

Analiza značajki simulatora informacijsko-komunikacijskih mreža

Tepavac, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:234507>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Vedran Tepavac

ANALIZA ZNAČAJKI SIMULATORA INFORMACIJSKO-
KOMUNIKACIJSKIH MREŽA

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA ZNAČAJKI SIMULATORA INFORMACIJSKO-
KOMUNIKACIJSKIH MREŽA

ANALYSIS OF SIGNIFICANCE OF INFORMATION-
COMMUNICATION NETWORK SIMULATORS

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Grgurević

Student: Vedran Tepavac

JMBAG: 0135227377

Zagreb, lipanj 2019.

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PREGLED POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA | 3 |
| 2.1. POJMOVNO ODREĐENJE MREŽNIH SIMULATORA I SIMULACIJE | 3 |
| 2.2. POTREBA ZA MODELIRANJEM I SIMULACIJOM KOMUNIKACIJSKE MREŽE..... | 6 |
| 2.3. KONSTRUKCIJE ZA MODELIRANJE KOMUNIKACIJSKE MREŽE | 8 |
| 3. MREŽNI SIMULATORI | 11 |
| 3.1. NETWORK SIMULATOR 2 – NS-2 | 11 |
| 3.2. NETWORK SIMULATOR 3 – NS-3 | 14 |
| 3.3. GRAPHICAL NETWORK SIMULATOR 3 – GNS-3..... | 16 |
| 3.4. OMNET++..... | 18 |
| 3.5. OPENSTACK..... | 19 |
| 3.6. MININET | 21 |
| 3.7. RIVERBED MODELER..... | 22 |
| 3.8. QUALNET | 24 |
| 3.9. J-SIM | 25 |
| 3.10. USPOREDNI PRIKAZ SIMULATORA | 27 |
| 4. OPIS I METODOLOGIJA PROVEDENOG ISTRAŽIVANJA | 29 |
| 4.1. INOZEMNE STUDIJE O MREŽNIM SIMULATORIMA..... | 29 |
| 4.2. ANALIZA KORIŠTENJA MREŽNIH SIMULATORA..... | 32 |
| 4.2.1. BAZA PODATAKA ELSEVIER'S SCOPUS..... | 32 |
| 4.2.2. BAZA PODATAKA IEEE XLORER | 35 |
| 4.2.3. SCIENCE DIRECT | 38 |
| 4.2.4. THOMSON REUTERS | 41 |
| 5. RAZVOJ MREŽNIH SIMULATORA U FUNKCIJI INFORMACIJSKO- KOMUNIKACIJSKIH MREŽA..... | 44 |
| 5.1. KOMPARATIVNA ANALIZA ZNAČAJA MREŽNIH SIMULATORA U SIMULIRANJU MREŽA..... | 44 |
| 5.2. KRITIČKI OSVRT AUTORA..... | 46 |
| 6. ZAKLJUČAK | 47 |
| LITERATURA..... | 49 |
| POPIS SLIKA | 50 |
| POPIS TABLICA..... | 52 |

SAŽETAK

Mrežni simulatori su nezaobilazan alat pri istraživanju iz područja informacijsko-komunikacijskih mreža i mrežnih tehnologija. Oni omogućuju testiranje kompleksnih mreža i mrežnih uređaja te validaciju podatkovnih veza i provjeru određenih mrežnih protokola. Simulacijom se naziva bilo koji proces kojim prikazujemo realan proces u kontroliranoj okolini, dok simulatorom nazivamo aplikaciju ili bilo kakav drugi mehanizam koji prikazuje realan proces. U ovom diplomskom radu analizirat će se korištenje mrežnih simulatora kroz određeno vremensko razdoblje (godina) u području informacijsko-komunikacijskih mreža i mrežnih tehnologija. U analizi će se prikazati koji mrežni simulatori se koriste više, a koji manje te koji su razlozi za navedeno. Ovaj diplomski rad predstavlja opsežno istraživanje postojećih relevantnih mrežnih simulatora s naglaskom na analizu dosadašnjih istraživanja i upotrebe mrežnih simulatora za znanstvene potrebe iz šireg područja informacijsko-komunikacijskih mrežnih tehnologija. Pri istraživanju namjera nije bila analizirati sve dostupne mrežne simulatore, već samo one koji se najviše koriste odnosno one koji su karakteristični za istraživano područje. Analizirati će se mrežni simulatori (primjerice: NS-2, NS-3, GNS-3, OMNET++, OpenStack, MININET, Riverbed Modeler, QualNet i J-Sim) te dosadašnja dostupna istraživanja koja se odnose na sljedeća podpodručja: QoS, VoIP, Wireless, Security, IoT, SDN, Cloud i LTE.

Ključne riječi: mrežni simulatori, informacijsko-komunikacijske mreže, mrežne tehnologije.

SUMMARY

Network simulators are an unavoidable tool for research in the field of information-communication networks and network technologies. They allow testing of complex networks and network devices, validating data connections and checking certain network protocols. Simulation is any process by which we represent a realistic process in a controlled environment, while a simulator is an application or any other mechanism that displays a realistic process. In this graduate thesis, the use of network simulators will be analyzed over a certain period of time (years) in the field of information-communication networks and network technologies. The analysis will show which network simulators are used more and less, and what are the reasons for that. This graduate thesis is a comprehensive study of existing relevant network simulators with an emphasis on the analysis of the current research and use of network simulators for scientific needs from a wider area of information-communication network technologies. In the exploration of the intent, not all available network simulators were analyzed, but only those most used, that is, those characteristic of the research area. Network simulators will be analyzed (eg: NS-2, NS-3, GNS-3, OMNET ++, OpenStack, MININET, Riverbed Modeler, QualNet and J-Sim) and available research related to the following subcategories: QoS, VoIP, Security, IoT, SDN, Cloud and LTE.

Key words: network simulators, information and communication networks, network technologies.

1. UVOD

Intenzivan razvoj računarstva te informacijsko-komunikacijske tehnologije, kao i njihova sve češća upotreba u svakodnevnom poslovanju i životu, obilježila su suvremeno doba. U današnjici, više nego ikada do sada, gotovo svi poslovni i svakodnevni procesi bivaju uvjetovani, ovisni ili podržani ovim dostignućima. Upravo zbog toga, često se koristi naziv digitaliziranog i informatiziranog društva te elektroničkog poslovanja.

U današnjici postoji vrlo opsežna domaća i inozemna znanstvena literatura koja se bavi istraživanjem simulacija i mrežnih simulatora. O kompleksnosti ove problematike, kako u znanstvenom, tako i praktičnom kontekstu, uvjerljivo svjedoče brojni mrežni stimulatori koji danas podržavaju diferencirana područja, odnosno tematske skupine. Nastavno navedenome, ističe se kako se svaki od njih, razvija kao zasebni alata, određenih karakteristika i namjene, a u svrhu optimizacije primjene i realizacije željenih ciljeva u pojedinim područjima.

Motiv za istraživanje ove teme vezan je za nedostupnost taksonomije mrežnih simulatora odnosno jasne podjele i primjenjivosti mrežnih simulatora za različita područja istraživanja unutar informacijsko-komunikacijskih mrežnih tehnologija. U diplomskom radu će se napraviti pregled i analiza mrežnih simulatora u funkciji informacijsko-komunikacijskih mreža.

Cilj diplomskog rada je utvrditi primjenjivost pojedinog analiziranog mrežnog simulatora prema samostalno definiranim tematskim skupinama (područjima odnosno ključnim riječima), za što će poslužiti dostupne znanstvene baze radova. Kako bi se utvrdila primjenjivost pojedinog mrežnog simulatora potrebno je napraviti njihovu usporedbu.

Svrha diplomskog rada je analiza mrežnih simulatora te utvrđivanje svih prednosti i nedostataka istih u određenom području rada uz korištenje relevantnih znanstvenih baza. U radu će biti pobliže opisani mrežni simulatori, dosadašnja dostupna istraživanja za određena mrežna područja te njihov daljnji razvoj u funkciji analize informacijsko-komunikacijskih mreža.

Strukturno se rad sastoji od šest povezanih poglavlja. Nakon uvodnog dijela slijedi poglavlje „Pregled postojećih istraživanja“ koje daje uvid u postojeća istraživanja u svezi simulacija i mrežnih simulatora. Ono daje nešto opsežniji uvod u problematiku rada, kao i osnovu za konkretnije istraživanje autora. Sljedeće poglavlje daje pregled mrežnih simulatora, a nosi naziv „Mrežni simulatori“. Pri tome, ono istražuje njihova obilježja, specifičnosti i namjenu.

Poglavlje što slijedi, pod nazivom „Opis i metodologija poduzetog istraživanja“ daje opis i specificira metodologiju provedenog istraživanja za analizu predmetne problematike rada. Također, ono iznosi i dobivene rezultate istraživanja, te daje usporedni prikaz sekundarnih i primarnih podataka.

Posljednje poglavlje prije zaključka razrađuje središnju problematiku rada. Njegov naslov je „Razvoj mrežnih simulatora u funkciji informacijsko-komunikacijskih mreža“. Misli se na razvoj mrežnih simulatora u funkciji informacijsko-komunikacijskih mreža. U šestom poglavlju, „Zaključku“, sintetizirane su sve informacije prikupljene i obrađene tijekom izrade diplomskog rada.

2. PREGLED POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA

Proučavanjem različitih vrsta mrežnih simulatora te njihovih karakteristika koje utječu na analizu različitih tipova mreža uočen je veći broj studija o mrežnim simulatorima.[1],[2],[3] U okviru njih daju se osnovne definicije ovih alata, te se specificiraju značajke procesa simuliranja.

Osnova interesa predmetnih studija je analiza i usporedba mrežnih simulatora, koja se provodi na temelju usporedbe osnovnih karakteristika. Misli se na raspon, specificiranje čvorova i veza, grafičke i tekstualne aplikacije te programski orijentirane alate.

2.1. POJMOVNO ODREĐENJE MREŽNIH SIMULATORA I SIMULACIJE

Kao što je već i istaknuto, u suvremeno doba¹ računalne mreže postaju sve kompleksnije, a što je rezultat intenzivnog napretka znanosti i tehnologije u proteklih nekoliko desetljeća, koje su ujedno pratile i potrebe suvremenoga poslovanja i globalnog društva. Korištenje tradicionalnih analitičkih metoda u istraživanju i praćenju njihova ponašanja više ne rezultira konkretnijim koristima te ne ispunjava osnovnu svrhu. Upravo zbog toga, sve veći značaj i primjenu dobivaju mrežni simulatori. Ovi alati ne samo da prate i analiziraju rad računalnih mreža, već doprinose uočavanju njihovih nedostataka i unapređenju performansi.

Korištenje simulatora u procesu istraživanja ponašanja i performansi računalne mreže naziva se mrežnom simulacijom. One se javljaju kao osnovni alat analize velikih mreža. U praksi se koriste u različite svrhe, a moguće je govoriti o:

- Predviđanju i praćenju ponašanja nekog protokola, kao mehanizama mreže;
- Razumijevanju učinaka novih protokola;
- Razumijevanje mehanizama, aplikacija i mrežnih usluga u procesu korištenja velikog raspona mreža;
- Dizajniranju, simuliranju, provjeravanju i analiziranju performansi različitih mrežnih protokola;
- Analiziranju načina na koji sustav radi i slično. [1]

¹ Doba koje započinje oko 80-ih godina prošloga stoljeća, a traje i danas. Obilježeno je globalizacijom i pratećim procesima, intenzivnim razvojem napredne tehnologije i njezinim učestalim implementiranjem u svakodnevno poslovanje.

Na temelju navedenoga može se zaključiti kako se simulacije, a time i mrežni simulatori koriste u svrhu dizajniranja računalnih mreža i predviđanja njihovih performansi. U slučaju korištenja većeg broja simulacijskih alata govori se o paketnoj simulaciji². Neki od alata u tom slučaju su:

- *NS-2*;
- *NS-3*;
- *GNS-3*;
- *OMNET++*;
- *Riverbed Modeler*;
- *MININET*;
- *OpenStack*;
- *J-Sim* i ostali [2].

Detaljnija razrada vodećih simulatora na tržištu slijedi u narednom poglavlju rada. Brojnost mrežnih simulatora, kao i kompleksnost problematike te inozemnih studija povećava potrebu za njihovim razvrstavanjem ili klasificiranjem. Na taj način se ukazuje na osnovne skupine ili vrste simulatora, te se obrađuju temeljne karakteristike, koje utječu na njihovu primjenu u praksi.

Osnovna obilježja mrežnih simulatora su:

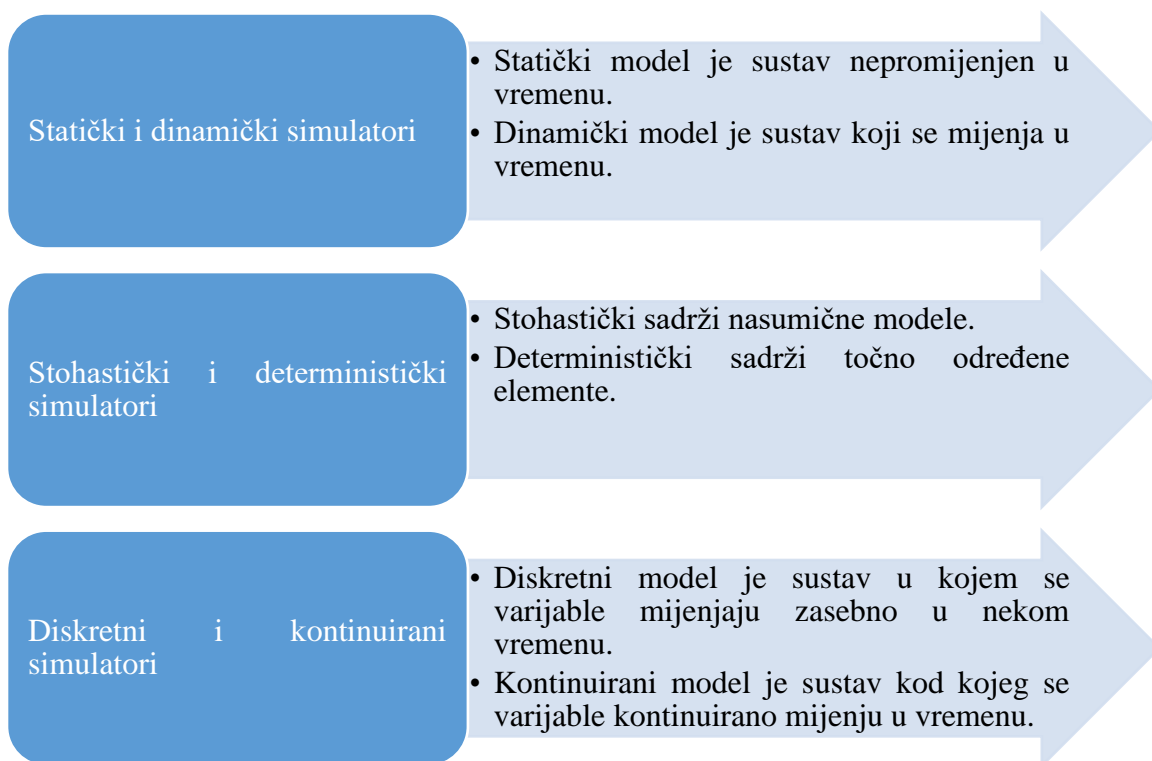
- Raspon – jednostavni i vrlo kompleksni;
- Čvorovi i linkovi između čvorova, promet, protokol, grafičke aplikacije – mogućnost jednostavne vizualizacije rada simulirane okoline;
- Tekstualne aplikacije – napredniji oblici zahtjeva;
- Programski orijentirani alati – omogućuju programiranje na osnovnu vlastitih potreba, što doprinosi mogućnosti simulacije mrežne okoline koja se testira. [2]

² Integriranje simulacijskih mreža. Kombinacija istih dovodi do boljih performansi i šire namjene.

U znanstvenim studijama postoje određena područja koja su značajno najzastupljenija. Pri tome se misli na:

- QoS (*Quality of Service*³);
- VoIP (*Voice over Internet Protocol*⁴);
- *Wireless*;
- *Security*;
- IoT (*Internet of Things*⁵);
- SDN (*Software-Defined Networking*⁶);
- *Cloud Computing*⁷;
- LTE (*Long Term Evolution*⁸). [4]

U nastavku se daje pregled skupina ili vrsta mrežnih simulatora, na temelju njihovih karakteristika (slika 1.).



Slika 1. Klasifikacija mrežnih simulatora

³ Kvaliteta usluga.

⁴ Prenos glasa i multimedijalnog sadržaja putem Internet protokola.

⁵ Povezivanje uređaja koji imaju mogućnost spajanja na Internet.

⁶ Softversko umrežavanje.

⁷ Računarstvo u oblaku.

⁸ Superbrza bežična komunikacija.

Računalne komunikacije iznimno su kompleksne, što implicira jednaka obilježja mrežnih modela. Iako se ponekad za potrebe simulacijskih modela razvijaju zasebni računalni programi, praksa je sve rjeđa s obzirom da je riječ o dugotrajnom, financijski iscrpnom i relativno neučinkovitom procesu. Kako bi se ti problemi otklonili, a potrebe ipak zadovoljile primjenjuju se aplikacije za simulacije i modeliranje. Pri tome je svrha procesa modeliranje, a ne programiranje⁹.

