

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**



MILOŠ VUJOVIĆ

**M2M KOMUNIKACIONE TEHNOLOGIJE ZA POUZDANU I
EFIKASNU AUTOMATIZACIJU: ANALIZA, OPTIMIZACIJA
RESURSA I NAPREDNA ANALITIKA PODATAKA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Miloš Vujović

Datum i mjesto rođenja: 22.06.1998. godine, Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:

Studije Primijenjenog računarstva, 2020. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Primijenjeno računarstvo

Naslov rada: M2M komunikacione tehnologije za pouzdanu i efikasnu automatizaciju: analiza, optimizacija resursa i napredna analitika podataka

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 06.06.2022. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 19.10.2023. godine

Mentor: Prof. doc. dr Uglješa Urošević

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Zoran Veljović, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
2. Doc. dr Uglješa Urošević, Prirodno-matematički fakultet, Podgorica
3. Doc. dr Slavica Tomović, Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Zoran Veljović, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, predsjednik
2. Doc. dr Uglješa Urošević, Prirodno-matematički fakultet, Podgorica, mentor
3. Doc. dr Slavica Tomović, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, član

Datum odbrane: _____

Datum promocije: _____

Ime i prezime autora: Miloš Vujović, BApp

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

" M2M komunikacione tehnologije za pouzdanu i efikasnu automatizaciju: analiza, optimizacija resursa i napredna analitika podataka "

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,



Miloš Vujović, BApp

U Podgorici, dana 09.03.2025. godine

APSTRAKT

Istraživanje M2M (*machine-to-machine*) komunikacionih sistema otkrilo je ključne karakteristike i ograničenja ovih tehnologija, s ciljem unapređenja efikasnosti komunikacije između uređaja. Rezultati su potvrdili da implementacija odabranih M2M komunikacionih sistema može značajno smanjiti greške i prekide u komunikaciji, čime se značajno povećava pouzdanost cjelokupnog sistema. Karakteristike M2M sistema, kao što su brza razmjena informacija između uređaja, smanjenje kašnjenja, povećanje propusnosti i optimizacija protoka podataka, omogućavaju efikasniji rad mreža. Pored toga, primjena M2M tehnologije omogućava automatizaciju procesa između uređaja, čime se povećava produktivnost i optimizuje upotreba resursa, uključujući energiju i mrežne kapacitete. Ipak, istraživanje je pokazalo da i dalje postoje određena tehnička ograničenja koja ograničavaju potpunu implementaciju ovih sistema. Sigurnosni izazovi, pitanja skalabilnosti i troškovi implementacije ostaju ključna pitanja koja zahtijevaju dalje istraživanje i unapređenje. Posebna pažnja mora biti posvećena regulatornim i pravnim aspektima prilikom implementacije M2M sistema, kako bi se osigurale optimalne koristi. Uprkos ovim izazovima, istraživanje pokazuje da M2M sistemi nude značajne prednosti, uključujući povećanje efikasnosti operacija, smanjenje operativnih troškova i unapređenje usluga u različitim industrijskim sektorima.

Ključne riječi: *M2M komunikacija, efikasnost, automatizacija, pouzdanost, optimizacija*

ABSTRACT

Research on M2M (*machine-to-machine*) communication systems has revealed key characteristics and limitations, with the aim of improving the efficiency of communication between devices. The results confirmed that the implementation of selected M2M communication systems can significantly reduce errors and interruptions in communication, thus greatly enhancing the overall system reliability. The features of M2M systems, such as fast information exchange between devices, reduced latency, increased bandwidth, and optimized data flow, enable more efficient network operations. Additionally, the application of M2M technology facilitates process automation between devices, increasing productivity and optimizing the use of resources, including energy and network capacities. However, the research also identified certain technical limitations that constrain the full implementation of these systems. Security challenges, issues of scalability, and implementation costs remain key concerns that require further research and improvement. Special attention must be paid to regulatory and legal aspects during the implementation of M2M systems to ensure optimal benefits. Despite these challenges, the research shows that M2M systems offer significant advantages, including increased operational efficiency, reduced operational costs, and enhanced services across various industry sectors.

