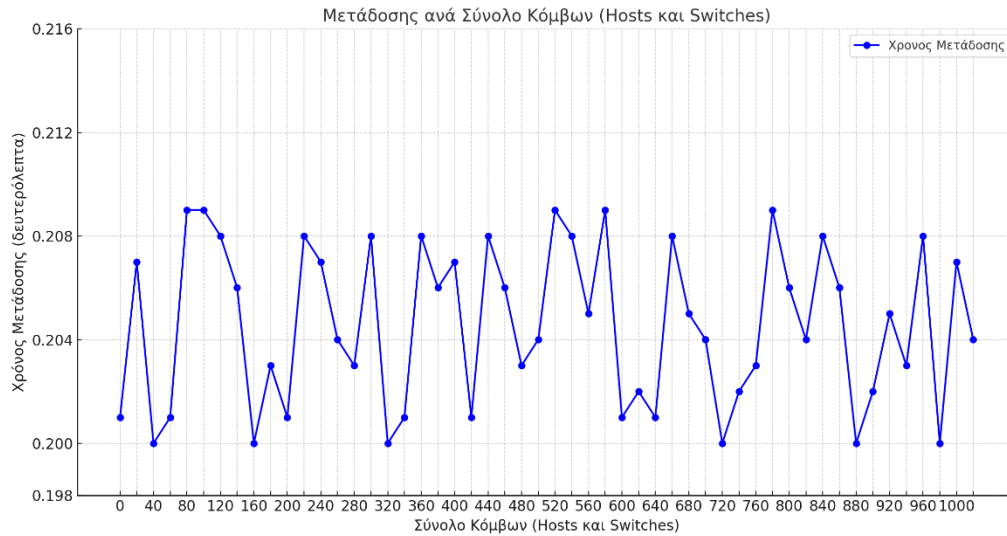
Το NS-3 είναι ένα ευέλικτο και ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη δικτυακών συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Δύο σημαντικές εργασίες σχετικά με την επεκτασιμότητα του NS-3, θέτουν το υπόβαθρο για μια λεπτομερή εξερεύνηση του NS-3 στο πλαίσιο προσομοιώσεων δικτύου μεγάλης κλίμακας.

Οι συγγραφείς Wiggins κ.α. [40] εμβαθύνουν στην επεκτασιμότητα του NS-3 όταν χρησιμοποιείται με τη λειτουργία Άμεσης Εκτέλεσης Κώδικα (DCE). Παρουσιάζουν μια αξιολόγηση του προσομοιωτή κάτω από πολλές κλίμακες πειραμάτων δικτύου. Η εστίαση είναι στην κατανόηση του πώς το NS-3, σε συνδυασμό με το DCE, συμπεριφέρεται υπό την πίεση αυξανόμενων κόμβων δικτύου και πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων. Τα ευρήματα δείχνουν ότι το NS-3 διατηρεί μια ισχυρή απόδοση, ακόμη και όταν η πολυπλοκότητα του δικτύου κλιμακώνεται, αποδεικνύοντας τις δυνατότητές του στην αποτελεσματική προσομοίωση αρχιτεκτονικών δικτύων μεγάλης κλίμακας.

Στην εργασία τους οι Renard κ.α. [41] διεξάγουν μια ανάλυση της απόδοσης και της επεκτασιμότητας του NS-3. Η έρευνα υπογραμμίζει τις δυνατότητες του προσομοιωτή στο χειρισμό εκτεταμένων μοντέλων δικτύου, διατηρώντας παράλληλα ακριβείς και αποτελεσματικές μετρήσεις απόδοσης. Ρίχνει φως στους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την επεκτασιμότητα του NS-3, όπως η κατανομή υπολογιστικών πόρων και η πολυπλοκότητα της προσομοίωσης. Τα συμπεράσματα της εργασίας υπογραμμίζουν την καταλληλότητα του NS-3 για προσομοιώσεις υψηλής πιστότητας σε περιβάλλοντα δικτύου μεγάλης κλίμακας.

Με βάση αυτές τις θεμελιώδεις μελέτες, η έρευνά μας επιδιώκει να αποκαλύψει περαιτέρω τις δυνατότητες του NS-3. Στόχος μας είναι να διερευνήσουμε τα όρια με την προσομοίωση εκτεταμένων σεναρίων δικτύου, παρόμοια με τις εφαρμογές του πραγματικού κόσμου. Στις δοκιμές μας δημιουργήσαμε μια προσομοίωση δικτύου μεγάλης κλίμακας για να δοκιμάσουμε αυστηρά την απόδοση του προσομοιωτή. Το δίκτυο περιλαμβάνει έναν coreswitch συνδεδεμένο με 512 edgeswitches, οι οποίοι με τη σειρά τους συνδέονται με 1024 hosts προσομοιώνοντας αποτελεσματικά ένα σημαντικό κλιμακούμενο δίκτυο. Σε αυτή τη ρύθμιση, ένας host λειτουργεί ως receiver για μεταδόσεις δεδομένων από όλους τους άλλους κόμβους. Εξετάζοντας πτυχές όπως η απόδοση μετάδοσης δεδομένων, η απόδοση CPU και η απόδοση μνήμης, σκοπεύουμε να εξερευνήσουμε τα όρια και τις δυνατότητες του NS-3 στον χειρισμό προσομοιώσεων δικτύου μεγάλης κλίμακας σε πραγματικές συνθήκες.