2.2. POTREBA ZA MODELIRANJEM I SIMULACIJOM KOMUNIKACIJSKE MREŽE

Danas je također dostupan i velik broj studija koje koriste određene mrežne simulatore kako bi izvršili analizu i usporedbu različitih segmenata u području informacijsko-komunikacijskih mreža. Takvo stanje utječe na neprikladnost složenih statičkih proračuna i proračunskih tablica pa organizacije sve više ovise o novim mrežnim tehnologijama i mrežnim aplikacijama, koje podržavaju njihove kritične poslovne potrebe. Također, loša izvedba mreže može ozbiljno utjecati na uspješnost poslovanja njihovih poduzeća. U svrhu ocjene alternativnih rješenja dizajneri mreže sve se više usredotočuju na metode koje im pomažu u procjeni nekoliko prijedloga dizajna prije nego što se napravi konačna odluka, a stvarni sustavi budu izgrađeni.

Simulacijski modeli mogu predstavljati mrežnu radnu površinu i zadatke koji se izvode u mreži kako bi se dobili statistički rezultati o performansama mreže. U simulaciji je cilj generirati statističke rezultate koji predstavljaju ponašanje određenih mrežnih elemenata i njihovih funkcija. Simulacija omogućuje promatranje događaja tijekom vremena, te prikupljanje mjere za izvođenje zaključaka o performansama mreže, kao što su poveznice, vrijeme odziva, veličina međuspremnik i slično.

⁹ Programiranje je pisanje uputa računalu što i kako učiniti, a izvodi se u nekom od programskih jezika. Programiranje je umjetnost i umijeće u stvaranju programa za računala. Stvaranje programa sadrži u sebi pojedine elemente dizajna, umjetnosti, znanosti, matematike kao i inženjeringa. Osoba koja stvara program zove se programer.

Na primjeru simulacija velikih mreža s mnogo mrežnih elemenata može doći do velikih modela koji se teško analiziraju uslijed velike količine statističkih podataka generiranih tijekom simulacije. U toj situaciji preporučuje se modeliranje onih dijelova koji su značajni s obzirom na statističke podatke koji će se generirati iz simulacije.

Neki od ciljeva dizajnera u ovome slučaju su:

- Modeliranje performansi – pribavljanje statističkih podataka za različite parametre performansi veza, usmjerivača, preklopnika, spremnika (engl. *buffer*), vremena odziva i ostaloga;
- Analiza neuspjeha – analiziranje učinaka kvarova mrežnih elemenata;
- Dizajn mreže – usporedba statistike o alternativnim mrežnim projektima za procjenu zahtjeva alternativa;
- Planiranje mrežnih resursa – mjerenje utjecaja promjena na učinkovitost mreže, kao što su dodavanje novih korisnika, nove aplikacije ili nove mrežne elemente. [4]

Ovisno o ovim ciljevima, ista mreža možda će trebati različite simulacijske modele. Na primjer, ako modelar¹⁰ želi odrediti opterećenje nove usluge protokola u komunikacijskim vezama, veze modela trebaju predstavljati samo promet koji generira nova usluga. U slučaju kada modelar želi analizirati vrijeme odziva aplikacije pod maksimalnim ponuđenim opterećenjem prometa, model može zanemariti promet koji odgovara novoj usluzi protokola analiziranog u prethodnom modelu.

Osim navedenoga, u obzir treba uzeti i granularnost modela¹¹. Iako operacije niske razine usmjerivača utječu na ukupno vrijeme odziva od kraja do kraja, modeliranje detaljnih operacija ne pridonosi značajno rezultatima simulacije kada se gleda cijela mreža. Modeliranje detalja internih operacija usmjerivača u redosljedu veličinom nanosekunda ne pridonosi analizi kašnjenja od kraja do kraja u većem opsegu sekundi. [4]

Simulacija mreže uključivanjem detalja o usmjerivačima također su pojednostavljene primjenom statističkih funkcija. Ovime se zapravo pokazuju da je cilj simulacije mreže

¹⁰ Izvođač modeliranja, središnji subjekt procesa.

¹¹ Razina detalja na kojima je mrežni element modeliran.

reproducirati funkcionalnost mreže koja se odnosi na određenu analizu, a ne emitirati je, što je cilj ili svrha emulacije kao oprečnog pojma i procesa.

2.3. KONSTRUKCIJE ZA MODELIRANJE KOMUNIKACIJSKE MREŽE

Prilikom razrade problematike konstruiranja za modeliranje komunikacijske mreže važno je prvenstveno definirati predmetni pojam. Naime, komunikacijska mreža je sastavljena od mrežnih elemenata, čvorova i povezivanja komunikacijskih medija. Sukladno tome, može se pojmiti kao spoj ili splet navedenih elemenata. S obzirom na kompleksnost problematike, njihovo se razvrstavanje provodi na temelju kriterija tehnologije prijenosa i mjerila. U suvremeno doba najpoznatija mreža i ogledni primjer je Internet.

Prema kriteriju tehnologije, mreže se dijele na emitiranje i mreže od točke do točke. U širokopojasnim mrežama svaki se čvor dijeli s jednim komunikacijskim kanalom. Adresno polje okvira specificira primatelja ili primatelje okvira, a samo će adresirani primatelji obraditi okvir. Tehnologije emitiranja dopuštaju adresiranje okvira svim čvorovima, a moguće je i adresirati okvir koji se šalje svim ili bilo kojim članovima samo grupe čvorova. S druge strane, mreža od točke do točke sastoji se od mnogih veza između parova čvorova.

S gledišta sljedećeg kriterija, a misli se na razmjer mreže, identificiraju se mreže prema njihovu obuhvatu, odnosno pokrivenosti fizičkim područjem. Misli se na vrste kao što su:

- Osobne mreže (PAN) koje podržavaju potrebe osobe, tipkovnice, miša i personalnog digitalnog pomoćnika (PDA) može se smatrati PAN-om;
- Lokalne mreže (LAN) koje su obično u vlasništvu osobe, odjela, manje organizacije kuće, a pokrivaju ograničeno geografsko područje. One se mogu pojedinačno podijeliti na osnovu tehnologije prijenosa, brzine mjerenja u bitovima u sekundi i topologiji;
- Mreže velegradskih područja (MANs) koje obuhvaćaju veće područje, kao što su gradovi ili predgrađa. Izrazito razmješteni MAN je mreža kableske televizije koja u neiskorištenom dijelu prijenosnog spektra distribuira ne samo jednosmjerne TV programe, nego i dvosmjerne internetske usluge. Druga MAN tehnologija su *Fiber Distributed Data Interface* (FDDI). [4]

U domeni razrade modeliranja, važno se osvrnuti na ciljeve izvedbe za potrebe simulacije. Riječ je zapravo o neiscrpnom popisu mrežnih atributa koji imaju veliki utjecaj na percipiranu mrežnu izvedbu i uobičajeni su ciljevi modeliranja mreže. Oni predstavljaju ciljeve statističke analize, dizajna i optimizacije računala.

U osnovi su mrežni modeli konstruirani određivanjem statističke raspodjele stope dolaska i usluge u sustavu čekanja koji naknadno određuje te atribute. Misli se na:

- Kapacitet linka ili veze predstavlja broj poruka po jedinici vremena kojim upravlja link, a obično se mjeri u bitovima u sekundi;
- Vrijeme odziva uključuje vrijeme prijenosa do odredišta, vrijeme obrade na izvoru i na odredištu te na srednjoj mreži na stazi, a vrijeme prijenosa na izvor;
- Prosječno vrijeme odziva je važna mjera performansi mreže. Što se tiče korisnika, vrijeme odgovora je niže. Statistika vremena odgovora (srednja vrijednost i varijacija) trebala bi biti stacionarna, odnosno ne bi trebala ovisiti o vremenu. Pri tome na umu treba imati činjenicu da nisko prosječno vrijeme odziva ne jamči da nema ekstremno dugog vremena odgovora zbog zagušenja mreže;
- Pored toga, treba spomenuti količinu vremena koja je potrebna da se jedinica podataka prenosi preko mrežne veze. Riječ je o latenciji¹², odnosno atributu koji određuje brzinu veze. To uključuje kašnjenje širenja¹³ i vrijeme obrade;
- Protokoli za usmjeravanje – put kojim se mrežni promet odvija od izvora do odredišta. Ruta može prelaziti kroz višestruke veze s različitim kapacitetima, latencijama i pouzdanošću. Usluga se uspostavlja protokolima usmjeravanja. Cilj protokola za usmjeravanje je optimalna ruta između izvora i odredišta, uz potpuno izbjegavanje zagušenja;
- Prometni inženjering – nova vrsta tehnike usmjeravanja koja koristi koncept inženjeringa prometa. Prometni inženjering podrazumijeva upotrebu mehanizama kako bi se izbjeglo zagušenje, optimalno raspoređujući mrežne resurse, umjesto da stalno povećava mrežne kapacitete. Prometni se inženjering postiže mapiranjem prometnih tokova u topologiju fizičke mreže duž unaprijed određenih staza. On osigurava mogućnost odstupanja prometa od optimalnog puta izračunatog tradicionalnim protokolima usmjeravanja u manje zagušeno područje mreže. Svrha je uravnotežiti

¹² Propusnost.

¹³ Vrijeme potrebno da električni ili optički signali putuju između dva mjesta.

ponuđeno opterećenje na linkovima, usmjerivačima i prekidačima na način da nijedan od tih mrežnih elemenata nije upotrijebljen ili prekomjerno korišten;

- Protokolne glave – protokolne poruke i aplikacijski podaci ugrađeni su u podatkovne jedinice protokola, kao što su okviri, paketi i stanice. Glavni interes mrežnih dizajnera su nadređeni protokoli (Koliko brzo se može doista prenijeti određeni komunikacijski put istog protokola?);
- Veličina okvira – dizajneri mreže obično su zabrinuti zbog velikih okvira jer mogu popuniti spremnike s mnogo više manjih okvira što rezultira izgubljenim okvirima. Kašnjenje obrade za veće okvire je isto kao i kod manjih, odnosno veći paketi, naizgled učinkovitiji, usmjerivači i preklopnici mogu brže obraditi interne redove s manjim paketima. Veći okviri također su meta za fragmentaciju, a s druge strane, manji okviri mogu stvoriti veću koliziju ili imati niže iskorištenje;
- Ispuštanje paketa – paketi mogu biti odbačeni od podatkovne veze i mrežnih slojeva. Brzina padajućih paketa na nižim slojevima određuje brzinu ponovnog emitiranja paketa na prijenosnom sloju. Usmjerivači i preklopnici također mogu ispustiti pakete zbog nedostatka internih spremnika (engl. *buffer*). [4]

Nakon razrade potrebe za modeliranjem, kao i atributa koji su predočeni kao ciljevi izvedbe za potrebe modeliranja, daje se popis dominantnih simulatora na suvremenom tržištu. Osim njihova identificiranja pristupa se analizi osnovnih prednosti i nedostataka.

3. MREŽNI SIMULATORI

Prema utvrđenim područjima koja su prepoznata kao značajnije zastupljena u korištenim znanstvenim bazama, a misli se na već spomenuta QoS, VoIP, *Wireless*, *Security*, IoT, SDN, *Cloud computing* i LTE, moguće je ukazati na dominantne mrežne simulatore. Oni danas čine glavninu tržišta pa bivaju predmetom istraživanja i u ovome radu. Misli se na *NS-2*, *NS-3*, *GNS-3*, *OMNET++*, *OpenStack*, *Mininet*, *Riverbed Modeler*, *Qualnet* i *J-Sim*.

Kao podloga za prikupljanje podataka i donošenje zaključaka o primjenjivosti pojedinih mrežnih simulatora poslužile su relevantne dostupne znanstvene baze radova, a to su:

- *Elsevier's Scopus*;
- *IEEE Xplore Digital Library*;
- *Science Direct* i
- *Web of Science Thomson Reuters*. [2]

U kontekstu navedenih značajki mrežnih simulatora različiti autori razmatraju njihove prednosti i nedostatke. One također bivaju iskazane prilikom analize svakog od navedenih simulatora.

3.1. NETWORK SIMULATOR 2 – NS-2

Ovaj simulator osmišljen je i dizajniran za potrebe istraživanja u području računalnih mreža. Kao što i naziv indicira, riječ je o drugoj inačici *Network Simulatora*. Ista je bazirana na mrežnom simulatoru *REAL*, koja predstavlja raniju verziju *NSI*. Konkretnije je riječ o besplatnom simulatoru koji je namijenjen i koristi se u svrhu simuliranja mrežnih protokola s diferenciranim mrežnim topologijama, a može simulirati žičanu i bežičnu mrežu. [2]

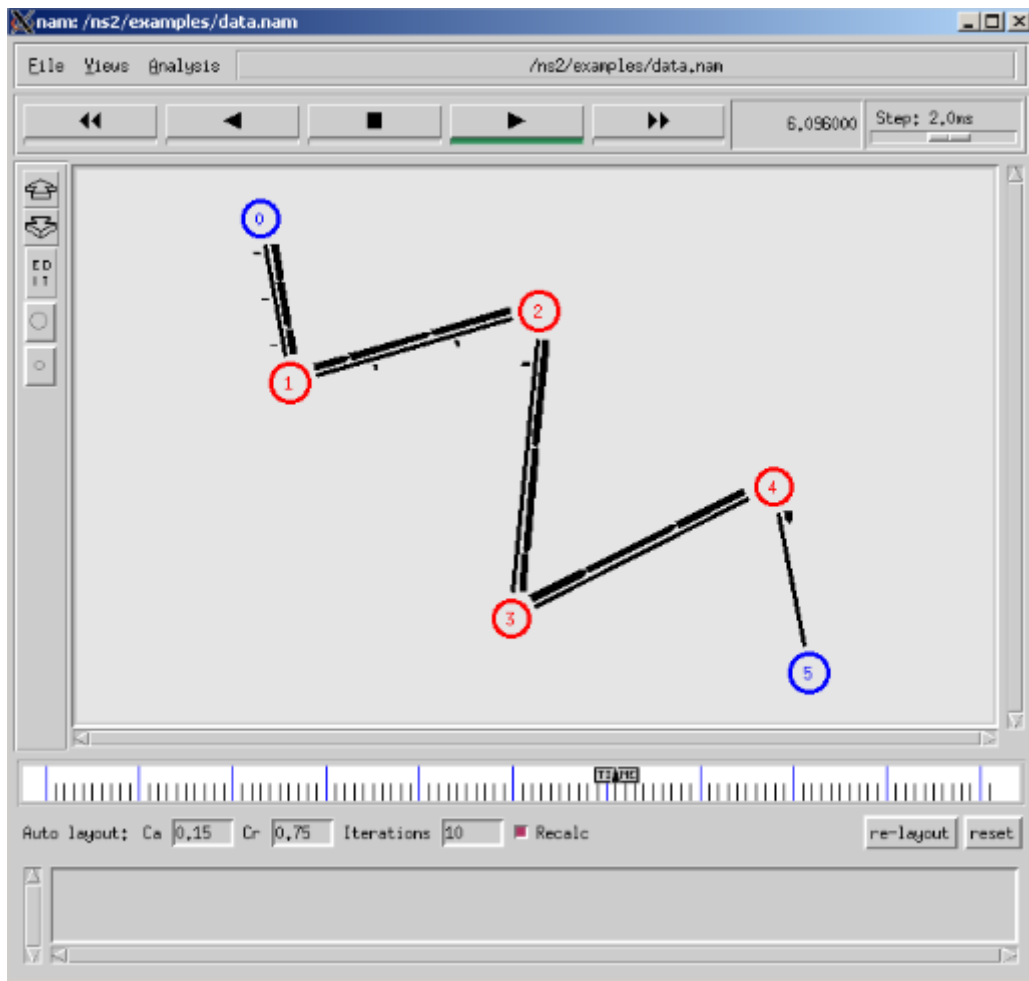
Ovaj jednostavni alat za simulaciju događaja pokazao se korisnim u proučavanju dinamičke prirode komunikacijskih mreža. Simulacija žičanih, kao i bežičnih mrežnih funkcija i protokola¹⁴ može se izvršiti pomoću *NS-2*. Općenito, *NS-2* korisnicima pruža način određivanja takvih mrežnih protokola i simulaciju njihovih odgovarajućih ponašanja.

¹⁴ Na primjer algoritmi za usmjeravanje, TCP, UDP.

Zbog svoje fleksibilnosti i modularnosti, *NS-2* je od svojeg nastanka 1989. godine dobio kontinuiranu popularnost u istraživačkoj zajednici umrežavanja. Otada su nekoliko revolucija i revizija obilježile rastuću zrelost alata, zahvaljujući značajnim doprinosima vodećih dionika. Među njima su Sveučilište Kalifornija i Sveučilište Cornell koji su razvili *REAL* mrežni regulator, na temelju kojega je izumljen *NS*.

Od 1995. godine Agencija za napredne istraživačke projekte (DARPA) podržala je razvoj *NS-a* kroz projekt *Virtual InterNetwork Testbed* (VINT). [5] Danas skupina istraživača i razvojnih timova na međunarodnoj razini neprestano radi na tome da *NS-2* ostane snažan i raznovrstan alat.