Keywords: *M2M communication, efficiency, automation, reliability, optimization*

POPIS SLIKA

Slika 1. Simulacija pouzdanosti u Industriji 4.0	20
Slika 2. Simulacija skalabilnosti u Industriji 4.0	22
Slika 3. Simulacija sigurnosti u Industriji 4.0	23
Slika 4. Simulacija kašnjenja u Industriji 4.0	25
Slika 5. Simulacija automatizacije u Industriji 4.0	26
Slika 6. Simulacija optimizacije resursa u Industriji 4.0	28
Slika 7. Simulacija napredne analitike u Industriji 4.0	29
Slika 8. Uspješni prenosi po uređaju za <i>Wi-Fi</i> i <i>Bluetooth</i>	31
Slika 9. Energetska potrošnja po uređaju za <i>Wi-Fi</i> i <i>Bluetooth</i>	31
Slika 10. Simulacija pouzdanosti u pametnim gradovima	33
Slika 11. Simulacija skalabilnosti u pametnim gradovima	35
Slika 12. Simulacija sigurnosti u pametnim gradovima	37
Slika 13. Simulacija kašnjenja u pametnim gradovima	39
Slika 14. Simulacija automatizacije u pametnim gradovima	41
Slika 15. Simulacija optimizacije resursa u pametnim gradovima	43
Slika 16. Simulacija napredne analitike u pametnim gradovima	45
Slika 17. Uspješni prenosi po čvoru u LPWAN simulaciji	47
Slika 18. Neuspješni prenosi po čvoru	47
Slika 19. Grafik primljenih snaga	48
Slika 20. Pozicije čvorova i <i>gateway</i> u mreži	48
Slika 21. Vrijeme odziva po čvoru	49
Slika 22. Energetska potrošnja po čvoru	49

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1 KARAKTERISTIKE M2M KOMUNIKACIONIH SISTEMA	7
1.1 Pouzdanost	7
1.2 Skalabilnost	7
1.3 Sigurnost.....	8
1.4 Kašnjenje.....	9
1.5 Automatizacija	11
1.6 Optimizacija resursa.....	11
1.7 Napredna analitika.....	12
2 ANALIZA KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA	14
2.1 <i>Cellular</i> komunikacija.....	14
2.2 LPWAN (<i>Low Power Wide Area Network</i>)	14
2.3 <i>Bluetooth</i> i <i>Wi-Fi</i> za M2M	15
2.4 Modeli i algoritmi za optimizaciju resursa.....	16
2.5 Sigurnost i privatnost u M2M komunikaciji	16
2.6 Budući razvoj tehnologije	17
3 ANALIZA PRIMJENA M2M KOMUNIKACIJE.....	18
3.1 Industrija 4.0.....	18
3.1.1 Simulacija pouzdanosti komunikacija u Industriji 4.0.....	19
3.1.2 Simulacija skalabilnosti komunikacija u Industriji 4.0.....	21
3.1.3 Simulacija sigurnosti u Industriji 4.0.....	23
3.1.4 Simulacija kašnjenja u Industriji 4.0.....	24
3.1.5 Simulacija automatizacije u Industriji 4.0	26
3.1.6 Simulacija optimizacije resursa u Industriji 4.0.....	27
3.1.7 Simulacija napredne analitike u Industriji 4.0	29
3.1.8 Simulacija <i>Bluetooth</i> i <i>WiFi</i> u Industriji 4.0	30
3.2 Pametni gradovi.....	32
3.2.1 Simulacija pouzdanosti komunikacija u pametnim gradovima	32
3.2.2 Simulacija skalabilnosti komunikacija u pametnim gradovima	34
3.2.3 Simulacija sigurnosti u pametnim gradovima.....	36
3.2.4 Simulacija kašnjenja u pametnim gradovima	38
3.2.5 Simulacija automatizacije u pametnim gradovima	40
3.2.6 Simulacija optimizacije resursa u pametnim gradovima	42