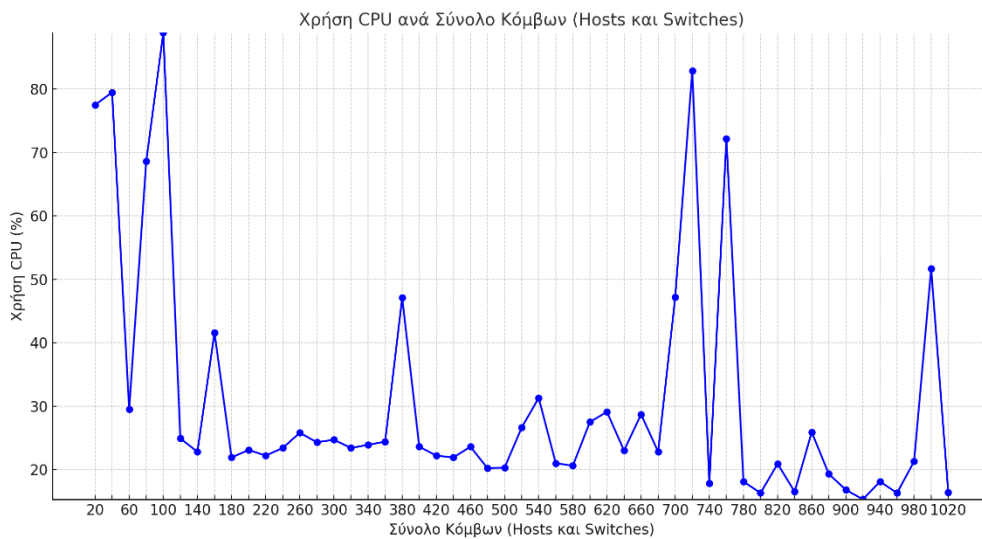
❖ Χρόνος μετάδοσης:



Εικόνα 21 Κλιμάκωση χρόνου μετάδοσης στο NS-3

Οι χρόνοι μετάδοσης, που κυμαίνονται μεταξύ 0,200007 και 0,209007 δευτερόλεπτα με ελάχιστη απόκλιση (λιγότερο από 0,01 δευτερόλεπτα διαφορά) εμφανίζουν αξιοσημείωτη συνέπεια σε όλα τα VM. Αυτή η ομοιομορφία είναι ένας θετικός δείκτης της σταθερότητας και της αποτελεσματικότητας του δικτύου, καθοριστικής σημασίας για την επεκτασιμότητα και υποδηλώνει ένα επεκτάσιμο δίκτυο χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης.

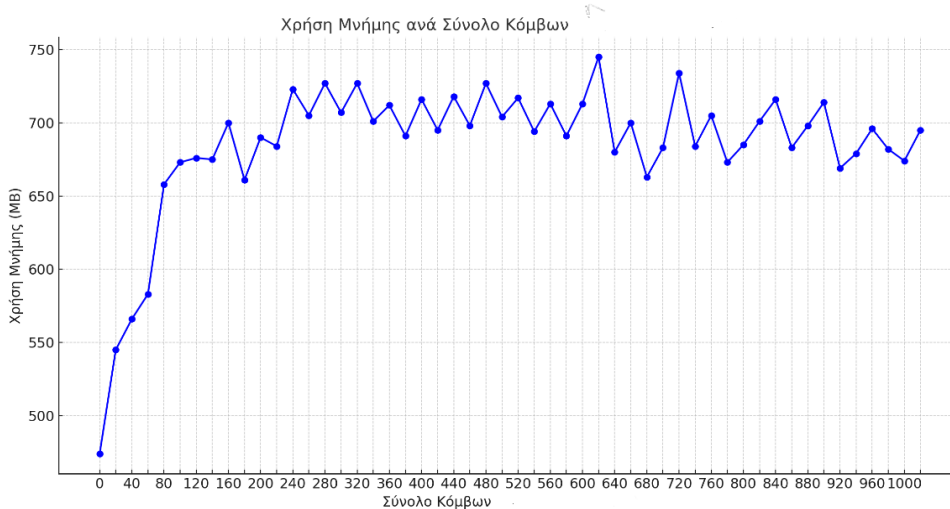
❖ Χρήση CPU:



Εικόνα22 Κλιμάκωση CPU στο NS-3

Η χρήση της CPU εμφανίζει διακύμανση με ορισμένα εικονικά μηχανήματα τόσο χαμηλά όσο περίπου 15% και ορισμένες εξαιρετικά υψηλές περιπτώσεις, όπως το VM673 στο 126,8% αν και τα περισσότερα VM διατηρούν μέτρια επίπεδα. Αυτό υποδηλώνει πιθανά σημεία πίεσης ή σημεία συμφόρησης που ενδέχεται να χρειάζονται βελτιστοποίηση ή εξισορρόπηση φορτίου για καλύτερη επεκτασιμότητα.