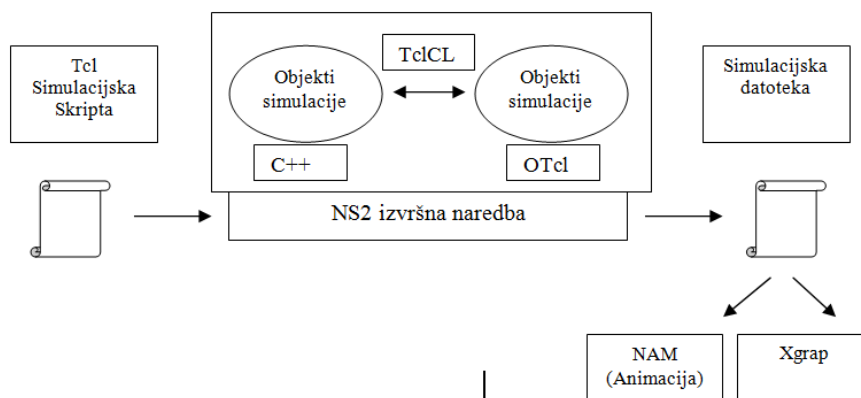
NS-2 je napravljen u programu C++, odnosno programskom jeziku opće namjene, a omogućuje simulaciju sučelja kroz *Otcl*, koji predstavlja programski jezik za razvoj samostalnih aplikacija. Pri tome korisnik stvara mrežnu topologiju korištenjem *Otcl*, a glavni *NS* program simulira dotičnu topologiju uz specificirane parametre.[16] Prikaz ovog mrežnog simulatora daje se slikom 2.



Slika 2. Prikaz grafičkog sučelja NS-2

Kao što je i prikazano slikom 2., NS-2 je mrežni simulator jednostavnog grafičkog sučelja. Riječ je o najčešće korištenom mrežnom simulatoru u svrhu istraživanja. NS-2 daje korisnicima naredbu "ns" koja uzima jedan ulazni argument, ime Tcl simulation skriptne datoteke. U većini slučajeva kreira se simulacijska datoteka praćenja koja se koristi za crtanje grafikona i/ili za stvaranje animacije.

U svrhu detaljnijeg razumijevanja i analize ovog mrežnog simulatora, slikom 3 predočava se njegova arhitektura.



Slika 3. Arhitektura NS-2

NS-2 se sastoji od dva ključna jezika: CCC i *Object-oriented Tool Command Language* (OTcl). Dok CCC definira interni mehanizam (pozadinu) simulacije, OTcl postavlja simulaciju sklapanjem i konfiguriranjem objekata, kao i raspoređivanjem diskretnih događaja (*frontendom*). CCC i theTcl povezani su zajedno pomoću TclCL. Konceptualno, varijabla je samo niz (npr., "_O10") u OTcl domeni i ne sadrži nikakvu funkcionalnost. Umjesto toga, funkcionalnost (npr. primanje paketa) je definirana u CCCObjectu. U OTcl domeni moguće je definirati vlastite procedure i varijable kako bi se olakšala interakcija. [5]

3.2. NETWORK SIMULATOR 3 – NS-3

Ovaj mrežni simulator vrlo je sličan NS-2. Akademska istraživanja i razvoj predstavljaju područje u kojemu se najviše primjenjuje. Njegov razvoj započeo je 2006. godine, a prva inačica nastupa 2008. godine. Temelji se na spomenutom C++ i *Pythonu*, koji također predstavlja kao C++, programski jezik opće namjene.

NS-3 pogodan je za prevladavanje nekih osnovnih nedostataka i izazova u suvremeno doba. Ukoliko postoji želja za izvođenjem ispitivanja ili testiranja načina na koji mreža radi pomoću raznih parametara, te ukoliko nema dostatnog broja računala i usmjerivača za izradu različitih topologija ili čak ukoliko postoje ovi resursi, ali je izgradnja mreže preskupa, pogodno je koristiti ovaj simulator. [17]

NS-3 je mrežni simulator diskretnih događaja za Internet. On pomaže u stvaranju različitih virtualnih čvorova i uz pomoć raznih „*helper*“ klasa omogućuje instaliranje uređaja, internetskih stackova, aplikacija i ostaloga u čvorove.

Koristeći *NS-3* moguće je stvoriti *PointToPoint*, *Wireless*, *CSMA* i ostale veze između čvorova. *PointToPoint* veza je ista kao i LAN spojena između dva računala. Bežična veza je ista kao i WiFi veza između različitih računala i usmjerivača. *CSMA* veza je ista kao i topologija sabirnice između računala. Nakon izgradnje veza važno je instalirati NIC na svaki čvor kako bi se omogućilo mrežno povezivanje. [6]

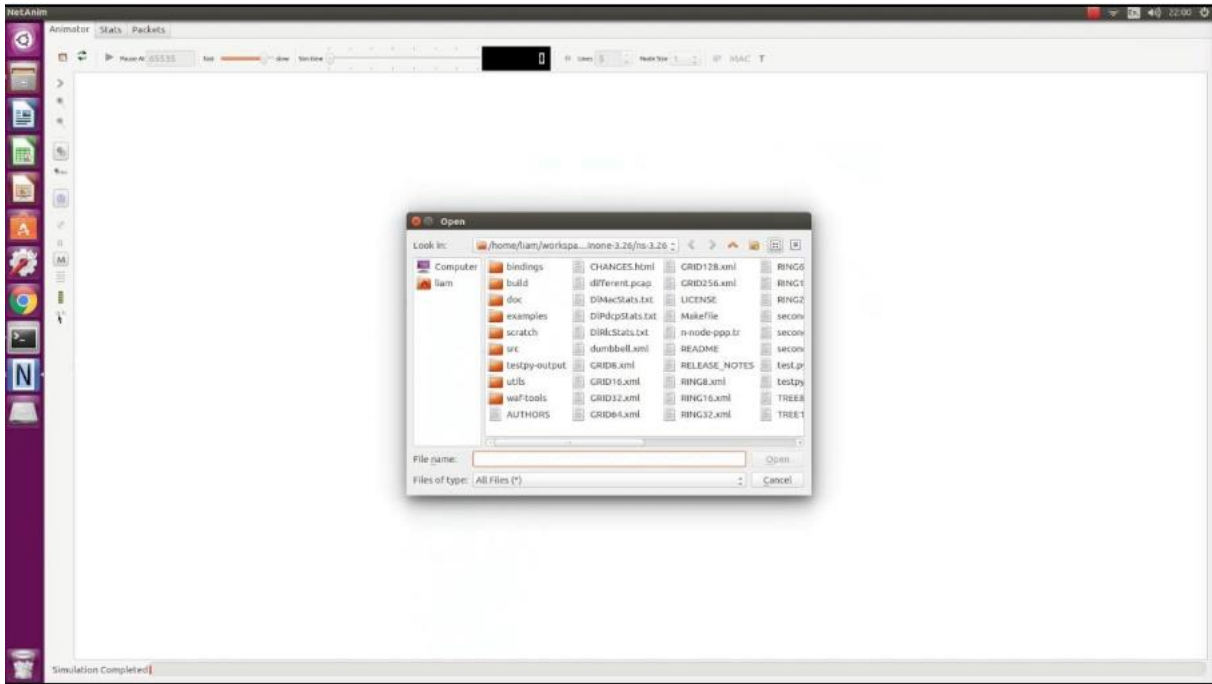
Kada su mrežne kartice omogućene u uređajima, u kanale se dodaju različite parametre koji su zapravo podatkovna brzina, veličina paketa i slično. Nakon toga se koristi aplikacija za generiranje prometa i slanje paketa pomoću tih aplikacija.

NS-3 daje posebne značajke koje se mogu koristiti za stvarne životne integracije. Neke od tih značajki su:

- Praćenje čvorova – omogućuje praćenje rute čvorova što pomaže u percepciji količine poslanih ili primljenih podataka. Datoteke praćenja generiraju se za praćenje tih aktivnosti;
- *NetAnim* – kratica za *Network Animator*, animirana verzija kako će mreža izgledati u stvarnom i kako će se podaci prenijeti s jednog čvora na drugi;
- *Pcap* datoteka – simulator pomaže generirati ovu datoteku koja se može koristiti za dobivanje svih informacija o paketima¹⁵. One se mogu vidjeti pomoću programskog alata poznatog kao *Wireshark*;
- *GnuPlot* – koristi se za crtanje grafova iz podataka koji se dobivaju iz datoteke praćenja *NS-3*. *GnuPlot* daje točniji grafikon usporediv s drugim alatima za izradu grafova, a također je manje složen od drugih alata. [6]

¹⁵ Na primjer redni broj, IP izvor, IP odredište i slično.

Ovaj simulator moguće je pokrenuti na tri glavne platforme, a to su Linux, macOS i FreeBSD. Također predstavlja besplatni simulator i daje potporu istraživanju na IP mrežama, ali i ostalima koje koriste uglavnom Wi-Fi, EiMAX i LTE modele te niz statičnih i dinamičnih routing protokola. Dok *NS-2* sadrži samo mrežni animator NAM, ovaj simulator pored njega sadrži i emulator za integriranje realnih mreža. [2] Slikom 4. predočuje se grafičko sučelje *NS-3*.

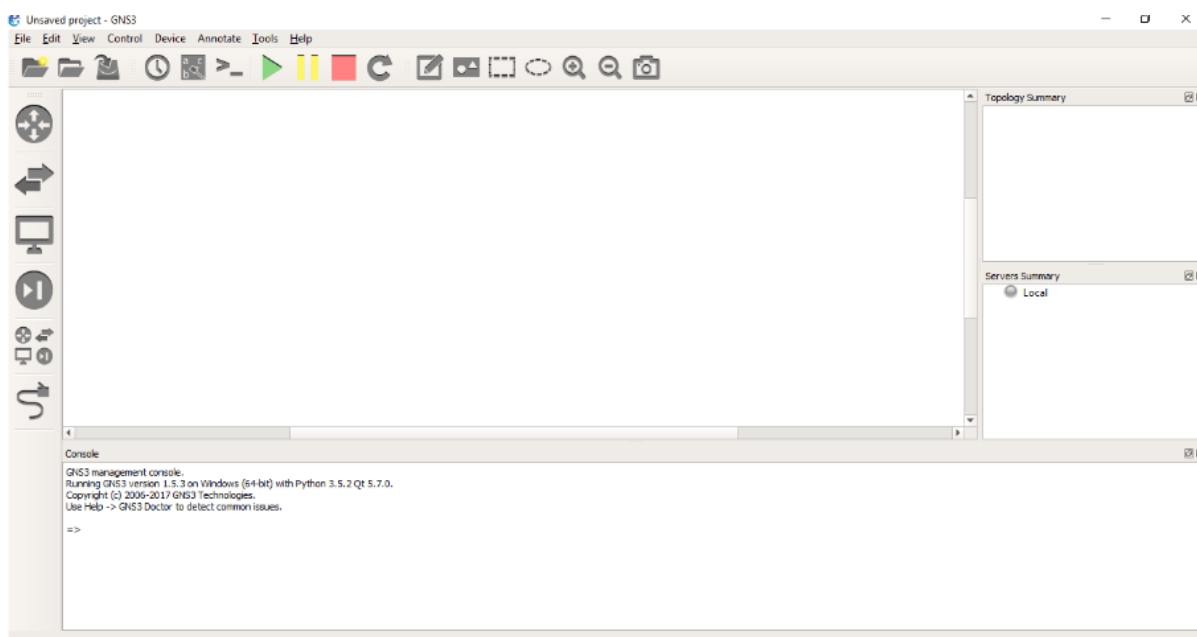


Slika 4. Prikaz grafičkog sučelja *NS-3*

Vidljivo je da *NS-3* nije nadogradnja *NS-2*. Prema grafičkom prikazu koji je predočen slikom 4. jasno je kako je riječ o novom simulatoru, koji nije kompatibilan s *NS-2*.

3.3. GRAPHICAL NETWORK SIMULATOR 3 – GNS-3

Kao i prethodni simulator, *GNS-3* se na tržište pojavljuje 2008. godine, a koristi se za simulaciju jednostavnih i malih, no i velikih te kompleksnih mreža. Namjena ovog simulatora jest emuliranje, konfiguriranje, testiranje i rješavanje problema na virtualnim i realnim mrežama. [7] U nastavku se, slikom 5. prikazuje grafičko sučelje *GNS-3*.



Slika 5. Prikaz grafičkog sučelja GNS-3

Riječ je o besplatnom simulatoru koji se pokreće na operativnim sustavima *Windows*, *Linux* i *MacOS*. Simulator koristi programski jezik *Python*, a sadrži grafičko sučelje koje omogućava stvaranje virtualizirane mreže s različitim ruterima, preklopniceima i računalima. Grafičko sučelje sastoji se od nekoliko prozora (prozor s tipovima mrežnih uređaja koji služi za izbor mrežnih uređaja za testiranje, prozor pod nazivom radna površina koji se koristi za slaganje novonastalih računalnih mreža za testiranje i prozor konzola za prikaz naredbi).[18]

GNS-3 je bio četvrti dominantni simulator u 2018. godini na Udemyju, globalnom online tržištu učenja s 80 000 online tečajeva, 24 milijuna studenata i tisućama tvrtki. *GNS-3* je softver otvorenog koda, a podržava mnoge mrežne dobavljače. *GNS-3* također omogućuje dodavanje virtualnih strojeva gotovo bilo kojeg opisa na vaše *GNS-3* topologije.

GNS-3 ne ograničava broj uređaja koje je moguće pokrenuti u topologiji. Sukladno tome, moguće je pokrenuti stotine uređaja u *GNS-3* topologiji (pod pretpostavkom da postoji hardver za to). *GNS-3* može raditi na lokalnom računalu, na poslužitelju koji izvodi *VMware ESXi* ili čak u oblaku. [8]

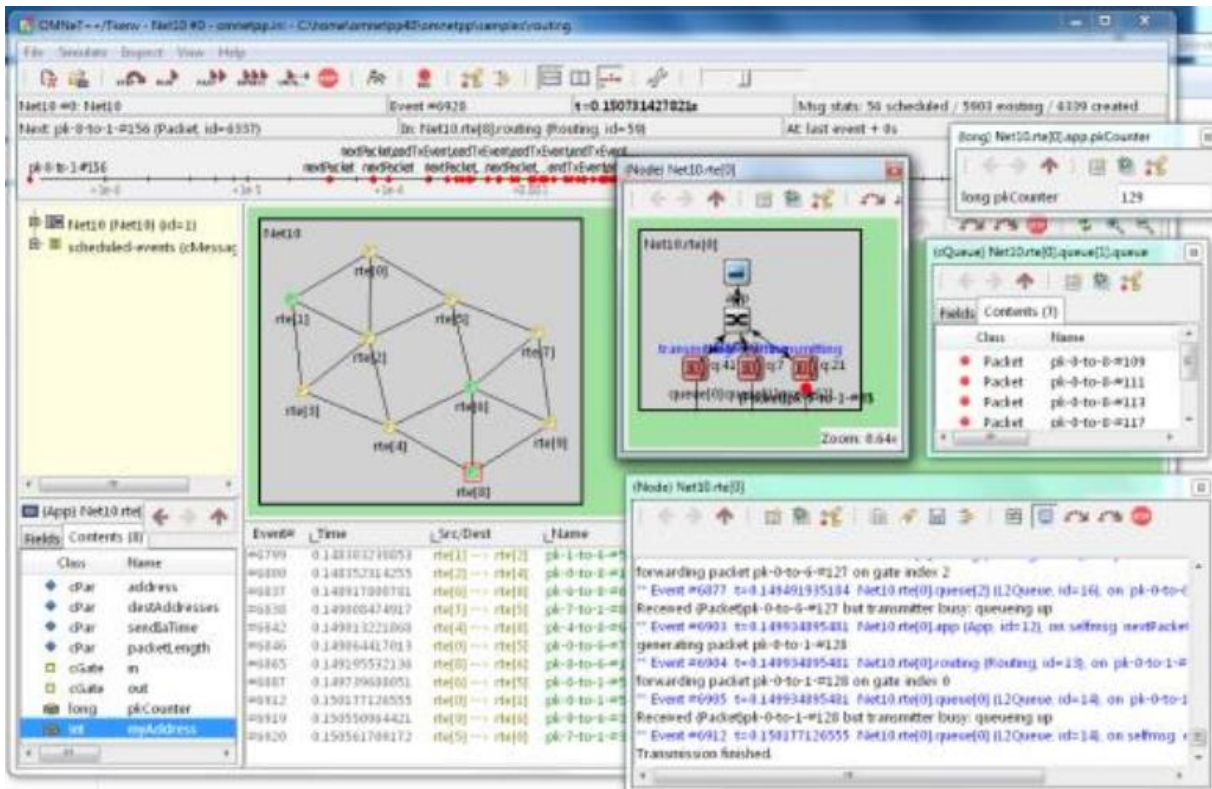
GNS-3 se ne koristi samo za proučavanje, nego i za testiranje mreža prije nego što ih se stavi u proizvodnju. Tvrtke diljem svijeta testiraju stvari na ovome simulatoru prije uvođenja. Opcije i varijacije za laboratorijske topologije s *GNS-3* su gotovo beskrajne. Također, *GNS-3* ima vrlo veliku i aktivnu zajednicu (1,3 milijuna). Članovi zajednice međusobno si pomažu i također daju laboratorije koje je moguće iskoristiti za učenje.

Budući da je *GNS-3* toliko svestran i moćan, dolazi s nedostatkom složenosti za postavljanje. Treba daleko više komponenti za pokretanje modernih verzija softvera. Misli se na *GNS-3* grafičko korisničko sučelje i virtualni stroj *GNS-3 (VM)* kada se koristi *Windows* ili *Mac OS*. [8]

3.4. OMNET++

Ovaj simulator predstavlja besplatni mrežni simulator koji ima grafičko sučelje. Primarna namjena su mu komunikacijske mreže, a dizajniran je na način da osigurava komponentnu arhitekturu. Modeli ili moduli *OMNET++* sastavljeni su od komponenti koje se mogu ponovno koristiti.