3.2.7	Simulacija napredne analitike u pametnim gradovima	44
3.2.8	Simulacija LPWAN (LoRaWAN) mreže u pametnim gradovima	46
3.3	Teorijska analiza kako karakteristike M2M sistema podržavaju različite primjene	50
4	IZAZOVI I RJEŠENJA U PRIMJENI M2M KOMUNIKACIJE	53
4.1	Izazovi interoperabilnosti	53
4.2	Izazovi u skaliranju	53
4.3	Sigurnosni izazovi	54
4.4	Izazovi u odnosu na kašnjenje	54
4.5	Izazovi koji se odnose na automatizaciju	55
4.6	Izazovi u vezi sa optimizacijom resursa	56
4.7	Izazovi u simulaciji <i>Bluetooth</i> i <i>Wi-Fi</i> u Industriji 4.0	56
4.8	Izazovi u simulaciji LPWAN (LoRaWAN) mreže u pametnim gradovima	57
5	ANALIZA BUDUĆEG RAZVOJA M2M KOMUNIKACIONIH SISTEMA U SVIJETLU CILJEVA	58
5.1	Uticaj 5G mreže na M2M komunikaciju	58
5.2	Uticaj <i>Edge Computing</i> na M2M komunikaciju	59
5.3	Uticaj AI na M2M komunikaciju	60
	ZAKLJUČAK	62
	LITERATURA	65

UVOD

M2M (u daljem tekstu: *machine to machine*) komunikacioni sistemi su ključni za IoT tehnologiju i omogućavaju automatizaciju procesa, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka. Ovi sistemi obezbjeđuju pouzdanu i efikasnu komunikaciju između uređaja, bez ljudske intervencije. Analiza karakteristika M2M komunikacionih sistema je neophodna da bi razumjeli kako se postiže pouzdana i efikasna komunikacija. Prioritet je proučavanje različitih komunikacionih protokola, tehnologija prenosa podataka (poput bežičnih mreža, LPWAN ili 5G) i rješenja za upravljanje mrežom. Automatizacija procesa je ključni cilj M2M komunikacionih sistema, pa su mogućnosti automatizacije važne da bi se postigla efikasnija i preciznija izvršavanja zadataka, smanjila ljudska intervencija i optimizovali resursi. Napredna analitika podataka takođe ima važnu ulogu u M2M komunikacionim sistemima. Velike količine podataka generisanih od strane uređaja mogu biti iskorišćene za dobijanje korisnih uvida, predviđanja i optimizaciju poslovnih procesa. Iz tog razloga, razumijevanje karakteristika izabranih M2M komunikacionih sistema i njihova praktična primjena je važna u obezbjeđivanju pouzdane i efikasne komunikacije između uređaja, automatizaciji procesa, optimizaciji resursa i naprednoj analitici podataka.

Predmet istraživanja je detaljna analiza specifičnih karakteristika M2M komunikacionih sistema i njihova ulogu u obezbjeđivanju pouzdane i efikasne komunikacije između uređaja, automatizovanih procesa, optimizacije resursa i napredne analitike podataka. Analiziraće se različite metode i tehnike za prikupljanje podataka iz uređaja, njihova obrada i prenos kroz M2M mrežu. Takođe, istražiće se kako se ovi procesi mogu optimizovati kako bi se poboljšala efikasnost i pouzdanost komunikacije. Istražiće se različiti sigurnosni mehanizmi i protokoli koji se koriste za zaštitu podataka i uređaja u M2M mrežama, kao i načini zaštite od neovlašćenog pristupa i zloupotrebe podataka. Proučiće se kako se M2M komunikacioni sistemi skaliraju da podrže veliki broj uređaja i kako se upravlja resursima poput propusnosti, vremena odziva i energetske potrošnje. Ovo će uključivati razmatranje tehnologija i pristupa poput *Edge Computing* (Edge računarstvo - Obrada podataka na ivici mreže) ili *Cloud Computing*-a. Istražiće se primjene automatizacije u M2M komunikacionim sistemima, poput industrijske automatizacije ili pametnih gradova. Analiziraće se kako karakteristike M2M sistema podržavaju automatizovane procese i optimizaciju resursa, kao i izazovi i prednosti koje automatizacija donosi. Na kraju, razmotriće se kako se napredne tehnike analitike podataka, poput mašinskog učenja, vještačke inteligencije (AI) i velikih platformi podataka, primjenjuju u M2M komunikacionim sistemima radi dobijanja korisnih uvida i unaprijeđenja poslovnih procesa.