❖ Κατανάλωση μνήμης:



Εικόνα 23Κλιμακωση χρήσηςμνήμης στο NS-3

Η χρήση της μνήμης παρουσιάζει σταδιακή αύξηση ξεκινώντας από περίπου 704 MB και ανεβαίνει καθώς προστίθενται περισσότερα εικονικά μηχανήματα, με ορισμένα εικονικά μηχανήματα όπως το VM672 να φτάνουν έως και τα 750. Αυτή η τάση υποδηλώνει την ανάγκη στενής παρακολούθησης της εκχώρησης μνήμης για την αποφυγή πιθανών συμφορήσεων μνήμης.

Κατά την δοκιμή του scalability του NS-3, τόσο μέσω των ακαδημαϊκών εργασιών που αναφέραμε όσο και μέσω των δικών μας αποτελεσμάτων προσομοίωσης, παρουσιάζονται οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του NS-3 σε περιβάλλοντα SDN δικτύων μεγάλης κλίμακας.

Η προσομοίωση NS-3 που πραγματοποιήσαμε έδειξε μια αξιοσημείωτη σταθερότητα στους χρόνους μετάδοσης σε έναν σημαντικό αριθμό εικονικών μηχανών. Αυτό το αποτέλεσμα είναι μια απόδειξη της ισχυρής επεκτασιμότητας του δικτύου του NS-3 που συμφωνεί με τις παρατηρήσεις που έγιναν στις προαναφερθείσες ακαδημαϊκές μελέτες. Αυτές οι μελέτες αναγνώρισαν ομοίως την ικανότητα του NS-3 στη διαχείριση δικτύων μεγάλης κλίμακας, υπογραμμίζοντας τη χρησιμότητά του σε εκτεταμένες προσομοιώσεις δικτύου.

Ωστόσο, ένα κρίσιμο ζήτημα που προέκυψε από την προσομοίωση ήταν η σημαντική μεταβλητότητα στη χρήση της CPU, η οποία κυμάνθηκε από μέτρια επίπεδα σε πλήρη capacity. Αυτή η αυξομείωση υποδεικνύει πιθανές ανεπάρκειες επεξεργασίας εντός του NS-3, αντανακλώντας τις ανησυχίες που εγείρονται από τους Renardκ.α.[41]. Η δημοσίευση εντόπισε ορισμένες συνθήκες υπό τις οποίες οι δυνατότητες επεξεργασίας του NS-3 θα μπορούσαν να βελτιωθούν.

Όσον αφορά τη χρήση μνήμης, η προσομοίωση έδειξε μια προοδευτική αύξηση, σύμφωνα με την αναμενόμενη συμπεριφορά στα κλιμακούμενα συστήματα. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τις πληροφορίες από το έγγραφο των Wigginsκ.α. [40] το οποίο σημείωσε επίσης αυξανόμενες απαιτήσεις μνήμης σε προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας. Η εργασία τόνισε τη σημασία της στρατηγικής διαχείρισης μνήμης στο NS-3, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό πολύπλοκων προσομοιώσεων δικτύου.

Συλλογικά, αυτές οι παρατηρήσεις τόσο από την προσομοίωση μας όσο και από την ακαδημαϊκή έρευνα δίνουν μια εικόνα του NS-3 ως ένα θεμελιωδώς ισχυρό εργαλείο για την επεκτασιμότητα της απόδοσης του δικτύου. Ωστόσο, ρίχνουν επίσης φως σε κρίσιμους τομείς που χρειάζονται βελτίωση, ιδιαίτερα στην κατανομή πόρων και τη βελτιστοποίηση. Ενώ το NS-3 επιδεικνύει αξιέπαινη συνέπεια στην απόδοση του δικτύου σε διάφορες κλίμακες, οι πτυχές της CPU και της διαχείρισης μνήμης απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή. Η διασφάλιση της αποτελεσματικής διανομής πόρων και η αντιμετώπιση των δυνατοτήτων συμφόρησης επεξεργασίας είναι ουσιαστικά βήματα για τη βελτιστοποίηση του NS-3 για πολύπλοκες, μεγάλης κλίμακας προσομοιώσεις δικτύου. Αυτή η διπλή προοπτική, που συνδυάζει θεωρητική έρευνα και πρακτικό πειραματισμό, προσφέρει μια ολοκληρωμένη άποψη της επεκτασιμότητας του NS-3 και χρησιμεύει ως πολύτιμος οδηγός για μελλοντικές βελτιώσεις και εφαρμογές σε σενάρια προσομοίωσης δικτύου.

- **Συμπεράσματα**

Κατά την αξιολόγηση της επεκτασιμότητας των προσομοιωτών SDN δικτύων, μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ NS-3, CloudSimSDN και Mininet προσφέρει χρήσιμες παρατηρήσεις στις αντιθέσεις και ομοιότητες. Κάθε προσομοιωτής φέρνει μοναδικές δυνατότητες και περιορισμούς, διαμορφώνοντας την καταλληλότητά τους για διαφορετικά σενάρια επεκτασιμότητας δικτύου.