Sljedeće značajno obilježje programa *OMNET++* simulacijska je standardna C++ biblioteka. Ona se sastoji od simulacijske jezgre i pomoćnih opcija koje su činile simulacijske komponente. Također objedinjuje i infrastrukturu za sastavljanje simulacija od različitih komponenti. [2] Slika 6. daje prikaz grafičkog sučelja *OMNET++*.

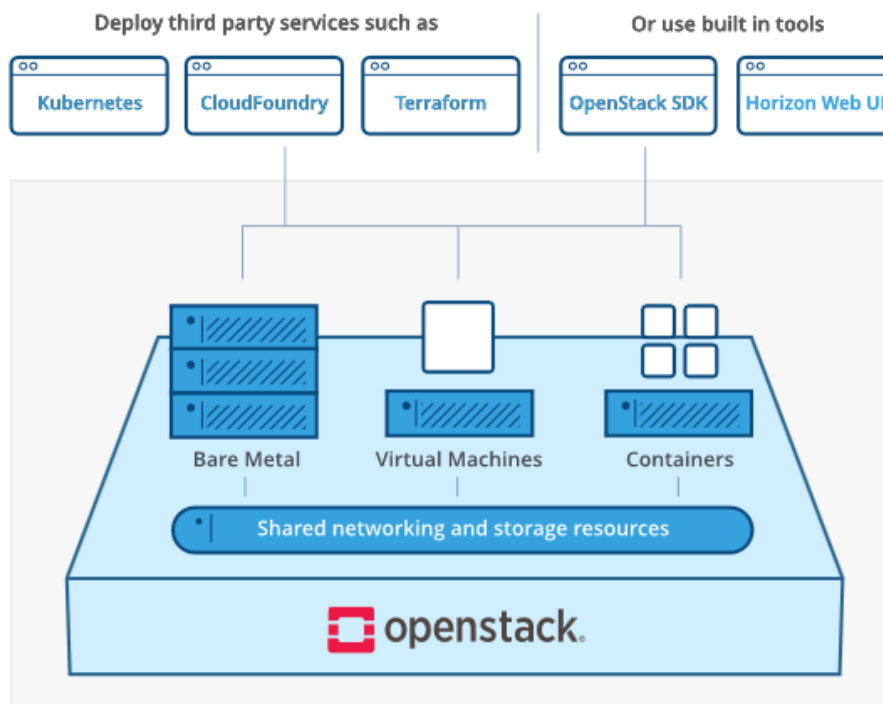


Slika 6. Prikaz grafičkog sučelja OMNET++

Prikazano grafičko sučelje ukazuje na postojanje generičke i fleksibilne arhitekture koja simulator čini prikladnim i za ostala područja. Misli se na IT sustave, mreže čekanja, hardversku arhitekturu i poslovne procese.[19]

3.5. OPENSTACK

Ovaj program upravlja velikim skupinama resursa za računanje, pohranjivanje i umrežavanje u čitavom podatkovnom centru, a kojim se upravlja putem nadzorne ploče ili putem sučelja za programiranje aplikacija u *OpenStack* (*OpenStack* API – sučelje za komunikaciju između aplikacija). Osmišljen je 2010. godine, a idealan je za heterogene infrastrukture.



Slika 7. Način rada mrežnog simulatora *OpenStack*

Kao takav, predstavlja besplatnu otvorenu platformu za pohranjivanje u oblaku uglavnom u obliku platforme „infrastruktura kao servis“, kao što je i prikazano. Na danom prikazu evidentno je grafičko sučelje. Softverska platforma sastoji od međusobno povezanih komponenti koje upravljaju različitim hardverskim skupinama resursa za obradu, pohranu i umrežavanje u podatkovnom centru. [9]

Na primjeru *OpenStack* simulatora postoji mnogo *OpenStack* oblaka, javnih i privatnih, a svakim upravlja druga organizacija s različitim ciljevima i donosi različite odluke. Ovi oblaci mogu imati preklapajuće skupove korisnika. To dovodi do nekih zahtjeva koji su specifični za *OpenStack* i ne smiju se dijeliti s drugim oblacima.

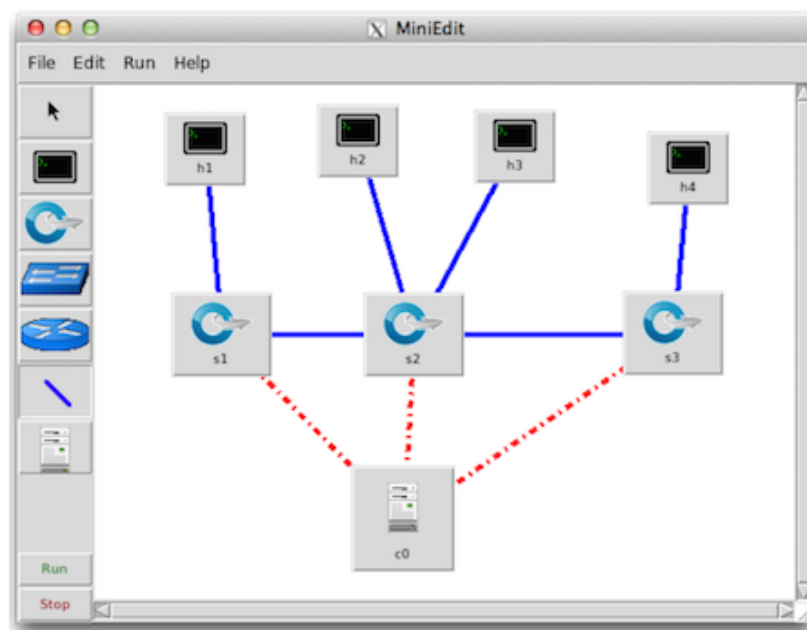
Interoperabilnost jedno je od njegovih obilježja. *OpenStack* nastoji oblikovati mehanizme koji se mogu koristiti u bilo kojem okruženju, tako da se aplikacije mogu prenositi iz jednog *OpenStack* oblaka u drugi. Osim toga treba spomenuti i dvosmjernu kompatibilnost. Naime, u interakciji s jednim oblakom razumna je pretpostavka da su promjene monotone. Kada korisnici komuniciraju s više oblaka, ta pretpostavka više ne vrijedi.

Korisnik koji stupa u interakciju s novijom verzijom *OpenStacka* može se premjestiti u drugi oblak i pokrenuti stariju verziju *OpenStack-a*. Usluga *OpenStack* bi se stoga trebala razvijati na takav način da ili rade ispravno ili da se graciozno ne ponašaju sa starijim i novijim klijentima. [10]

Međusobne ovisnosti odnose se na uključivanje skupa usluga. Uvođenje i upravljanje novim uslugama zahtijeva dodatni rad od operatora u oblaku. Posebno veliku važnost treba posvetiti sigurnosnim prednostima za operatore i korisnike. *OpenStack* ne pretpostavlja postojanje operacijskog podatkovnog centra, nego on pruža alate za upravljanje podatkovnim centrom i stavlja njegove resurse na raspolaganje potrošačima. Pruža apstrakcije potrebne za rad s vanjskim sustavima kao što su kompjutorski, memorijski i mrežni hardver, sustav naziva domena i sustavi za upravljanje identitetima.

3.6. MININET

Ovaj mrežni emulator stvara mrežu virtualnih hostova, preklopnika, upravljačkih uređaja i linkova. Pri tome hostovi pokreću standardni *Linux* mrežni softver, njegovi preklopnici podržavaju *OpenFlow*, odnosno komunikacijski kanal za izrazito fleksibilno rutiranje i softverski definirano umrežavanje. Slika 8. Daje prikaz programskog alata *MININET*.



Slika 8. Prikaz programskog alata *MININET*

Izgled mrežnog simulatora prikazan je na slici 8. On podržava istraživačke i razvojne zadatke, testiranje, popravljavanje i sve ostale zadatke koje se mogu lakše obavljati uz pomoć eksperimentalne mreže na računalu. Tako stvara realističnu virtualnu mrežu, a na jednostavan način osigurava postizanje ponašanja sustava i točnih performansi uz adekvatnu podršku hardvera kao i eksperimentiranje s topologijama. [11]

Ovaj se simulator ističe sljedećim značajkama i namjenom:

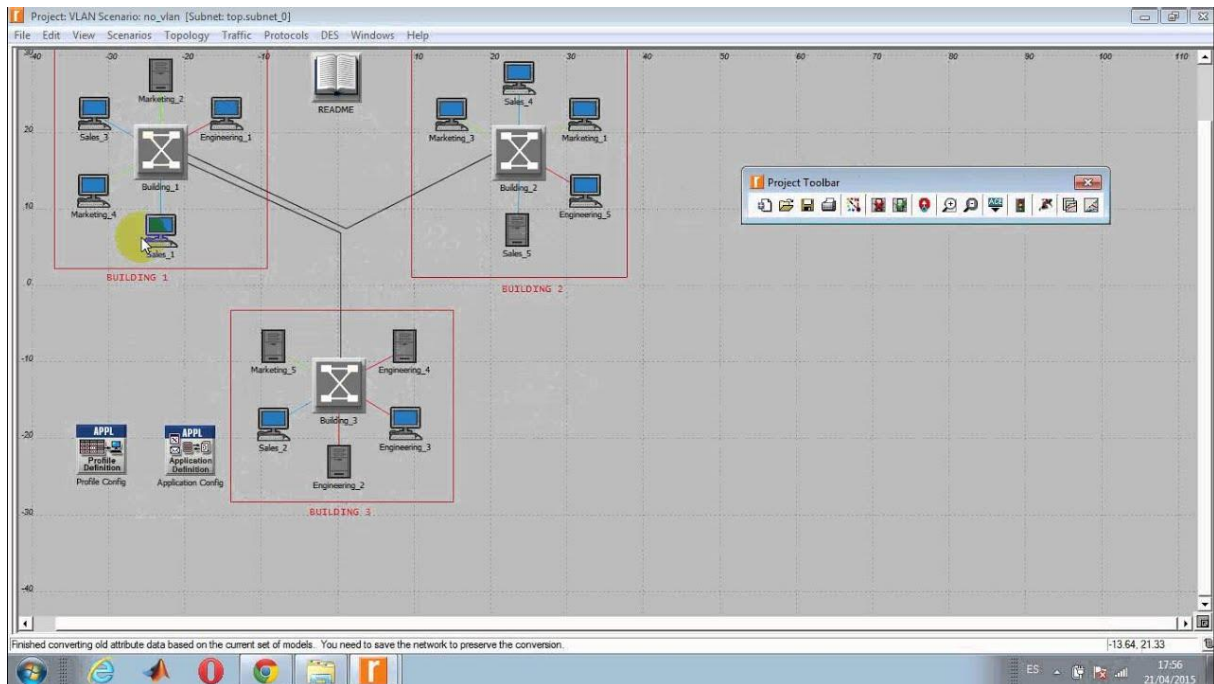
- Pruža jednostavan i jeftin mrežni alat za razvoj *OpenFlow* aplikacija;
- Omogućuje višestrukim istodobnim programerima da rade neovisno o istoj topologiji;
- Podržava regresijske testove na razini sustava, koji se ponavljaju i lako se pakiraju;
- Omogućuje složeno testiranje topologije, bez potrebe za povezivanjem fizičke mreže;
- Uključuje CLI koji je svjestan topologije i *OpenFlow* za otklanjanje pogrešaka ili pokretanje testova na razini mreže;
- Podržava proizvoljne prilagođene topologije i uključuje osnovni skup parametriziranih topologija;
- Također pruža jednostavan i proširiv *Python* API za stvaranje mreže i eksperimentiranje. [11]

MININET pruža jednostavan način dobivanja ispravnog ponašanja sustava i eksperimentiranje s topologijama. *MININET* mreže pokreću pravi kod, uključujući standardne *Unix/Linux* mrežne aplikacije, kao i pravi *Linux* kernel i mrežni *stack*. Značajno je to da dizajn koji radi u *MININET*-u obično može izravno prelaziti na hardverske prekidače za linijsko prosljeđivanje paketa.

3.7. RIVERBED MODELER

Ovaj simulator poznat je i kao *Opnet Modeler Suite*, a razvijen je od strane tvrtke OPNET Technologies, Inc 2012. godine. Definira se kao snažni softver s obzirom da nudi niz različitih simulacijskih mogućnosti, na osnovu diferenciranih protokola.

Riverbed Modeler sastoji se od skupa protokola i tehnologija. On modelira sve mrežne tipove tehnologije, a između ostaloga VoIP, TCP¹⁶, OSPFv3¹⁷, MPLS¹⁸, IPv6¹⁹ te ostale. [2]



Slika 9. Riverbed Modeler

Prethodno je dan prikaz predmetnog simulatora. Navodi se kako se njime analiziraju mreže s ciljem usporedbe diferenciranih tehnoloških dizajna na prijenos s jednog na drugi kraj mreže. Osim toga, on omogućuje testiranje i demonstriranje tehnoloških dizajna prije same produkcije, a jednako tako doprinosi maksimizaciji mrežne produktivnosti za istraživanje i razvoj. Osim toga on razvija bežične protokole i tehnologije te ocjenjuje poboljšanja standardnih protokola. [12]

Riverbed Modeler pruža virtualno okruženje za modeliranje, analizu i predviđanje performansi IT infrastrukture, uključujući aplikacije, poslužitelje i mrežne tehnologije. Komercijalna verzija ima šire mogućnosti dizajnirane za povećanje produktivnosti mreže za istraživanje i razvoj. Ona je pogodna za razvoj vlasničkih bežičnih protokola i tehnologija, te za procjenu poboljšanja na protokolima temeljenim na standardima.

¹⁶ Protokol za kreiranje virtualne konekcije prema drugom hostu zbog prijenosa podataka.

¹⁷ Usmjerivački protokol.

¹⁸ Usmjerivački protokol.

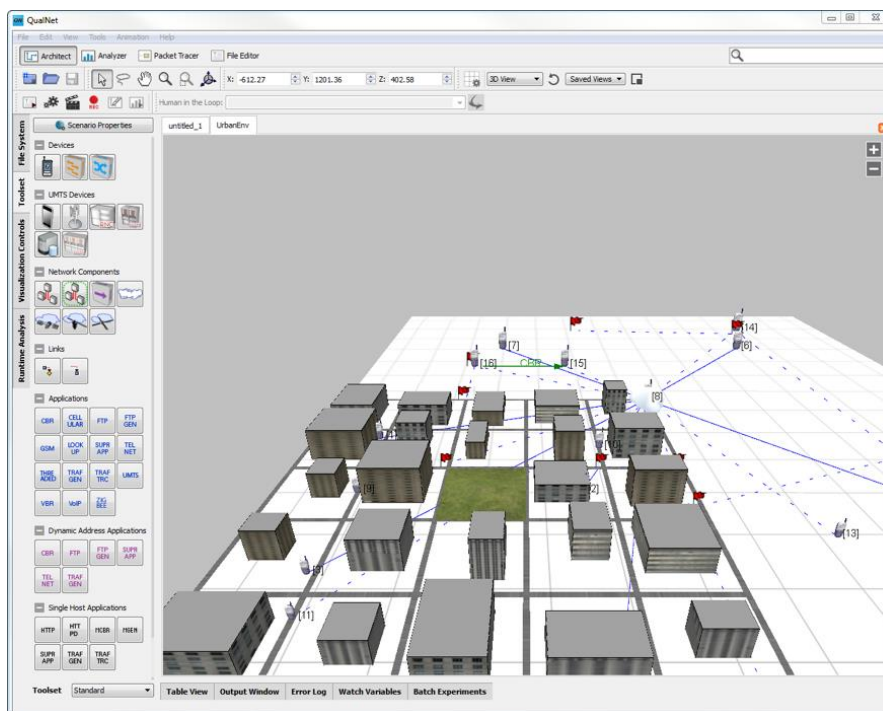
¹⁹ Nova verzija Internet protokola.

Programski alat *Riverbed Modeler* koriste tisuće komercijalnih i vladinih organizacija diljem svijeta i više od nekoliko stotina sveučilišta. Namijenjen je uvodnim tečajevima umrežavanja i samo za nastavne svrhe. *Riverbed Modeler* sadrži alate za sve faze istraživanja, uključujući dizajn modela, simulaciju, prikupljanje podataka i analizu podataka

3.8. QUALNET

Qualnet je platforma za simulaciju komunikacije, odnosno alat za planiranje, testiranje i obuku koji zapravo "oponaša" ponašanje prave komunikacijske mreže. Simulacija je isplativa metoda za razvoj, implementaciju i upravljanje mrežnim sustavima tijekom cijelog njihovog životnog ciklusa. Uz njegovu podršku korisnici mogu procijeniti osnovno ponašanje mreže i testirati kombinacije mrežnih značajki koje će vjerojatno funkcionirati.[13]

U nastavku se slikom 10. daje grafički prikaz programskog alata *Qualnet*.



Slika 10. Grafički prikaz programskog alata *Qualnet*

Softver mrežnog simulatora pruža sveobuhvatno okruženje za dizajniranje protokola, stvaranje i animiranje mrežnih scenarija te analizu njihovih performansi. On omogućuje korisnicima sljedeće:

- Dizajnirati nove modele protokola;
- Optimizirati nove i postojeće modele;
- Dizajnirati velike žičane i bežične mreže koristeći unaprijed konfigurirane ili korisnički dizajnirane modele;
- Analizirati performanse mreža i provoditi analize optimizacije. [13]

Osnovna obilježja i prednosti su mu brzina, pouzdanost modela, pokretnost i rastezljivost. *QualNet* može modelirati tisuće čvorova koristeći prednosti najnovijih hardverskih i paralelnih računalnih tehnika. Programski alat *QualNet* za simulaciju mreže može raditi na *multi-core* i multi-procesorskim sustavima za modeliranje velikih mreža s visokom pouzdanošću.