Važnost motiva istraživanja karakteristika izabranih M2M komunikacionih sistema leži u mnogim faktorima. Pouzdana i efikasna komunikacija između uređaja omogućava brže i preciznije razmjene informacija, što rezultira poboljšanom efikasnošću i produktivnošću u različitim sektorima. To dovodi do smanjenja vremena i troškova u procesima kao što su industrijska proizvodnja, logistika, upravljanje saobraćajem i mnogi drugi. M2M komunikacioni sistemi omogućavaju automatizaciju procesa i smanjenje ljudske intervencije. Ovo je posebno korisno u složenim okruženjima gdje se mogu ostvariti autonomni sistemi za upravljanje, praćenje i dijagnostiku. Na primjer, u industrijskom sektoru, M2M komunikacija omogućava mašinama da komuniciraju i koordiniraju svoje aktivnosti kako bi postigli optimalne rezultate. M2M komunikacioni sistemi pružaju mogućnost optimizacije resursa kao što su energija, vrijeme, sirovine i infrastruktura. Prikupljanje podataka i analitika omogućavaju precizno praćenje i upravljanje resursima na osnovu stvarnih potreba i uslova. Na taj način se mogu smanjiti gubici, optimizovati potrošnja i poboljšati ukupna efikasnost sistema. M2M komunikacioni sistemi

generišu velike količine podataka između uređaja. Napredna analitika podataka omogućava otkrivanje korisnih informacija, trendova, uzoraka i anomalija u tim podacima. To dovodi do boljeg razumijevanja procesa, identifikacije problema, predviđanja kvarova i optimizacije performansi. Istraživanje karakteristika M2M komunikacionih sistema dovodi do razvoja novih inovativnih aplikacija i usluga. Primjena M2M tehnologija seže od industrije do domaćinstva, od zdravstvene zaštite do transporta, od poljoprivrede do pametnih gradova. Razumijevanje karakteristika ovih sistema omogućava stvaranje novih rješenja koja poboljšavaju našu svakodnevicu i poslovanje.

Cilj istraživanja karakteristika izabranih M2M komunikacionih sistema je postići pouzdanu i efikasnu komunikaciju između uređaja, koja omogućava automatizovane procese, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka. Ova pouzdana komunikacija između uređaja je ključna za tačnu i pravovremenu razmjenu informacija, što omogućava ispravno funkcionisanje automatizovanih procesa. Efikasna komunikacija između uređaja je takođe važna jer omogućava brzi prenos podataka i minimalizuje zagušenje mreže. To rezultira realnom vremenskom reakcijom i optimizacijom performansi sistema. Takođe doprinosi smanjenju potrošnje energije i boljoj iskorišćenosti raspoloživih resursa. Automatizovani procesi su osnova M2M komunikacionih sistema, jer omogućavaju izvršavanje zadataka i akcija bez potrebe za ljudskom intervencijom. Pouzdana i efikasna komunikacija između uređaja je ključna za uspješno izvršavanje ovih automatizovanih procesa, koji se mogu primijeniti u različitim sektorima, kao što su industrija, domaćinstva, zdravstvo i transport. Optimizacija resursa je još jedan važan aspekt M2M komunikacionih sistema. Kroz prikupljanje podataka i analitiku, ovi sistemi omogućavaju praćenje i upravljanje resursima poput energije, vremena, sirovina i infrastrukture. Optimizacija resursa dovodi do smanjenja gubitaka, efikasnije potrošnje i bolje iskorišćenosti dostupnih resursa. Napredna analitika podataka takođe igra ključnu ulogu u M2M komunikacionim sistemima. Analizom prikupljenih podataka mogu se identifikovati uzorci, trendovi, anomalije i korisne informacije. To omogućava bolje razumijevanje procesa, predviđanje kvarova, optimizaciju performansi i donošenje informisanih odluka.