Η απόδοση του NS-3 στις προσομοιώσεις επεκτασιμότητας είναι αξιοσημείωτη για τους σταθερούς χρόνους μετάδοσης σε ένα ευρύ φάσμα εικονικών μηχανών, υποδεικνύοντας ισχυρή σταθερότητα δικτύου. Αυτή η σταθερότητα είναι ένας θετικός δείκτης της ικανότητας του προσομοιωτή να χειρίζεται ένα αυξανόμενο φορτίο χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης. Ωστόσο, οι προσομοιώσεις του NS-3 αποκάλυψαν επίσης σημαντική μεταβλητότητα στη χρήση της CPU και μια σταδιακή, αν και συνεπή, αύξηση στη χρήση μνήμης. Αυτά τα ευρήματα υποδεικνύουν πιθανές προκλήσεις στην κατανομή πόρων και την αποτελεσματικότητα, ιδιαίτερα κατά την κλιμάκωση των προσομοιώσεων δικτύου.

Αντίθετα, το CloudSimSDN επιδεικνύει ισχυρή ικανότητα στη διαχείριση περιβαλλόντων δικτύου cloud μεγάλης κλίμακας. Η ικανότητά του να προσομοιώνει δίκτυα με πολλούς κόμβους, σε συνδυασμό με τη συνεπή χρήση της CPU και την ελεγχόμενη αύξηση της χρήσης μνήμης, υπογραμμίζει την ικανότητά του να χειρίζεται αποτελεσματικά πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις δικτύου. Αυτό περιλαμβάνει την προσομοίωση της παροχής εικονικών μηχανών και την επιρροή των SDN control policies, καθιστώντας το ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση δικτύου μεγάλης κλίμακας.

Το Mininet, ενώ προσφέρει ρεαλιστική εξομοίωση τοπολογιών δικτύου, αντιμετωπίζει εγγενείς περιορισμούς λόγω της εξάρτησής του από το hardware. Αυτή η εξάρτηση μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμούς πόρων, ιδιαίτερα σε σενάρια αύξησης CPU, επηρεάζοντας έτσι τη δυνατότητα επεκτασιμότητας του. Παρά τους περιορισμούς, το Mininet παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά και την απόδοση του δικτύου, αν και η επεκτασιμότητα του δεν είναι τόσο εκτεταμένη όσο το NS-3 ή το CloudSimSDN.

Συμπερασματικά, η επιλογή μεταξύ NS-3, CloudSimSDN και Mininet εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς της προσομοίωσης δικτύου. Το NS-3 υπερέχει στη σταθερότητα δικτύου για ένα ευρύ φάσμα εικονικών περιβαλλόντων, καθιστώντας το κατάλληλο για μελέτες όπου η σταθερή απόδοση υπό αυξανόμενο φορτίο είναι κρίσιμης σημασίας. Το δυνατό σημείο του CloudSimSDN είναι η διαχείριση δικτύου μεγάλης κλίμακας και η αποτελεσματική χρήση πόρων, ιδανική για προσομοιώσεις που απαιτούν εκτεταμένη κλιμάκωση δικτύου. Το Mininet, με τις ρεαλιστικές του δυνατότητες εξομοίωσης, είναι πιο κατάλληλο για σενάρια όπου οι περιορισμοί υλικού δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα και όπου η ακριβής αναπαράσταση της συμπεριφοράς του δικτύου στον πραγματικό κόσμο είναι απαραίτητη. Αυτή η συγκριτική ανάλυση υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής του σωστού εργαλείου προσομοίωσης για να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τα σενάρια του πραγματικού κόσμου και να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την απόδοση του δικτύου και τους πόρους σε επεκτάσιμα περιβάλλοντα.

6 Συγκριτική Ανάλυση και Συζήτηση

Η συγκριτική μελέτη των Mininet, CloudSimSDN και NS-3, εστιάζοντας στην απόδοσή τους σε σενάρια δικτύωσης SDN, παρουσιάζει μια διαφορετική εικόνα των αντίστοιχων δυνατοτήτων και περιορισμών τους. Αυτή η ανάλυση είναι σημαντική για την ενημέρωση σχετικά με την επιλογή και την εφαρμογή αυτών των εργαλείων σε ποικίλα πλαίσια SDN.

6.1 Ανάλυση Απόδοσης

Το Mininet επέδειξε ισχυρές ικανότητες στην εξομοίωση ρεαλιστικών περιβαλλόντων δικτύου, αντανακλώντας τη δύναμή του σε λεπτομερείς προσομοιώσεις δικτύου υλικού και λογισμικού. Ωστόσο, η απόδοσή του, ιδιαίτερα όσον αφορά το χρόνο μετάδοσης, ήταν αισθητά πιο αργή σε σύγκριση με τα άλλα εργαλεία. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αρχιτεκτονική του, η οποία μιμείται ένα δίκτυο σε ένα μόνο μηχάνημα, μοιράζοντας πόρους υλικού μεταξύ όλων των στοιχείων που εξομοιώνονται. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το Mininet ιδανικό για σενάρια όπου απαιτείται υψηλός βαθμός ρεαλισμού και λεπτομερής μοντελοποίηση συμπεριφοράς δικτύου, αν και με κόστος την μεγάλη κατανάλωση πόρων και μεγάλους χρόνους προσομοίωσης.