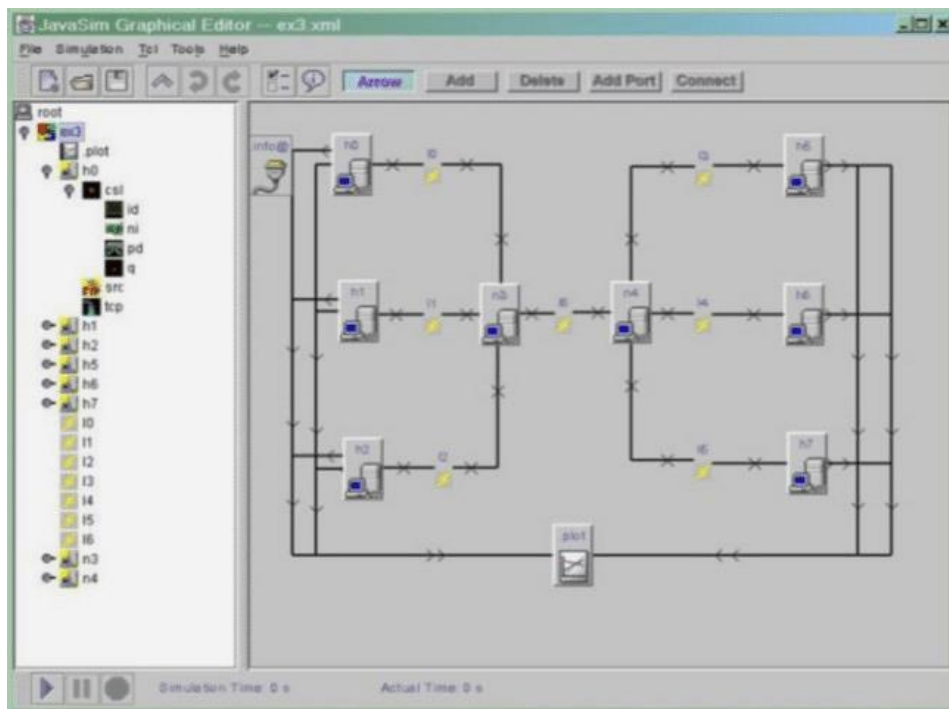
Ovaj alat za simulaciju mreže koristi vrlo detaljnu implementaciju modela protokola temeljenu na standardima. Također uključuje napredne modele za bežično okruženje kako bi se omogućilo preciznije modeliranje stvarnih mreža.

QualNet i njegova biblioteka modela rade na širokom nizu platformi, uključujući *Windows* i *Linux* operativne sustave na 64-bitnim distribuiranim i klaster paralelnim arhitekturama. *QualNet* mrežni simulacijski alati mogu se povezati s drugim hardverskim i softverskim aplikacijama, kao što su OTB, stvarne mreže i softver za vizualizaciju treće strane, kako bi se uvelike povećala vrijednost mrežnog modela.

3.9. J-SIM

Ovaj simulator temelji se na Javi, koja podržava Web-baziranu simulaciju. Kod njega je omogućeno samostalno dizajniranje, implementiranje i testiranje komponente. Komponentu se može samostalno dizajnirati, implementirati i testirati. *J-sim* je besplatna i otvorena softverska platforma za računalstvo u oblaku, uglavnom implementirana kao infrastruktura kao usluga (IaaS).

Slikom 11. daje se grafički prikaz programskog alata *J-sim*.



Slika 11. Grafički prikaz programskog alata *J-Sim*

Softverska se platforma sastoji od međusobno povezanih komponenti koje kontroliraju višestruke baze za obradu, pohranu i umrežavanje resursa preko podatkovnog centra. Korisnici je ili upravljaju putem nadzorne ploče na webu, putem alata naredbenog retka ili putem *RESTful* API-ja. [14]

J-Sim se opisuje kao:

- Novi učinkovit mehanizam za poboljšani DCM-bazirani generator za slučajni broj koji se koristi za *Xilinx* FPGA;
- Nova metoda koja se koristi za implementaciju hardvera *Wavelet* filtera na bazi polifaze za izvođenje procjene harmonika elektroenergetskog sustava;
- Novi siguran pristup za *Viperbi* dekođer visokih performansi dizajniran za multi-standardni prijemnik;
- Proces poboljšanja performansi s dinamičkom FPGA konfiguracijom unaprijed dohvaćajući pomoću okvira za ponovno podešavanje;
- Nova tehnologija za učinkovitu implementaciju *Scan Registry Insertion* na cijeli broj aritmetičkih jezgri za FPGA;

- Novi sigurni mehanizam implementacija AES algoritma za otvorene lažne ključeve protiv kontra napada;
- Učinkovita metoda za generiranje adresa s nizom složenosti i učinkovitom rekonfiguriranim multimodnim interliverom za višestruke radio uređaje;
- Izvedba algoritma za otkrivanje *Canny Edgea* koji se koristi za učinkovitu implementaciju hardvera;
- Novi mehanizam za arhitekturu procesora za vektorske operacije u on-line učenju neuronskih mreža;
- Novi pristup za razvoj BLDC motornog sustava dizala prikladnog za DC mikro mrežu;
- Nova tehnika za parametarski prostor za arhitekturu Montgomery modularnog množenja temeljenog na FFT-u;
- Novi mehanizam za potrošnju energije i poboljšani dizajn IIR filtera za desetkovanje pomoću MDT-a;
- Nova tehnologija za okvir analize performansi za obavljanje optimizacije *OpenCL* aplikacija na FPGA;
- Nova metodologija za hardverske i softverske arhitekture za kompjutorski učinkovitu trodimenzionalnu kompresiju ultrazvučnih podataka. [15]

J-Sim mrežni simulator je jedan od moćnijih alata koje koristi većina znanstvenika i studenata za ostvarenje projekta i zadatka. Obilježava ga niz prednosti u odnosu na ostale simulatore, što opravdava njegov značaj u današnjici.

3.10. USPOREDNI PRIKAZ SIMULATORA

Nakon analize svakog od navedenih simulatora iz prethodnih dijelova poglavlja, u ovome dijelu daje se komparacija njegovih temeljnih obilježja i namjene. Prikaz značajki slijedi u Tablici 1.

Tablica 1. Komparativna analiza mrežnih simulatora

| Naziv mrežnog simulatora | Plasiran na tržište | Podržavajući jezik | Platform | Dostupnost | Korisničko sučelje |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|--|----------------|---|
| NS-2 | 1996 | C++, Otcl, Tcl script | Linux, Unix, Windows, Cygwin | Otvoreni izvor | Sučelje naredbenog retka |
| NS-3 | 2008 | C++, Python | Linux, Unix, Windows | Otvoreni izvor | Sučelje naredbenog retka |
| GNS-3 | 2008 | Python | Linux, Windows, MAC OS | Otvoreni izvor | Sučelje naredbenog retka Grafičko korisničko sučelje |
| OMnet++ | 1997 | C++ | Linux, Unix, Windows, MAC OS | Otvoreni izvor | Grafičko korisničko sučelje |
| OpenStack | 2010 | Python, Kombu, SQLAlchemy | Linux, Windows, MAC OS | Otvoreni izvor | Sučelje naredbenog retka Grafičko korisničko sučelje |
| Mininet | 2011 | Python | Linux, Unix | Otvoreni izvor | Sučelje naredbenog retka |
| Riverbed Modeler | 1987 | C (C++) | Linux, Solaris, Windows | Komercijalna | Grafičko korisničko sučelje Sučelje naredbenog retka |
| QualNet | 2001. | Parsec C++ | Linux, DOS, Unix, MAC OS, Windows, Solaris | Komercijalna | Grafičko korisničko sučelje Sučelje naredbenog retka |
| J-Sim | 2001 | Java, Tcl | Windows, Linux, Matlab | Otvoreni izvor | Grafičko korisničko sučelje Sučelje naredbenog retka |

Izvor: [3] [15] [16] [17]

Na temelju analiziranih obilježja ovih simulatora moguće je ukazati na njihovu osnovnu svrhu ili namjenu o kojoj je već bilo riječi. U nastavku slijedi analiza provedenog istraživanja u svrhu razrade uloge mrežnih simulatora u funkciji informacijsko-komunikacijskih mreža. Istraživanjem se nastoje potkrijepiti prethodne konstatacije i tvrdnje autora korištenih izvora. Time ono daje poseban znanstveni doprinos predmetnoj problematici.

4. OPIS I METODOLOGIJA PROVEDENOG ISTRAŽIVANJA

Istraživanje koje je provedeno za potrebe ovoga rada zasniva se na analizi baza znanstvenih radova i istraživanja u svezi mrežnih simulatora. Riječ je o međunarodnim relevantnim znanstvenim i stručnim bazama podataka.

Istraživanje je provedeno od strane autora ovoga rada, tijekom lipnja 2019. godine. Uzorak se odnosi na četiri ključne baze znanstvenih i stručnih radova, a obuhvaćeno je razdoblje 2018.-2019. godine. Za potrebe istraživanja korištene su metoda analize i sinteze, te statistička metoda. Metodom deskripcije konkretizirani su zaključci autora.

4.1. INOZEMNE STUDIJE O MREŽNIM SIMULATORIMA

Inozemne znanstvene i stručne studije o mrežnim simulatorima sve su brojnije. One se posebice razvijaju tijekom proteklog desetljeća, a ovakvu praksu prate i hrvatski znanstvenici te stručnjaci iz ovoga područja. Rezultat ovoga trenda je obogaćenje znanja i prakse u području informacijsko-komunikacijske tehnologije i računalne znanosti.

U prethodnim poglavljima bilo je riječi o samom značenju mrežnih simulatora, njihovoj povezanosti s informacijsko-komunikacijskim tehnologijama, ali i o njihovu značaju te ulozi u poslovanju te životu općenito. Kako bi se što cjelovitije, a time i kvalitetnije obradila predmetna problematika rada, od presudnog značaja je, prethodne tvrdnje i hipoteze, potkrijepiti konkretnim dokazima. Oni proizlaze upravo iz poduzetog istraživanja, koje se odnosi na analizu adekvatnih baza istraživanja u svezi same problematike.

Kao što je i istaknuto, mrežni simulatori mogu se uspoređivati na temelju različitih karakteristika, kao što su raspon, navođenje čvorova i veza između čvorova te prometa između čvorova, protokola, grafičkih aplikacija, tekstualnih aplikacija i sličnoga. Pored toga, mrežni simulatori se također mogu uspoređivati prema značajkama kao što su podržan jezik, platforma, troškovi i licence, tip mrežne podrške, korisničko sučelje, iskorištenost CPU-a, korištenje memorije, vrijeme računanja, skalabilnost, API²⁰, interakcija s realnim vremenski sustav i ostalo.

²⁰ Aplikacijsko programsko sučelje.

Na osnovu navedenih elemenata, koji čine karakteristike ili obilježja mrežnih simulatora, različiti autori pristupaju identificiranju njihovih prednosti i nedostataka. Pri tome oni provode parcijalne ili integrirane analize mrežnih simulatora. Misli se na njihovo individualno istraživanje i detaljiziranje njihove namjene, te na usporednu analizu istih.

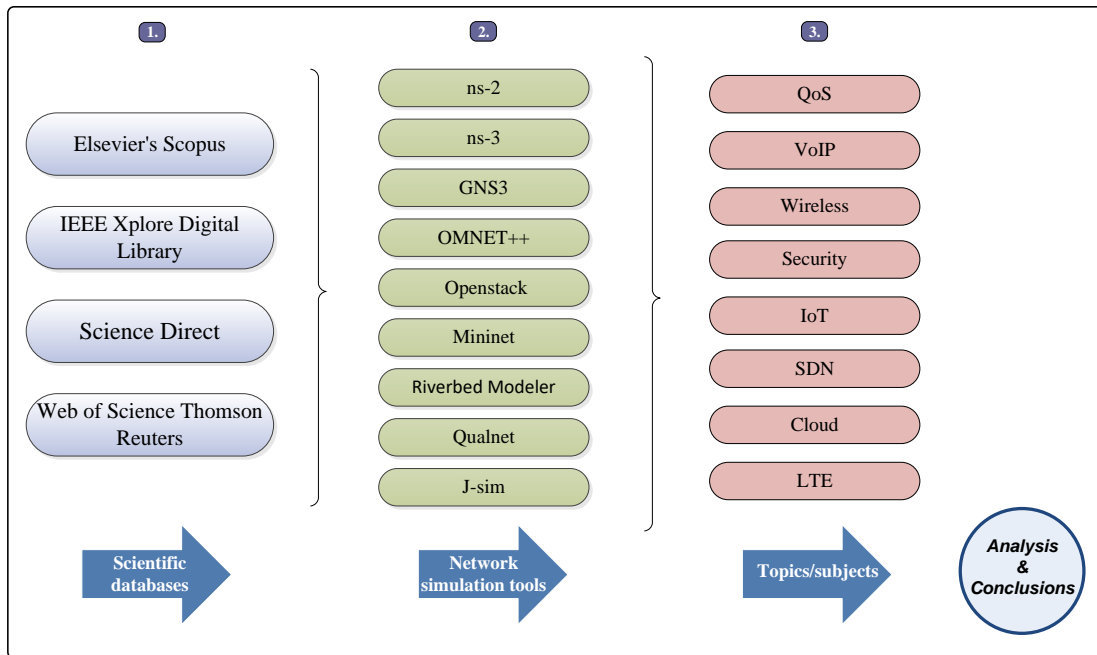
Uvidom u znanstvene baze podataka, o kojima slijedi nešto kasnije, moguće je zaključiti kako je danas dostupan velik broj studija koje koriste određeni mrežni simulator ili više njih kako bi analizirali i usporedili različite segmente u području informacijsko-komunikacijskih mreža. Na taj način se argumentirano istražuje značaj pojedinih mrežnih simulatora u informacijsko-komunikacijskim mrežama.

Proučavanjem znanstvenih osnova i provedbom predmetnog istraživanja, moguće je ukazati na osam ključnih polja koja su prepoznata kao značajno zastupljena u korištenim znanstvenim osnovama. Misli se na:

- QoS;
- VoIP;
- *Wireless*;
- *Security*;
- IoT;
- SDN;
- *Cloud computing* i
- LTE.

U procesu pretraživanja ovih radova, kao i obrade podataka te interpretacije dobivenih rezultata potrebno je uzeti u obzir preklapanje radova u vezi s korištenjem više ključnih riječi u istom znanstvenom radu. Analizirani elementi u okviru ovoga istraživanja prikazuju se u nastavku.

Slikom 12. predočava se opis poduzetog istraživanja u ovome radu.



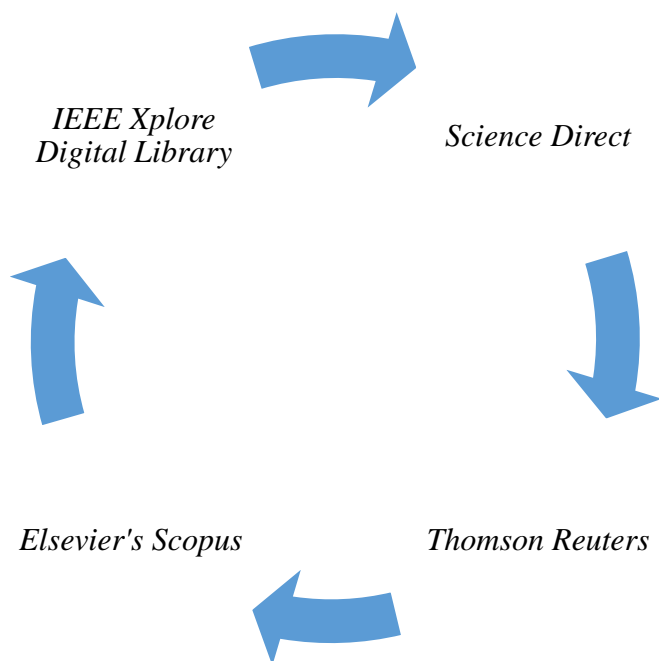
Slika 12. Opis provedenog istraživanja

Izvor: [2]

Vidljivo je kako je istraživanje provedeno nad bazama radova kao što su *Elsevier's Scopus*, *IEEE Xplore Digital Library*, *Science Direct* i *Web od Science Thomson Reuters*. Pri tome su istraženi prethodno analizirani mrežni simulatori. Misli se na *NS-2*, *NS-3*, *GNS-3*, *OMNET++*, *Openstack*, *Mininet*, *Riverbed Modeler*, *Qualnet* i *J-Sim*. Teme ili elementi koji su obuhvaćeni ovim istraživanjem prethodno su istaknuti i prikazani kao treća skupina značajki istraživanja na danoj slici.

4.2. ANALIZA KORIŠTENJA MREŽNIH SIMULATORA

Analizom dostupnih znanstvenih baza, koje su prethodno istaknute, utvrđen je broj znanstvenih radova koji koriste određene mrežne simulatore. Rezultati istraživanja prikazuju se grafički, individualno za svaku bazu podataka. U nastavku slijedi prikaz baza podataka koje su poslužile ovom istraživanju (slika 13.).