M2M komunikacioni sistemi omogućavaju stabilnu i pouzdanu vezu između uređaja poput senzora, uređaja za mjerenje i kontrolera [1]. Koriste različite tehnologije za prenos podataka, kao što su bežične mreže (GSM, GPRS, 3G, 4G, 5G, 6G) [2] i žičane tehnologije poput Etherneta ili PLC-a [3]. Ovi sistemi su dizajnirani da održe vezu i pouzdan prenos podataka čak i u nepovoljnim uslovima ili velikom broju uređaja koji komuniciraju istovremeno [4]. Koriste efikasne metode kompresije podataka i retransmisiju kako bi osigurali integritet komunikacije [5]. Redundancija, automatsko ponovno povezivanje, mehanizmi upravljanja greškama i kontinuirano nadgledanje su neki od mehanizama koji osiguravaju pouzdanost M2M sistema [6].

M2M komunikacioni sistemi su skalabilni i mogu podržavati veliki broj povezanih uređaja [7]. Skalabilnost (prilagodljivost) je postignuta kroz različite faktore, uključujući protokole za mrežno upravljanje koji omogućavaju efikasno upravljanje i kontrolu uređaja na mreži [5]. Efikasni protokoli osiguravaju brzu i pouzdanu komunikaciju čak i sa velikim brojem uređaja, smanjujući propusni opseg i kašnjenje (eng. *latency*) [8]. Horizontalna skalabilnost omogućava dodavanje novih čvorova, servera ili mrežnih elemenata kako bi se povećao kapacitet sistema za podršku većem broju uređaja [5]. *Cloud* infrastruktura se često koristi za skladištenje i obradu podataka, pružajući fleksibilnost i skalabilnost putem lako dodavanja ili uklanjanja resursa prema potrebi [9].

Sigurna razmjena podataka je ključna karakteristika M2M komunikacionih sistema [10]. Oni koriste različite mehanizme kako bi obezbijedili sigurnost podataka [8]. Kriptografski

algoritmi se koriste za enkripciju podataka tokom komunikacije, čime se osigurava povjerljivost podataka [11]. Mehanizmi autentifikacije osiguravaju da samo ovlašćeni uređaji mogu pristupiti mreži i razmjenjivati podatke [12]. Kontrola pristupa se koristi kako bi se ograničio pristup određenim funkcionalnostima ili podacima [13]. Zaštita integriteta podataka se postiže kroz mehanizme koji provjeravaju da podaci nijesu promijenjeni tokom prenosa [11]. Sigurna mrežna arhitektura, koja uključuje segmentaciju mreže, *firewall*-ove, VPN ili druge mehanizme zaštite, koristi se kako bi se ograničio pristup i smanjio rizik od napada [14]. Svi ovi mehanizmi zajedno doprinose sigurnoj razmjeni podataka između uređaja u M2M komunikacionim sistemima [15].

Izabrani M2M komunikacioni sistemi su optimizovani za rad u uređajima s ograničenim izvorima energije, poput senzora i uređaja u teško dostupnim okruženjima [16]. Oni koriste tehnike i protokole koji minimiziraju potrošnju energije tokom komunikacije [17]. M2M komunikacioni sistemi primjenjuju optimizovane protokole prenosa koji smanjuju vrijeme aktivnosti radio interfejsa i šalju podatke u kratkim burstima kako bi se smanjila potrošnja energije [18]. Takođe, ovi sistemi koriste metode za upravljanje energijom, kao što su spavanje i buđenje uređaja u određenim intervalima, kako bi se smanjila potrošnja energije kada uređaj nije aktivan [5]. Optimizacija hardvera i softvera je takođe važna u energetske efikasnom radu M2M komunikacionih sistema [19]. Upotreba energetski efikasnih komponenti, minimalno korišćenje resursa i prilagođeni algoritmi su neki od pristupa koji se koriste kako bi se smanjila potrošnja energije i produžio vijek trajanja uređaja [11]. Sve ove tehnike i pristupi omogućavaju da M2M komunikacioni sistemi rade efikasno sa ograničenim izvorima energije, produžujući vijek trajanja baterije i održavajući kontinuiranu komunikaciju čak i u uslovima smanjenog napajanja [9].