Το CloudSimSDN, με εστίαση στα κέντρα δεδομένων cloud μέσα σε πλαίσια SDN, επέδειξε την ταχύτερη συνολική απόδοση όσον αφορά τον χρόνο προσομοίωσης. Οι εξαιρετικά αποδοτικές διαδικασίες μετάδοσης δεδομένων και η ελάχιστη χρήση της CPU το καθιστούν κατάλληλο για γρήγορες προσομοιώσεις υψηλού επιπέδου, ιδιαίτερα σε σενάρια δικτύωσης cloud. Ωστόσο, αυτό έρχεται σε βάρος της λιγότερο λεπτομερούς μοντελοποίησης συμπεριφοράς δικτύου σε σύγκριση με το Mininet, υποδηλώνοντας τη χρήση του σε σενάρια όπου η ταχύτητα και η αποτελεσματικότητα έχουν προτεραιότητα έναντι των ρεαλιστικών προσομοιώσεων δικτύου.

Το NS-3, γνωστό για το εκτεταμένο πλαίσιο και την ικανότητά του να προσομοιώνει ένα ευρύ φάσμα τύπων δικτύων, πέτυχε μια ισορροπία μεταξύ λεπτομερούς προσομοίωσης και αποτελεσματικής απόδοσης. Η μέτρια χρήση της CPU και οι γρήγοροι χρόνοι προσομοίωσης το καθιστούν ένα ευέλικτο εργαλείο, ικανό να χειρίζεται τόσο λεπτομερείς μελέτες συμπεριφοράς δικτύου όσο και αποτελεσματικές προσομοιώσεις. Η ευρεία υποστήριξη πρωτοκόλλου και η ευελιξία του στη μοντελοποίηση δικτύου το καθιστούν κατάλληλο για μια ποικιλία σεναρίων SDN, από την ακαδημαϊκή έρευνα έως τον πρακτικό σχεδιασμό και τη δοκιμή δικτύου.

6.2 Συνέπειες για την επιλογή εργαλείου

Η επιλογή μεταξύ Mininet, CloudSimSDN και NS-3 θα πρέπει να καθοδηγείται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του σεναρίου SDN:

- Για λεπτομερείς, προσομοιώσεις κλειστού υλικού, όπου ο ρεαλισμός είναι πρωταρχικής σημασίας, το Mininet είναι η προτιμώμενη επιλογή. Η ικανότητά του να μιμείται πραγματικά στοιχεία δικτύου το καθιστά ανεκτίμητο για σενάρια όπου πρέπει να μελετηθεί η περίπλοκη συμπεριφορά των στοιχείων δικτύου.
- Όταν απαιτείται γρήγορη προσομοίωση και επισκοπήσεις υψηλού επιπέδου, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα δικτύωσης cloud, το CloudSimSDN αναδεικνύεται ως το πιο αποτελεσματικό εργαλείο. Η απόδοσή του σε σενάρια SDN που βασίζονται σε σύννεφο, σε συνδυασμό με την ελάχιστη χρήση πόρων, το καθιστά ιδανικό για γρήγορες, μεγάλης κλίμακας προσομοιώσεις.
- Για μια ισορροπημένη προσέγγιση που προσφέρει λεπτομερή ανάλυση συμπεριφοράς δικτύου και αποτελεσματική απόδοση, το NS-3 είναι το καταλληλότερο. Η ευελιξία του και το ευρύ φάσμα των υποστηριζόμενων πρωτοκόλλων το καθιστούν ιδανικό εργαλείο για μια ποικιλία ερευνών και πρακτικών εφαρμογών SDN.

Αυτή η συγκριτική ανάλυση υπογραμμίζει τη σημασία της ευθυγράμμισης της επιλογής εργαλείου με συγκεκριμένες απαιτήσεις και στόχους SDN,

διασφαλίζοντας ότι το επιλεγμένο εργαλείο προσομοίωσης/εξομοίωσης ικανοποιεί αποτελεσματικά τις απαιτήσεις της επιδιωκόμενης εφαρμογής.

6.3 Συζήτηση και συστάσεις

Οι πληροφορίες που προέκυψαν από αυτή τη συγκριτική ανάλυση έχουν αρκετές επιπτώσεις για την επιλογή και την εφαρμογή των εργαλείων προσομοίωσης και εξομοίωσης SDN οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν σε συγκεκριμένες συστάσεις για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης και ερευνητικές απαιτήσεις:

I. Εκπαιδευτικά σενάρια: Για εκπαιδευτικούς σκοπούς, όπου η εστίαση είναι στη διδασκαλία των αρχών του SDN και της συμπεριφοράς δικτύου, το Mininet ξεχωρίζει λόγω των ρεαλιστικών δυνατοτήτων εξομοίωσης και της ενσωμάτωσής του με πραγματικούς ελεγκτές SDN. Η ικανότητά του να μιμείται σενάρια δικτύου πραγματικού κόσμου το καθιστά ένα εξαιρετικό εργαλείο διδασκαλίας για την κατανόηση των αποχρώσεων των συμπεριφορών δικτύου σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον.

II. Έρευνα και Ανάπτυξη στο SDN: Οι ερευνητές που εστιάζουν στην ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων SDN, αλγορίθμων ή συμπεριφορών δικτύου θα επωφεληθούν από τις περιεκτικές και λεπτομερείς δυνατότητες προσομοίωσης του NS-3. Η εκτεταμένη υποστήριξη πρωτοκόλλου και η ευελιξία του στην προσομοίωση διαφόρων τύπων δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των αναδυόμενων τεχνολογιών όπως το IoT και το 5G, το καθιστούν απαραίτητο εργαλείο στην εργαλειοθήκη του ερευνητή.