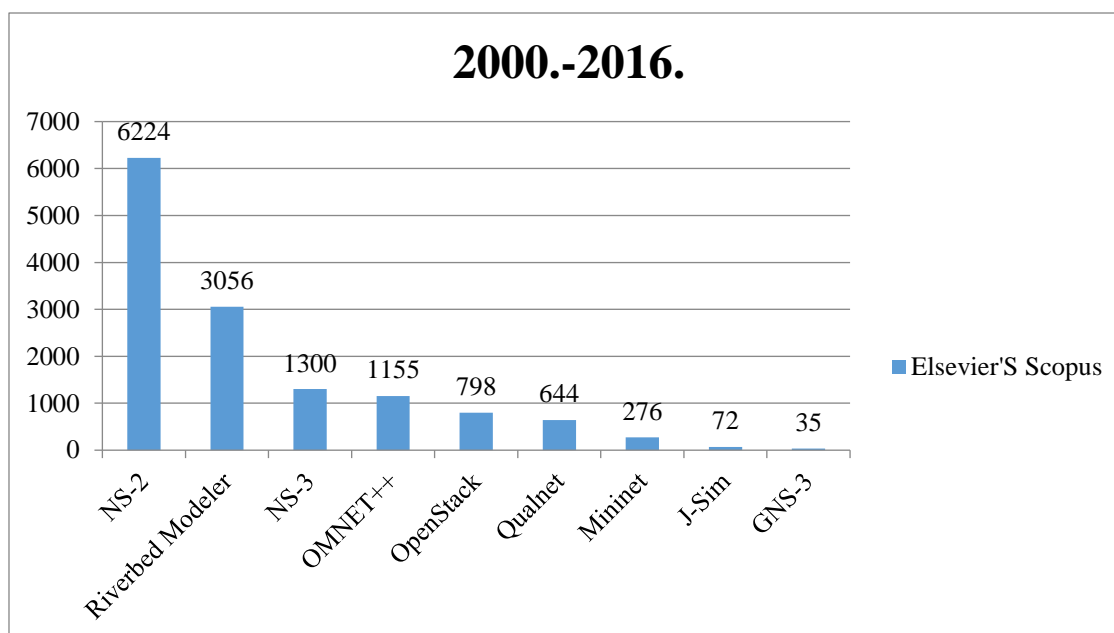


Slika 13. Baze podataka korištene za potrebe istraživanja primjene mrežnih simulatora

Kako bi se ukazalo na dinamičan razvoj predmetne problematike usporedno se daje prikaz sekundarnih rezultata istraživanja. Misli se na one za razdoblje od 2000. godine do 2016. godine, te analiza rezultata istraživanja autora rada, koja obuhvaća razdoblje od 2018. do 2019. godine (15. lipanj).

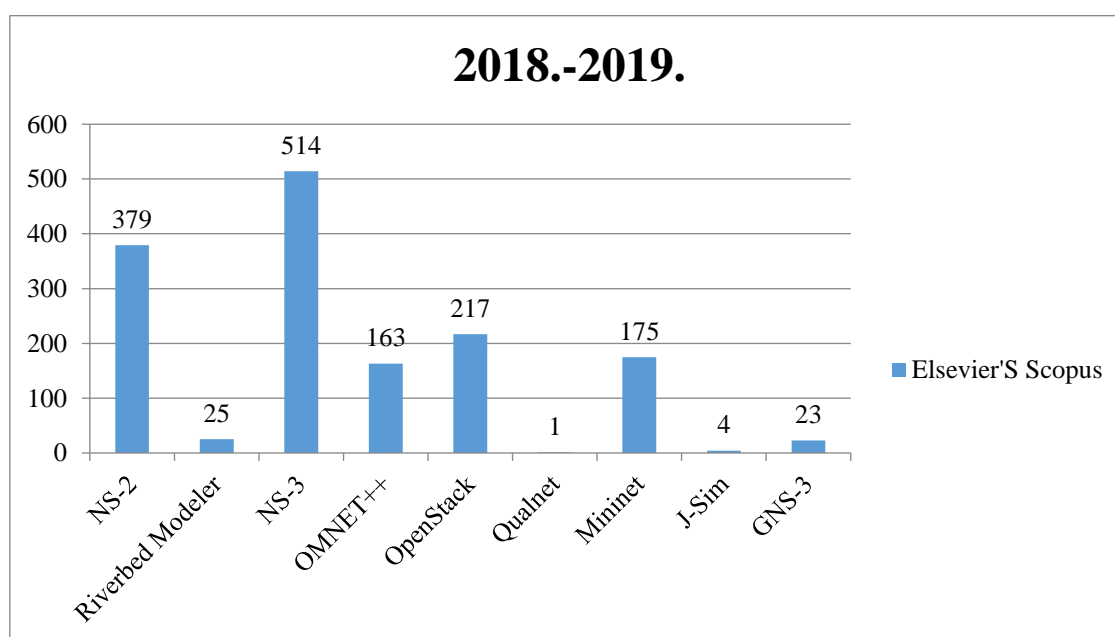
4.2.1. BAZA PODATAKA ELSEVIER'S SCOPUS

Ističe se kako u znanstvenoj bazi radova *Elsevier's Scopus*, od 2000. do 2016. godine simulator *NS-2* je prikazan u 6 224 znanstvenih radova, *Riverbed Modeler* u 3 056 radova i *NS-3* u 1 300 radova. Prikaz ovih podataka slijedi na slici 14.



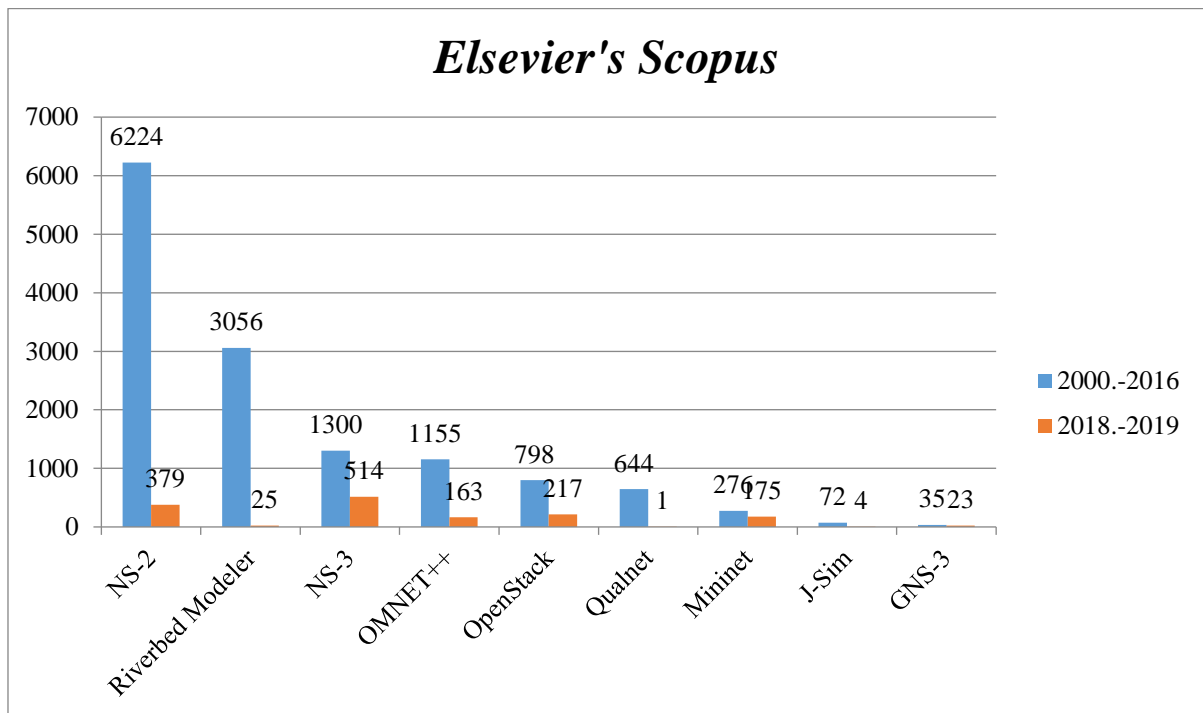
Slika 14. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Elsevier's Scopus (2000.-2016.)

Vidljivo je kako u ovoj bazi i promatranom razdoblju dominiraju *NS-2*, *Riverbed Modeler* i *NS-3*. Slijede *OMNET++*, *OpenStack*, *Qualnet*, *MININET* te *J-Sim* i *GNS-3*. U nastavku se daje prikaz broja radova u predmetnoj bazi za razdoblje 2018.-2019. godine (slika 15.).



Slika 15. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Elsevier's Scopus (2018.-2019.)

Komparativnom analizom ovih podataka s prethodno istaknutima daje se zaključiti kako je u ovome razdoblju zabilježeno značajno manje radova, no to se opravdava činjenicom da je u obzir uzeto i znatno kraće vremensko razdoblje. Ono što je zanimljivo istaknuti jest nešto drugačija struktura mrežnih simulatora s gledišta dominacije ili popularnosti u ovom radovima. Pri tome dominiraju *NS-3* i *NS-2*, a slijede *OpenStack*, *MININET* i *OMNET++*. Usporedni prikaz rezultata za oba razdoblja daje se u nastavku (slika 16.).

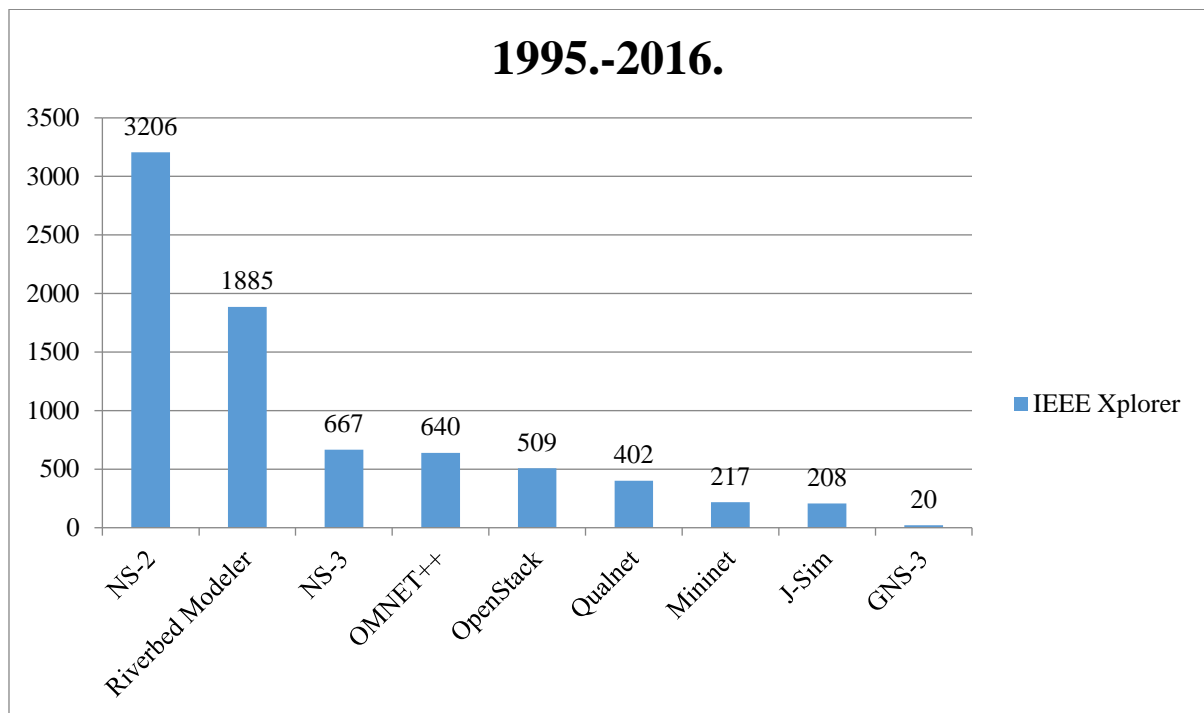


Slika 16. Komparativna analiza broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *Elsevier's Scopus* (2000.-2016.; 2018.-2019.)

Uzme li se u oba promatrana razdoblja godišnji prosjek radova za svaki od ovih mrežnih simulatora, daje se zaključiti kako neki od njih gube na značaju ili interesu istraživačkog kruga, dok neki napreduju u ovome kontekstu. Nazadovanje je evidentno na primjeru *Riverbed Modelera*, *Qualneta* i *J-Sima*. Napredak je evidentan na primjeru *NS-2*, *NS-3*, *OMNET++*, *OpenStacka*, *MININET* i *GNS-3*.

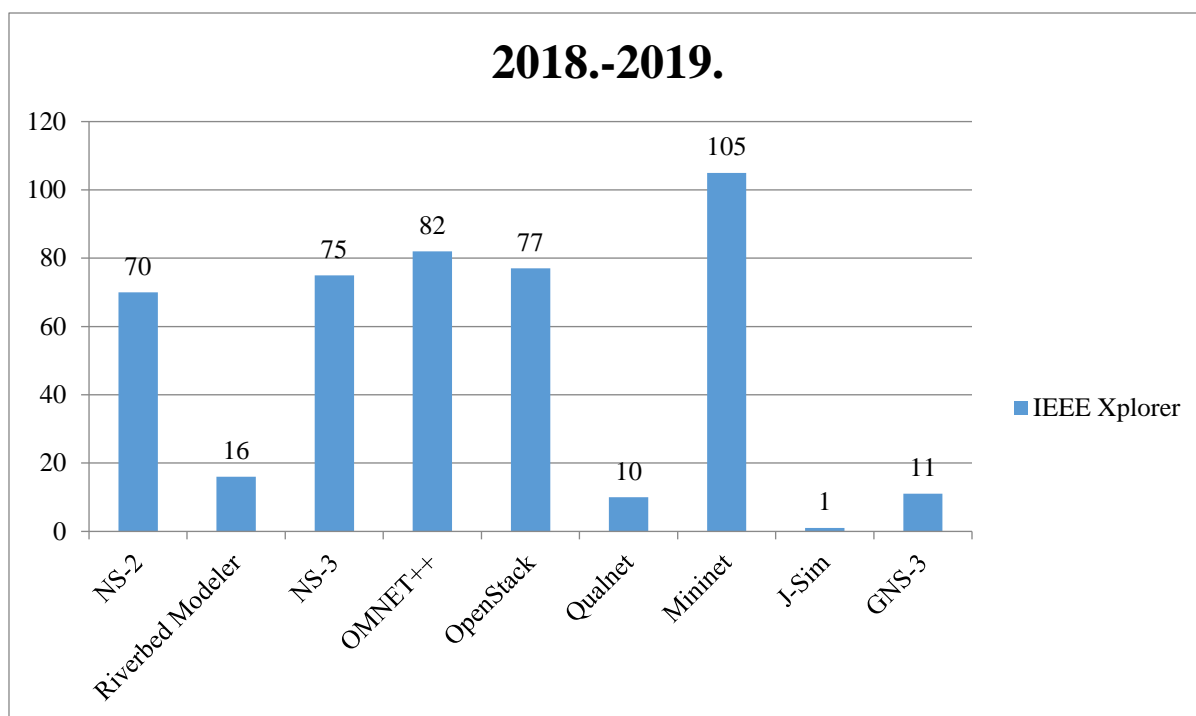
4.2.2. BAZA PODATAKA IEEE XLORER

Na podjednaki način u ovome dijelu poglavlja analizira se broj radova o mrežnim simulatorima u bazi *IEEE Xplorer*. Primarno se daje prikaz sekundarnih rezultata iz prethodnog razdoblja na slici 17.



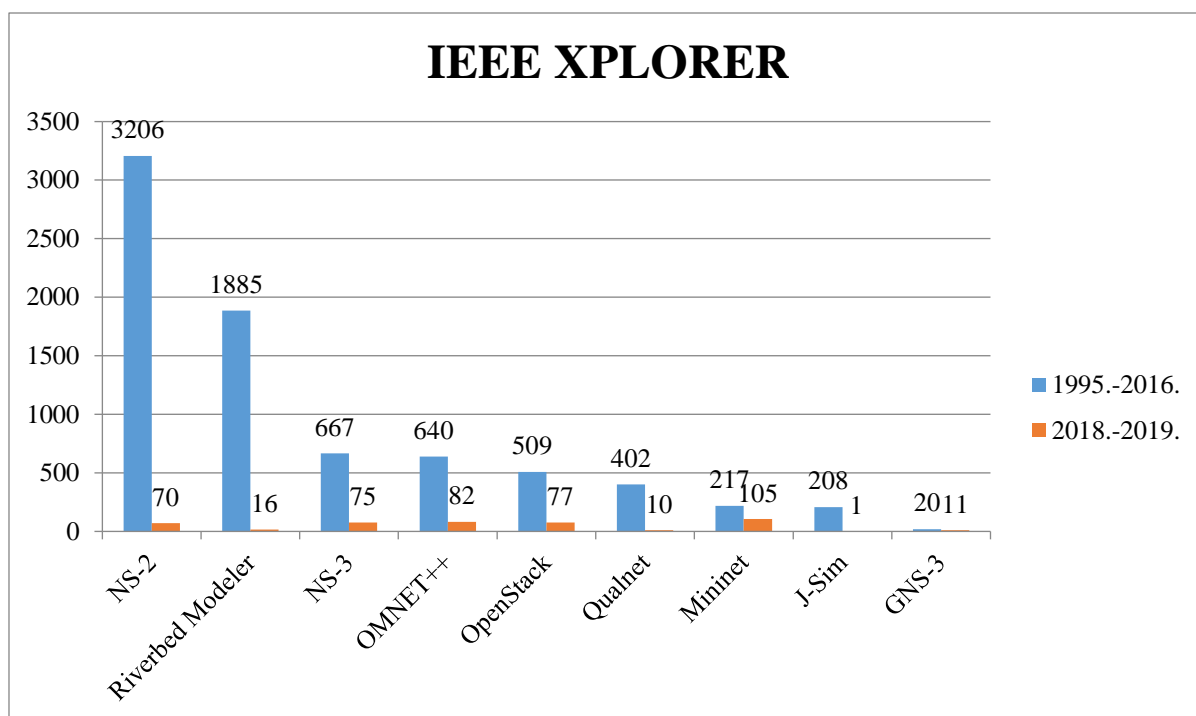
Slika 17. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *IEEE Xplorer* (1995.-2016.)