U primjenama industrijske automatizacije i autonomnih vozila, minimalno kašnjenje u M2M komunikaciji je od ključnog značaja [20]. Brza razmjena podataka između uređaja omogućava realno-vremensku kontrolu i praćenje industrijskih procesa ili donošenje brzih odluka u autonomnim vozilima [21]. To pomaže održavanju optimalnih performansi, izbjegavanju grešaka i osiguranju sigurnosti [22]. M2M komunikacioni sistemi su optimizovani kroz protokole, hardver i softver kako bi se smanjilo vrijeme obrade, prenosa i odziva [22]. Takođe se koriste lokalne mreže ili *Edge* računarstvo kako bi se smanjila udaljenost i vrijeme putovanja podataka između uređaja [23].

Izabrani M2M komunikacioni sistemi zaista omogućavaju prikupljanje i analizu velike količine podataka generisanih od strane uređaja [3]. M2M tehnologija omogućava povezivanje i komunikaciju između različitih uređaja, senzora i drugih pametnih uređaja [19]. Ovi uređaji kontinuirano generišu podatke o svojim okruženjima, statusu, performansama i drugim relevantnim informacijama [24]. M2M komunikacioni sistemi omogućavaju prikupljanje ovih podataka putem različitih komunikacionih kanala, kao što su bežične mreže ili žičane tehnologije [25]. Nakon prikupljanja podataka, M2M komunikacioni sistemi pružaju mehanizme za analizu i obradu ovih podataka. To uključuje primjenu različitih algoritama, tehnika mašinskog učenja ili AI kako bi se izvukle korisne informacije iz velike količine podataka [1]. Prikupljeni podaci se mogu analizirati radi identifikacije trendova, otkrivanja anomalija, donošenja informisanih odluka ili optimizacije poslovnih procesa. Ove informacije mogu biti od velike važnosti za organizacije ili pojedince koji koriste M2M komunikacione sisteme u različitim industrijskim ili poslovnim kontekstima [9].

Glavna hipoteza u vezi s karakteristikama izabranih M2M komunikacionih sistema glasi:
Hipoteza H1: "Izbor M2M sistema sa određenim karakteristikama značajno utiče na pouzdanu i efikasnu komunikaciju, automatizaciju procesa, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka."

M2M komunikacija igra ključnu ulogu u savremenim tehnološkim ekosistemima, omogućavajući uređajima da komuniciraju i razmjenjuju podatke bez ljudske intervencije. Ova komunikacija je osnov za različite IoT aplikacije, automatizovane procese i analitiku podataka. M2M komunikacioni sistemi variraju po raznim karakteristikama kao što su brzina prenosa podataka, sigurnost, energetska efikasnost i skalabilnost. Ove karakteristike igraju ključnu ulogu u tome kako efikasno uređaji komuniciraju, koliko se resursi troše i koliko su podaci tačni. Pouzdanost M2M komunikacije je ključna za očuvanje kontinuiranog funkcionisanja sistema. Efikasna komunikacija omogućava brzu razmjenu informacija između uređaja, što je od suštinskog značaja za automatizaciju procesa i optimizaciju resursa. M2M komunikacija omogućava prikupljanje velike količine podataka, a karakteristike sistema igraju ulogu u kvalitetu ovih podataka. Precizni podaci omogućavaju naprednu analitiku, što je od suštinskog značaja za donošenje informisanih poslovnih odluka. Efikasna M2M komunikacija omogućava bolju kontrolu i upravljanje resursima, što dovodi do optimizacije troškova i poboljšanja efikasnosti poslovanja. Ova hipoteza naglašava važnost karakteristika M2M komunikacionih sistema u kontekstu pouzdanosti, efikasnosti, automatizacije procesa, optimizacije resursa i napredne analitike podataka, a istraživanje se fokusira na potvrdu ili opovrgavanje ovih veza kako bi se bolje razumjele ključne determinante uspješne M2M komunikacije.

U cilju dokazivanja glavne hipoteze, postavljaju se pomoćne hipoteze:

H1a: "Karakteristike M2M komunikacionih sistema, uključujući brzinu prenosa podataka, direktno utiču na vrijeme odziva sistema u IoT primjenama."