III. SDN σε περιβάλλοντα CloudComputing: Για μελέτες ή έργα που επικεντρώνονται γύρω από το cloudcomputing και τα κέντρα δεδομένων, το CloudSimSDN συνιστάται ιδιαίτερα. Η εξειδίκευσή του στην προσομοίωση κέντρων δεδομένων cloud με δυνατότητα SDN και ο αποτελεσματικός χειρισμός δικτύων cloud μεγάλης κλίμακας το καθιστούν ιδανικό για την εξερεύνηση καινοτόμων στρατηγικών διαχείρισης πόρων δικτύου και σεναρίων SDN που βασίζονται σε clouds.

IV. Μελέτες βελτιστοποίησης απόδοσης και επεκτασιμότητας: Όταν το κύριο μέλημα είναι η αξιολόγηση της απόδοσης, της επεκτασιμότητας ή της

αποδοτικότητας των πόρων των λύσεων SDN, η επιλογή μεταξύ των εργαλείων εξαρτάται από το βάθος της ανάλυσης που απαιτείται. Το CloudSimSDN προσφέρει γρήγορες, υψηλού επιπέδου προσομοιώσεις κατάλληλες για αρχικές αξιολογήσεις ή μελέτες μεγάλης κλίμακας, ενώ το NS-3 παρέχει μια πιο λεπτή άποψη με τις λεπτομερείς προσομοιώσεις του, αν και με ελαφρώς μεγαλύτερους χρόνους προσομοίωσης.

6.4 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Το εξελισσόμενο τοπίο του SDN και η αυξανόμενη ενσωμάτωσή του με τεχνολογίες όπως το cloudcomputing, το IoT και τα δίκτυα 5G υποδηλώνουν ένα μέλλον όπου αυτά τα εργαλεία θα πρέπει να προσαρμόζονται και να εξελίσσονται συνεχώς. Μελλοντικές μελέτες ενδέχεται να επικεντρωθούν στην επέκταση αυτών των εργαλείων για την καλύτερη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης του SDN με αυτές τις αναδυόμενες τεχνολογίες. Επιπλέον, η ανάπτυξη υβριδικών πλαισίων προσομοίωσης που συνδυάζουν τα δυνατά σημεία των Mininet, CloudSimSDN και NS-3 θα μπορούσε να είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας έρευνας, παρέχοντας ένα πιο ευέλικτο και ολοκληρωμένο εργαλείο για την προσομοίωση και την εξομοίωση SDN.

6.5 Προσδιορισμός των περιορισμών της μελέτης και των πιθανών πηγών μεροληψίας.

Στη συγκριτική ανάλυση, σημειώθηκαν αρκετές τάσεις και αποκλίσεις, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση της απόδοσης και του πεδίου εφαρμογής των εργαλείων.

- ο Mininet: Οι μεγαλύτεροι χρόνοι μετάδοσης και οι τάσεις υψηλότερης κατανάλωσης πόρων ήταν συνεπείς με την προσέγγιση εξομοίωσής του, η οποία δημιουργεί ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον δικτύου, αλλά σε βάρος της υψηλότερης χρήσης πόρων. Οι μικρές διακυμάνσεις στη χρήση της μνήμης σε όλα τα σενάρια είναι ενδεικτικές της στρατηγικής δυναμικής κατανομής, η οποία αντικατοπτρίζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες δικτύου.

- CloudSimSDN: Παρουσίασε εξαιρετικά χαμηλούς χρόνους μετάδοσης και χρήση CPU, που αποδίδεται στην αφαίρεση υψηλού επιπέδου και την εστίασή του σε περιβάλλοντα δικτύωσης cloud. Η μεταβλητότητα στη χρήση της μνήμης μπορεί να συνδεθεί με τη δυναμική προσομοίωση των κέντρων δεδομένων cloud, όπου η κατανομή πόρων μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις με βάση τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος προσομοίωσης cloud.
- NS-3: Έδειξε τη χαμηλότερη κατανάλωση μνήμης, λόγω της αποτελεσματικής διαδικασίας προσομοίωσης. Οι μικρές διακυμάνσεις στους χρόνους μετάδοσης σε διαφορετικά σενάρια υπογραμμίζουν την προσαρμοστικότητα του NS-3 στο χειρισμό διαφορετικών πρωτοκόλλων δικτύου και συμπεριφορών με υψηλή απόδοση.

6.6 Περιορισμοί μελέτης και πιθανές πηγές μεροληψίας

Πεδίο εφαρμογής σεναρίων: Η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως σε συγκεκριμένα σενάρια SDN, τα οποία ενδέχεται να μην περιλαμβάνουν όλο το φάσμα των δικτυακών περιβαλλόντων που μπορούν να προσομοιώσουν αυτά τα εργαλεία. Αυτός ο περιορισμός θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια στενή εικόνα των δυνατοτήτων των εργαλείων.

Εκδόσεις εργαλείου: Η μελέτη διεξήχθη με συγκεκριμένες εκδόσεις των Mininet, CloudSimSDN και NS-3. Καθώς αυτά τα εργαλεία ενημερώνονται συνεχώς, οι νεότερες εκδόσεις ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης.