U ovoj bazi radova, u promatranom razdoblju, dominiraju *NS-2*, *Riverbed Modeler*, *NS-3* i redom dalje. Najmanje su zastupljeni *J-Sim* i *GNS-3*. Prema strukturi mrežnih simulatora, a u odnosu na njihovu zastupljenost ili popularnost, uočava se korespondentnost s prethodnom bazom, no uz znatno manji broj radova. U nastavku slijedi prikaz rezultata istraživanja autora rada (slika 18.).



Slika 18. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *IEEE Xplorer* (2018.-2019.)

U promatranom razdoblju dominira Mininet, a slijede *OMNET++*, *OpenStack*, *NS-3* i *NS-2*. Najmanje je zastupljen *J-Sim*. U nastavku slijedi komparativni prikaz rezultata dvaju promatranih razdoblja (slika 19.).

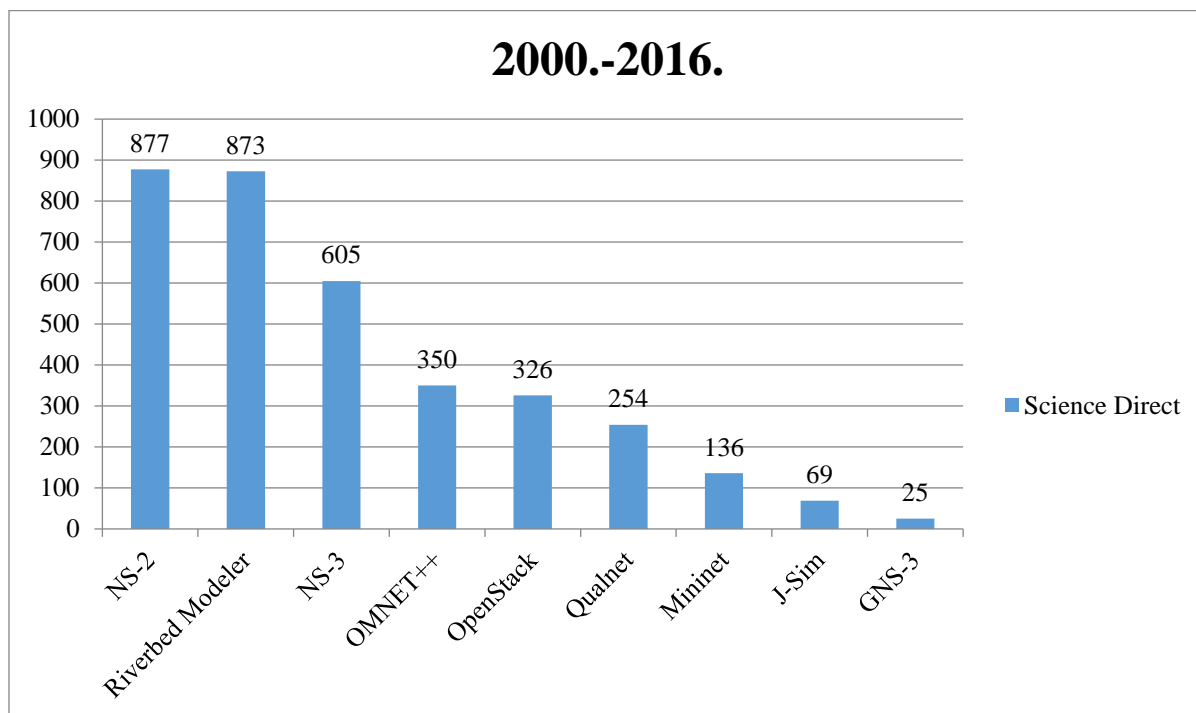


Slika 19. Komparativni prikaz broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *IEEE Xlorer* (1995.-2016.; 2018.-2019.)

Vidljivo je kako u promatranim razdobljima gotovo svi mrežni simulatori gube popularnost u kontekstu prosječnog broja radova na godišnjoj razini. Izuzetak je *GNS-3*.

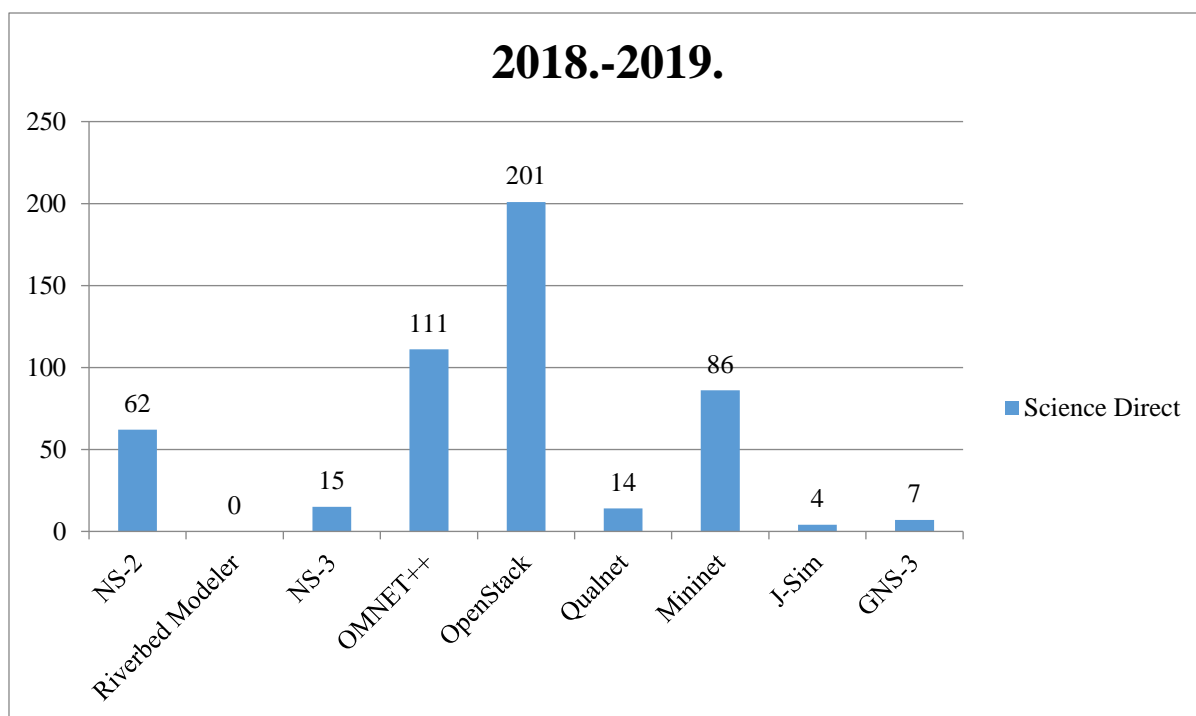
4.2.3. SCIENCE DIRECT

U nastavku se obrađuju podaci u svezi mrežnih simulatora, odnosno njihove zastupljenosti u bazi radova *Science Direct*. Primarno se daju podaci za razdoblje 2000.-2016. godine (slika 20.).



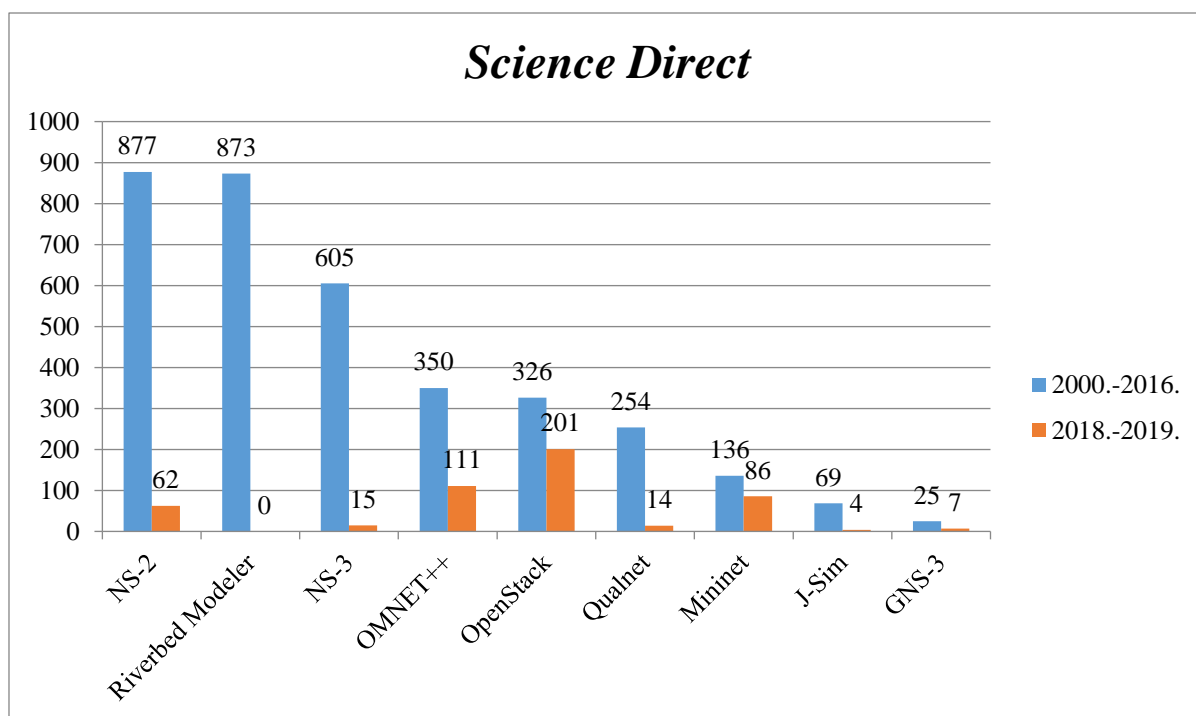
Slika 20. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *Science Direct* (2000.-2016.)

Popularnost pojedinih mrežnih simulatora ponovno odgovara strukturi u prethodnim bazama. Također, zabilježen je manji broj radova za sve simulatore zajedno, ali i pojedinačno. U nastavku slijedi prikaz rezultata za razdoblje 2018.-2019. godine (Slika 21.).



Slika 21. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *Science Direct* (2018.-2019.)

U odnosu na prethodno razdoblje zabilježena je znatno drugačija struktura mrežnih simulatora u radovima, točnije evidentne su ozbiljnije oscilacije u broju radova o korištenju mrežnih simulatora. U ovome razdoblju dominiraju *OpenStack*, *OMNET++* i *MININET*. *Riverbed Modeler* nije zastupljen u niti jednom radu, a nisko su rangirani i *J-Sim* te *GNS-3*. Komparativna analiza podataka slijedi u nastavku (slika 22.).

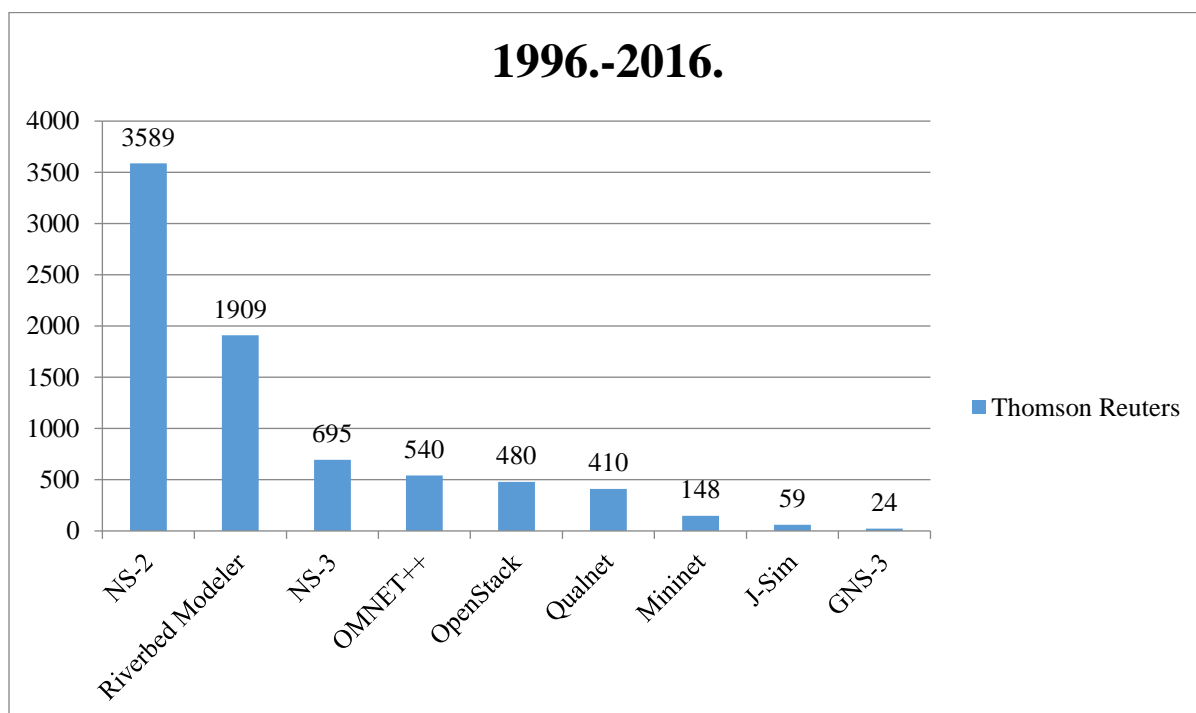


Slika 22. Komparativna analiza broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *Science Direct* (2000.-2016.; 2018.-2019.)

Komparativna analiza potvrđuje prethodnu tvrdnju u svezi zastupljenosti mrežnih simulatora u promatranim razdobljima. Napredak je vidljiv na primjeru onih simulatora koji dominiraju u razdoblju 2018.-2019. godine i koji su prethodno istaknuti, te obrnuto.

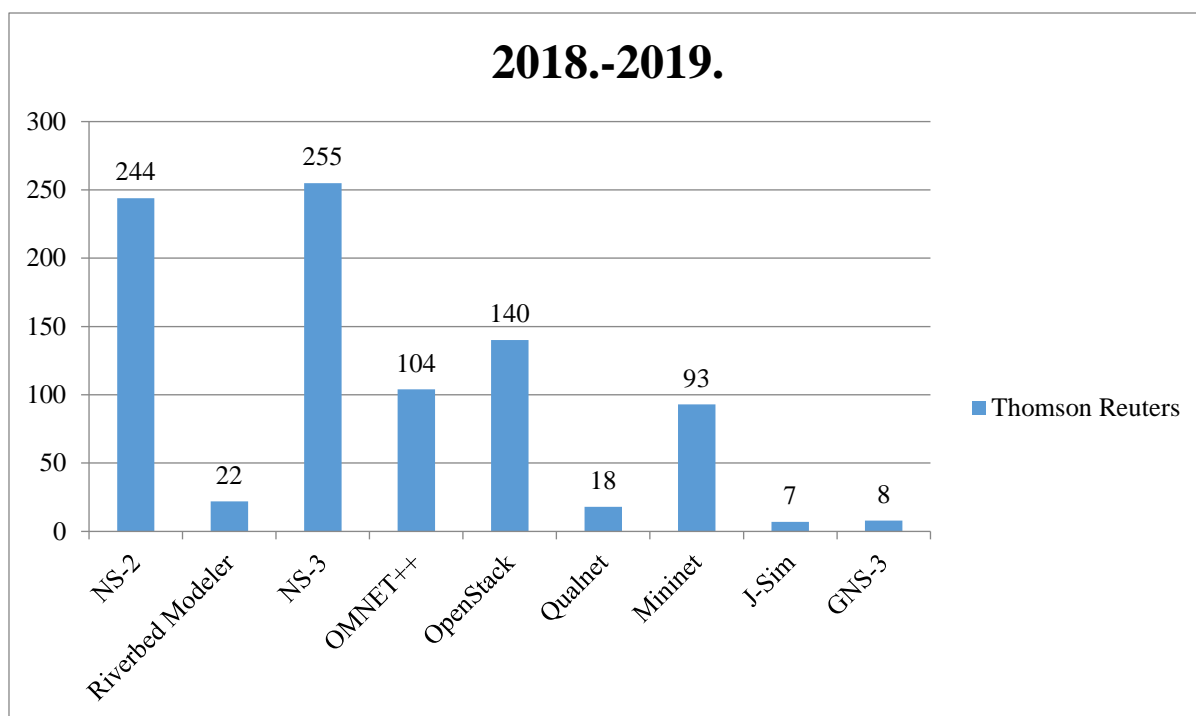
4.2.4. THOMSON REUTERS

Nakon analiziranih baza radova, daje se osvrt i na posljednju na popisu. Riječ je o bazi *Thomson Reuters*. Kao i na prethodnim primjerima, daje se prikaz podataka iz sekundarnih izvora, odnosno za razdoblje od 1995. do 2016. godine, te podaci provedenog istraživanja za potrebe ovoga rada, odnosno od 2018. do 2019. godine (slika 23.).



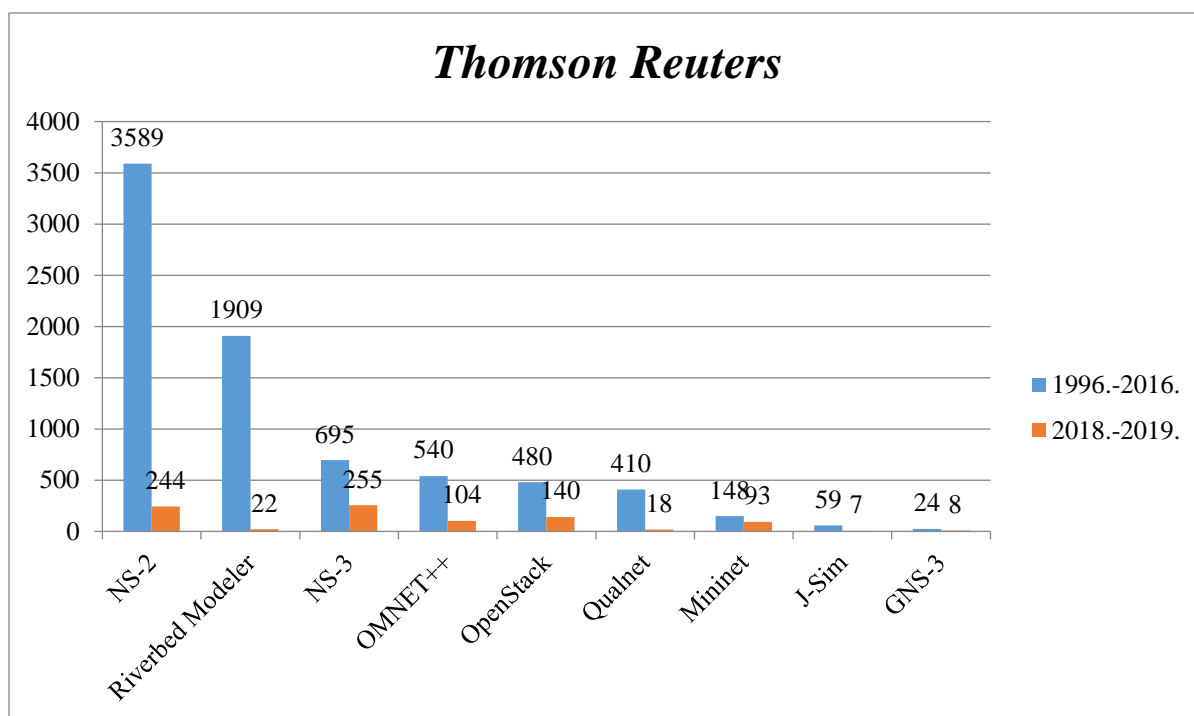
Slika 23. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Thomson Reuters (1996.-2016.)

U promatranom razdoblju ova baza podataka raspolaže većim brojem radova od baza *IEEE Xplorer* i *Science Direct*. Vidljiva je jednaka struktura mrežnih simulatora prema njihovoj zastupljenosti u broju radova o korištenju istih. Prikaz za naredno razdoblje slijedi u nastavku (slika 24.).



Slika 24. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Thomson Reuters (2018.-2019.)

U ovome razdoblju najveći broj radova zabilježen je na primjeru *NS-3* i *NS-2*. Najmanji broj radova bilježe *J-Sim* i *GNS-3*. Komparativna analiza rezultata za oba razdoblja slijedi u nastavku (slika 25.).



Slika 25. Komparativna analiza broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi *Thomson Reuters* (1996.-2016.; 2018.-2019.)

Kao i na prethodnim primjerima baza radova, ovim se podacima dodatno potvrđuju istaknuti rezultati i zaključci. Usporedbom istih daje se zaključiti kako se u predmetnoj bazi u promatranim razdobljima sve veća pažnja pridaje mrežnim simulatorima *NS-3*, *OpenStack*, *MININET* i *OMNET++*.

Provedenom analizom moguće je zaključiti kako jepodručje simulacija dobro istraženo u znanstvenoj literaturi. S obzirom na dobivene rezultate, potvrđuje se kako vodeći značaj među istraženim simulatorima pripada *NS-2* i *NS-3*.

5. RAZVOJ MREŽNIH SIMULATORA U FUNKCIJI INFORMACIJSKO-KOMUNIKACIJSKIH MREŽA

U okviru ovoga poglavlja konkretiziraju se sva prethodno istaknuta teorijska i praktična saznanja u svezi mrežnih simulatora. Posebna pažnja pri tome je usmjerena prema njihovoj ulozi i podršci u simulaciji mreža.

5.1. KOMPARATIVNA ANALIZA ZNAČAJA MREŽNIH SIMULATORA U SIMULIRANJU MREŽA

Nakon provedene analize prikupljenih podataka u svezi zastupljenosti mrežnih simulatora i razrade njihova korištenja u relevantnim bazama podataka, a za sva diferencirana razdoblja, daje se sintetizirani prikaz istih. Tablično se iskazuju podaci u svezi broja radova za svaki od mrežnih simulatora za oba razdoblja (Tablica 2.).

Tablica 2. Komparativni prikaz rezultata o broju radova za svaki mrežni simulator u relevantnim bazama podataka (1995.-2019.)

| Mrežni simulator/ razdoblje | Elsevier's Scopus | | IEEE Xplorer | | Science Direct | | Thomson Reuters | |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 2000.- 2016. | 2018.- 2019. | 1995.- 2016. | 2018.- 2019. | 2000.- 2016. | 2018.- 2019. | 1996.- 2016. | 2018.- 2019. |
| NS-2 | 6224 | 379 | 3206 | 70 | 877 | 62 | 3589 | 244 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>389</i> | <i>190</i> | <i>200</i> | <i>35</i> | <i>55</i> | <i>31</i> | <i>224</i> | <i>122</i> |
| Riverbed Modeler | 3056 | 25 | 1885 | 16 | 873 | 0 | 1909 | 22 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>191</i> | <i>12</i> | <i>118</i> | <i>8</i> | <i>55</i> | <i>0</i> | <i>119</i> | <i>11</i> |
| NS-3 | 1300 | 514 | 667 | 75 | 605 | 15 | 695 | 255 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>81</i> | <i>257</i> | <i>42</i> | <i>38</i> | <i>38</i> | <i>8</i> | <i>43</i> | <i>128</i> |
| OMNET++ | 1155 | 163 | 640 | 82 | 350 | 111 | 540 | 104 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>72</i> | <i>82</i> | <i>40</i> | <i>41</i> | <i>22</i> | <i>55</i> | <i>9</i> | <i>52</i> |
| OpenStack | 798 | 217 | 509 | 77 | 326 | 201 | 486 | 140 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>50</i> | <i>109</i> | <i>32</i> | <i>39</i> | <i>20</i> | <i>100</i> | <i>30</i> | <i>70</i> |
| Qualnet | 644 | 1 | 402 | 10 | 254 | 14 | 410 | 18 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>40</i> | <i>1</i> | <i>25</i> | <i>5</i> | <i>16</i> | <i>7</i> | <i>26</i> | <i>9</i> |
| Mininet | 276 | 175 | 217 | 105 | 136 | 86 | 148 | 93 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>17</i> | <i>88</i> | <i>14</i> | <i>52</i> | <i>9</i> | <i>43</i> | <i>9</i> | <i>47</i> |
| J-Sim | 72 | 4 | 208 | 1 | 69 | 4 | 59 | 7 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>5</i> | <i>2</i> | <i>13</i> | <i>1</i> | <i>4</i> | <i>2</i> | <i>4</i> | <i>4</i> |
| GNS-3 | 35 | 23 | 20 | 11 | 25 | 7 | 24 | 8 |
| <i>Prosjek godišnje</i> | <i>2</i> | <i>12</i> | <i>1</i> | <i>5</i> | <i>2</i> | <i>4</i> | <i>2</i> | <i>4</i> |

Izvor: Izrada autora.

U prvome razdoblju, u svim bazama dominiraju *NS-2*, *Riverbed Modeler*, *NS-3* i *OMNET++*. U drugome razdoblju, točnije u razdoblju 2018.-2019. godine situacija je nešto drugačija. Nastavno ukupnom broju radova, kao i godišnjem prosjeku, vidljivo je da dominiraju uglavnom *NS-3* i *NS-2*. Međutim, dok u nekim bazama dominiraju na primjer i *Riverbed Modeler* te *OMNET++*, u nekim dugima prednost imaju *OpenStack* i *MININET*. Generalno je moguće zaključiti kako dominaciju u proteklih dvije dekade drže *NS-2* i *NS-3*, kako je i opisano u proteklim poglavljima rada.

5.2. KRITIČKI OSVRT AUTORA

Na temelju provedene analize dostupne literature, kao i istraživanja u sveži zastupljenosti mrežnih simulatora u odabranim bazama radova, daje se zaključiti kako u današnjici, kao i tijekom protekla dva desetljeća dominiraju *NS-2* i *NS-3* mrežni simulatori. To ne implicira potpuno isključivanje ostalih simulatora, već ukazuje na njihovu popularnost na tržištu, a u kontekstu simulacije informacijsko-komunikacijskih mrežnih tehnologija.

Može se zaključiti kako je razlog tome prikladnost ovih simulatora aktualnim potrebama. Ona se zasniva na njihovim općim obilježjima ili karakteristikama, a koje naposljetku određuju namjenu i funkcionalnost ovih simulatora. Dominantni simulatori najčešće odgovaraju širim problemima mrežnih tehnologija i kvaliteti istih, dok primjerice *Riverbed Modeler* okrija potrebe bežičnih mreža, te slično.

Kao prijedlog budućih istraživanja smatra se prigodnim provesti učestalije komparativne analize mrežnih simulatora. Jednako tako smatra se korisnim predvidjeti i ponuditi koncept dodatnog simulatora koji će pokrivati više područja, optimizirajući pri tome rezultate i učinke bolje od postojećih.

6. ZAKLJUČAK

Postavljeni ciljevi i svrha predmetnog istraživanja uspješno su realizirani ovim radom. Kao što je navedeno i u početku ovoga istraživanja, ono je dalo sveobuhvatnu komparativnu analizu mrežnih simulatora te je utvrdilo sve prednosti i nedostatke istih u određenim područjima rada. Generirani zaključci potkrijepljeni su onima iz relevantnih znanstvenih baza. Misli se pri tome na *Elsevier's Scopus*, *IEEE Xplore Digital Library*, *Science Direct* i *Web of Science Thomson Reuters*.

Također, istraživanjem za potrebe diplomskog rada utvrđena je primjenjivost pojedinog analiziranog mrežnog simulatora prema samostalno definiranim tematskim skupinama (područjima odnosno ključnim riječima). Kako bi se utvrdila primjenjivost pojedinog mrežnog simulatora izvršena je i njihova komparativna analiza. Smatra se kako na ovaj način provedeno istraživanje može poslužiti kao podloga za izradu taksonomije mrežnih simulatora, odnosno jasne podijele i primjenjivosti mrežnih simulatora za različita područja istraživanja unutar informacijsko-komunikacijskih mreža i mrežnih tehnologija.

U današnje vrijeme mrežni simulatori su neizostavan alat pri istraživanju iz područja informacijsko-komunikacijskih mreža i mrežnih tehnologija. Oni omogućuju testiranje kompleksnih mreža i mrežnih uređaja, ali i validaciju podatkovnih veza uz provjeru određenih mrežnih protokola ili specifičnih algoritama.

Analizom znanstvenih baza utvrđeno je da je alat za simulaciju mreže *NS-2* najčešće korišteni alat za potrebe simulacije informacijsko-komunikacijskih mrežnih tehnologija. Osim njega treba navesti i *NS-3*, ali i *Riverbed Modeler* te *OMNET++*. Analizom alata za simulaciju mreže odabirom ključnih riječi iz područja informacijskih i komunikacijskih mrežnih tehnologija i dostupnih znanstvenih baza utvrđena je povezanost simulacijskog alata i područja istraživanja.

NS-2 je najčešće korišteni programski alat koji se odnosi na šire probleme bežičnih mreža i kvalitetu usluge. *Riverbed Modeler* najčešće se koristi za bežične mreže, dok je *OpenStack* povezan s *Cloud Computingom*, koji sve intenzivnije obilježava suvremeno poslovanje, ali i globalno društvo.

Planovi za buduća istraživanja odnose se na pojedinačne analize odabranih mrežnih simulatora, te na utvrđivanje razlika između rezultata bez ključnih riječi i s ključnim riječima. Prilikom proširenja istraživanja bilo bi korisno konzultirati i druge znanstvene baze radova i otvorene znanstvene izvore. Jednako tako, smatra se korisnim da se barem jednom godišnje izradi istraživanje slično ovom, kako bi se dobio pregledan prikaz korištenja mrežnih simulatora u funkciji informacijsko-komunikacijskih mreža.

LITERATURA

- [1] Siraj S, Kumar Gupta, A., Badgular, R.: Network Simulation Tools Survey, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2012, Jun; 1(4):2278-1021
- [2] Grgurević I., Vizner V., Miškulin I., Stjepanović K.: A survey of network simulation tools in the function of information and communications networks, ZIRP 2017, Zagreb, 2017.
- [3] Arvind T. A Comparative Study of Various Network Simulation Tools, International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET), 2016., 7(8):374-378;
- [4] <http://compalg.inf.elte.hu/~tony/Informatikai-Konyvtar/03-Algorithms%20of%20Informatics%201,%202,%203/Network29May.pdf> (15.06.2019.)
- [5] NS-2:https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4614-1406-3_2 (16.06.2019.)
- [6] NS-3:<https://www.geeksforgeeks.org/computer-network-network-simulator-3/> (16.06.2019.)
- [7] Welsh, C.: GNS-3 Network Simulation Guide, Packt Publishing, UK, 2013.
- [8] GNS-3:<https://business.udemy.com/blog/why-use-the-gNS-3-virtual-network-simulator/> (18.06.2019.)
- [9] Openstack: <https://www.openstack.org/software/> (18.06.2019.)
- [10] Openstack: <https://governance.openstack.org/tc/reference/technical-vision.html> (20.06.2019.)
- [11] Mininet: <http://mininet.org/> (20.06.2019.)
- [12] Riverbed Modeler: <https://www.wansolutionworks.com/Modeler.asp> (20.06.2019.)
- [13] QualNet Network Simulator: <https://www.scalable-networks.com/qualnet-network-simulation> (22.06.2019.)
- [14] J-Sim: https://www.researchgate.net/figure/GUI-of-J-Sim_fig7_332764053 (23.06.2019.)
- [15] J-Sim: <http://www.j-sim.org/> (23.06.2019.)
- [16] The ns-2 network simulator, official website: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (23.06.2019.)
- [17] The ns-3 network simulator, official website: <http://www.nsnam.org/> (23.06.2019.)
- [18] The GNS-3 official website: <https://www.gNS-3.com/> (23.06.2019.)
- [19] Omnet++: <https://omnetpp.org/> (23.6.2019.)

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Klasifikacija mrežnih simulatora | 6 |
| Slika 2. Prikaz grafičkog sučelja NS-2..... | 13 |
| Slika 3. Arhitektura NS-2..... | 14 |
| Slika 4. Prikaz grafičkog sučelja NS-3..... | 16 |
| Slika 5. Prikaz grafičkog sučelja GNS-3..... | 17 |
| Slika 6. Prikaz grafičkog sučelja OMNET++ | 19 |
| Slika 7. Način rada mrežnog simulatora OpenStack..... | 20 |
| Slika 8. Prikaz programskog alata Mininet | 21 |
| Slika 9. Riverbed Modeler | 23 |
| Slika 10. Grafički prikaz programskog alata Qualnet | 24 |
| Slika 11. Grafički prikaz programskog alata J-Sim | 26 |
| Slika 12. Opis provedenog istraživanja..... | 31 |
| Slika 13. Baze podataka korištene za potrebe istraživanja primjene mrežnih simulatora | 32 |
| Slika 14. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Elsevier's Scopus (2000.-2016.) | 33 |
| Slika 15. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Elsevier's Scopus (2018.-2019.) | 33 |
| Slika 16. Komparativna analiza broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Elsevier's Scopus (2000.-2016.; 2018.-2019.)..... | 34 |
| Slika 17. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi IEEE Xplorer (1995.-2016.) | 35 |
| Slika 18. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi IEEE Xplorer (2018.-2019.) | 36 |
| Slika 19. Komparativni prikaz broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi IEEE Xplorer (1995.-2016.; 2018.-2019.)..... | 37 |
| Slika 20. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Science Direct (2000.-2016.)..... | 38 |
| Slika 21. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Science Direct (2018.-2019.)..... | 39 |
| Slika 22. Komparativna analiza broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Science Direct (2000.-2016.; 2018.-2019.) | 40 |

| | |
|--|----|
| Slika 23. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Thomson Reuters (1996.-2016.)..... | 41 |
| Slika 24. Broj znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Thomson Reuters (2018.-2019.)..... | 42 |
| Slika 25. Komparativna analiza broja znanstvenih radova povezan s pojedinim mrežnim simulatorima u bazi Thomson Reuters (1996.-2016.; 2018.-2019.) | 43 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Komparativna analiza mrežnih simulatora..... | 28 |
| Tablica 2. Komparativni prikaz rezultata o broju radova za svaki mrežni simulator u relevantnim bazama podataka (1995.-2019.) | 45 |

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi. Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu diplomskog rada pod naslovom „Analiza značajki simulatora informacijsko-komunikacijskih mreža“, na mrežnim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 10. rujna 2019.

Student: _____

Vedran Tepavac