Περιορισμοί υλικού: Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένες διαμορφώσεις υλικού, οι οποίες ενδέχεται να επηρέασαν τις μετρήσεις απόδοσης. Διαφορετικές ρυθμίσεις υλικού θα μπορούσαν να αποφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Τρόπος Μεθοδολογίας: Η επιλογή των μετρήσεων (χρόνος μετάδοσης, CPU και χρήση μνήμης) και ο τρόπος με τον οποίο μετρήθηκαν ενδέχεται να μην είναι ο καλύτερος και άλλες μετρήσεις ή μέθοδοι μέτρησης ενδέχεται να παρέχουν διαφορετικές πληροφορίες.

Πειραματικά αποτελέσματα: Δεδομένης της πολυπλοκότητας των προσομοιώσεων δικτύου, η επίτευξη ακρίβειας στις πειραματικές συνθήκες είναι πρόκληση. Μικρές αποκλίσεις στη ρύθμιση ή την εκτέλεση μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Η αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών σε μελλοντική έρευνα θα παράσχει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των δυνατοτήτων αυτών των εργαλείων και θα βελτιώσει περαιτέρω την εφαρμογή τους σε διάφορα πλαίσια SDN.

6.7 Συμπέρασμα

Συμπερασματικά, η συγκριτική ανάλυση των Mininet, CloudSimSDN και NS-3 αποκαλύπτει ότι κάθε εργαλείο έχει ξεχωριστές δυνάμεις και είναι το καταλληλότερο για συγκεκριμένα σενάρια SDN. Η επιλογή του κατάλληλου εργαλείου θα πρέπει να καθοδηγείται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του σεναρίου, είτε πρόκειται για εκπαιδευτικούς σκοπούς, λεπτομερή ανάλυση συμπεριφοράς δικτύου, προσομοιώσεις που βασίζονται σε σύννεφο ή μελέτες απόδοσης. Η συνεχής εξέλιξη αυτών των εργαλείων ως απάντηση στο μεταβαλλόμενο τοπίο των τεχνολογιών δικτύου θα ενισχύσει περαιτέρω την εφαρμογή και τη χρησιμότητά τους στον τομέα του SDN.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]Gupta, Mukta, Joel Sommers, and Paul Barford. "Fast, accurate simulation for SDN prototyping." Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking. 2013.
- [2]R. L. S. de Oliveira, C. M. Schweitzer, A. A. Shinoda and Ligia Rodrigues Prete, "Using Mininet for emulation and prototyping Software-Defined Networks," 2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), Bogota, Colombia, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/ColComCon.2014.6860404
- [3]Ivey, Jared, et al. "Comparing a scalable SDN simulation framework built on NS-3 and DCE with existing SDN simulators and emulators." Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation. 2016.
- [4]D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky and S. Uhlig, "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, Jan. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
- [5]L. Zhu, M. M. Karim, K. Sharif, F. Li, X. Du, and M. Guizani, "SDNControllers: Benchmarking & Performance Evaluation," 2019,arXiv.org
- [6]SDN architecture. Issue 1. June, 2014. ONF TR-502.
- [7]Jammal, Manar et al. "Software defined networking: State of the art and research challenges." *Comput. Networks* 72 (2014): 74-98.
- [8]Zavrak, Sultan &Iskefiyeli, Murat. (2017). A Feature Based Comparison of SDN Emulation And Simulation Tools.
- [9]Son, Jungmin&Dastjerdi, Amir & Calheiros, Rodrigo & Ji, Xiaohui & Yoon, Young &Buyya, Rajkumar. (2015). CloudSimSDN: Modeling and Simulation of Software-Defined Cloud Data Centers. *Proceedings - 2015 IEEE/ACM 15th International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing, CCGrid 2015*. 475-484. 10.1109/CCGrid.2015.87.
- [10]S. -Y. Wang, C. -L. Chou and C. -M. Yang, "EstiNetopenflow network simulator and emulator," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 9, pp. 110-117, September 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6588659.
- [11]<https://mininet.org/>
- [12] F. Ketikci and S. Askar, "Emulation of Software Defined Networks Using Mininet in Different Simulation Environments," 2015 6th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Kuala Lumpur, Malaysia, 2015, pp. 205-210, doi: 10.1109/ISMS.2015.46.
- [13]Wette, Philip &Dräxler, M & Schwabe, Arne & Wallaschek, F &Zahraee, M & Karl, H. (2014). MaxiNet: Distributed emulation of software-defined networks. 2014 IFIP Networking Conference, IFIP Networking 2014. 1-9. 10.1109/IFIPNetworking.2014.6857078
- [14]Swann, Matthew & Rose, Joseph &Bendiab, Gueltoum&Shiaeles, Stavros & Savage, Nick. (2021). A Comparative Study of Traffic Generators: Applicability for Malware Detection Testbeds. *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions*. 8. 705-713. 10.20533/jitst.2046.3723.2020.0085.
- [15] <https://www.wireshark.org/>

- [16] Bob Lantz, Brandon Heller, and Nick McKeown. 2010. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks. In Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks (Hotnets-IX). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 19, 1–6. <https://doi.org/10.1145/1868447.1868466>
- [17] Son, Jungmin, and He, TianZhang, et al. "CloudSimSDN-NFV: Modeling and simulation of network function virtualization and service function chaining in edge computing environments". *SOFTWARE-PRACTICE & EXPERIENCE*, vol.49,no.12, 2019, pp. 1748-1764. doi:10.1002/spe.2755
- [18] Son, Jungmin&Buyya, Rajkumar. (2018). Priority-Aware VM Allocation and Network Bandwidth Provisioning in Software-Defined Networking (SDN)-Enabled Clouds. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. PP. 1-1. 10.1109/TSUSC.2018.2842074.
- [19] <https://www.nsnam.org/>
- [20] Henni, Djamel Eddine et al. "Probe-SDN: A smart monitoring framework for SDN-based networks." 2016 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS) (2016): 1-6.
- [21] Giuseppe Di Lena, Andrea Tomassilli, Damien Saucez, Frédéric Giroire, Thierry Turletti, and Chidung Lac. 2021. Distrinet: a mininet implementation for the cloud. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 51, 1 (01/31/2021), 2–9. <https://doi.org/10.1145/3457175.3457177>
- [22] Chaves, Luciano & Calciolari Garcia, Islene & Madeira, Edmundo. (2016). OFSwitch13: Enhancing NS-3 with OpenFlow 1.3 Support. 33-40. 10.1145/2915371.2915381.
- [23] S. Lee, J. Ali and B. -h. Roh, "Performance Comparison of Software Defined Networking Simulators for Tactical Network: Mininet vs. OPNET," 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, 2019, pp. 197-202, doi: 10.1109/ICCNC.2019.8685572.
- [24] H. D. Ali and A. H. Abdulqader, "Using Software Defined Network (SDN) Controllers to Enhance Communication between Two Vehicles in Vehicular AD HOC Network (VANET)," 2021 7th International Conference on Contemporary Information Technology and Mathematics (ICCITM), Mosul, Iraq, 2021, pp. 106-111, doi: 10.1109/ICCITM53167.2021.9677720.
- [25] <https://NS-3simulation.com/NS-3-iot-simulation/>
- [26] Wu, Heng Kui et al. "An energy framework for the network simulator 3 (NS-3)." International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques (2011).
- [27] <https://nsg-ethz.github.io/p4-utils/index.html>
- [28] Jiasong Bai, Jun Bi, Peng Kuang, Chengze Fan, Yu Zhou, and Cheng Zhang. 2018. NS4: Enabling Programmable Data Plane Simulation. In Proceedings of the Symposium on SDN Research (SOSR '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 12, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3185467.3185470>
- [29] Mohammed Hawa. 2020. A Graphical User Interface for the NS-3 Simulator. In Proceedings of the 12th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 159–163. <https://doi.org/10.1145/3408066.3408088>
- [30] R. Buyya, R. N. Calheiros, J. Son, A. V. Dastjerdi and Y. Yoon, "Software-Defined Cloud Computing: Architectural elements and open challenges," 2014 International

- Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Delhi, India, 2014, pp. 1-12, doi: 10.1109/ICACCI.2014.6968661.
- [31]Chertov, Roman & Fahmy, Sonia & Shroff, Ness. (2008). Fidelity of network simulation and emulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 19. 1-29. 10.1145/1456645.1456649.
- [32]<https://github.com/mininet/mininet>
- [33]Y. Andegelile, H. Maziku, N. Mvungi, and M.Kissaka, "Software Defined CommunicationNetwork Reliability for Secondary Distribution Power Grid," *Int.*
- [34]S. R. Basnet and S. Shakya, "BSS: Blockchain security over software defined network," 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India, 2017, pp. 720-725, doi: 10.1109/CCAA.2017.8229910.
- [35] Jungmin Son and Rajkumar Buyya. 2018. A Taxonomy of Software-Defined Networking (SDN)-Enabled Cloud Computing. *ACM Comput. Surv.* 51, 3, Article 59 (May 2019), 36 pages. <https://doi.org/10.1145/3190617>
- [36] S. Garg, K. Kaur, G. Kaddoum, S. H. Ahmed and D. N. K. Jayakody, "SDN-Based Secure and Privacy-Preserving Scheme for Vehicular Networks: A 5G Perspective," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 8421-8434, Sept. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2917776.
- [37]Noring, Ulf. (2018). Investigating the possibility of speeding up Mininet by using Netmap, an alternative Linux packet I/O framework. *Procedia Computer Science*. 126. 1885-1894. 10.1016/j.procs.2018.08.074.
- [38]Maygua- Marcillo, Lesly & Urquiza Aguiar, Luis & Paredes, Cecilia. (2018). *StatisticalFrameworkinNS-3*. 10.20944/preprints201808.0158.v1.
- [39]D. Muelas, J. Ramos and J. E. L. d. Vergara, "Assessing the Limits of Mininet-Based Environments for Network Experimentation," in *IEEE Network*, vol. 32, no. 6, pp. 168-176, November/December 2018, doi: 10.1109/MNET.2018.1700277.
- [40]Wiggins, David, Leonid Veytser, Patricia Deutsch and Bow-Nan Cheng. "Scaling NS-3 DCE Experiments on Multi-Core Servers." (2016).
- [41]Renard, Ken & Peri, Charles & Clarke, Jerry. (2012). A Performance and Scalability Evaluation of the NS-3 Distributed Scheduler. 378-382. 10.4108/icst.simutools.2012.247679.