H1b: "Karakteristike M2M komunikacionih sistema, posebno sigurnosne funkcionalnosti, igraju ključnu ulogu u zaštiti podataka i uređaja u IoT mrežama."

H1c: "M2M komunikacioni sistemi sa boljom energetsom efikasnošću smanjuju potrošnju energije uređaja i doprinose produženju vijeka baterije u IoT uređajima."

H1d: "Sistemi koji su skalabilni i prilagodljivi različitim brojevima uređaja i obimima podataka omogućavaju efikasniju implementaciju IoT rješenja."

H1e: "Karakteristike M2M komunikacionih sistema imaju direktni uticaj na ukupne troškove implementacije i održavanja IoT infrastrukture."

Ove pomoćne hipoteze su usmjerene na pojedinačne karakteristike M2M komunikacionih sistema i njihov uticaj na različite aspekte IoT implementacije.

Kroz teoretsko-analitičku metodu, proučavane su karakteristike M2M komunikacionih sistema na osnovu teorijskih osnova i simulacionih modela. Analizirane su arhitekture, protokoli komunikacije, algoritmi za optimizaciju resursa i tehnike za naprednu analitiku podataka u M2M kontekstu. Istraživalo se kako ove karakteristike omogućavaju pouzdanu i efikasnu komunikaciju između uređaja, automatizovanih procesa i optimizacije resursa. Kroz teoretsko-analitički pristup, doneseni su zaključci o tome kako izabrani M2M komunikacioni sistemi funkcionišu na teorijskom nivou i kako te karakteristike doprinose pouzdanosti, efikasnosti i drugim aspektima komunikacije. Ovi zaključci bili su korisni za validaciju hipoteza i pružanje teoretskog doprinosa u oblasti M2M komunikacija. Simulacioni metodi su zatim primijenjeni nakon razvoja teorijskog osnova. Kroz ove metode, kreirane su simulacije sistema kako bi se ispitalo kako će se sistem ponašati u različitim uslovima ili pod različitim scenarijima. Simulacije su omogućile praktično eksperimentisanje bez stvarnog implementiranja sistema.

Očekivani rezultati istraživanja pokazuju da karakteristike izabranih M2M komunikacionih sistema zaista obezbjeđuju pouzdanu i efikasnu komunikaciju između uređaja, omogućavajući automatizovane procese, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka. Istraživanje će pokazati da implementacija izabranih M2M komunikacionih sistema rezultira

smanjenjem grešaka i prekida u komunikaciji između uređaja. To dalje se odnosi na veću pouzdanost sistema u obavljanju njegovih funkcionalnosti. Očekuje se da karakteristike M2M komunikacionih sistema omoguće brzu i efikasnu razmjenu informacija između uređaja. Rezultati istraživanja ukazuju na smanjenje kašnjenja, povećanje propusnosti i optimizaciju protoka podataka, što bi poboljšalo efikasnost komunikacije. Istraživanje dalje potvrđuje da izabrani M2M komunikacioni sistemi omogućavaju automatizaciju procesa između uređaja. To bi značilo da se određene radnje i funkcionalnosti mogu izvršavati automatski, bez potrebe za ručnim intervencijama, što bi rezultiralo većom efikasnošću i produktivnošću. Očekuje se da karakteristike M2M komunikacionih sistema omoguće optimizaciju upotrebe resursa kao što su energija, vrijeme, prostor ili mrežni kapaciteti. Istraživanje pokazuje da se primjenom ovih sistema postiže efikasnija i ekonomičnija upotreba resursa. Očekuje se da izabrani M2M komunikacioni sistemi omoguće prikupljanje velike količine podataka i njihovu naprednu analitiku. Rezultati istraživanja bi mogli pokazati da se uz pomoć ovih sistema mogu izvlačiti vrijedne informacije i donositi informisane odluke na osnovu analize podataka. Ukratko, primjena ove hipoteze bi značila implementaciju M2M komunikacionih sistema u određenom kontekstu, kao što su industrijski sektor, pametni gradovi, zdravstveni sektor ili druge oblasti gdje je potrebna komunikacija i razmjena podataka između uređaja. Primjena karakteristika izabranih M2M komunikacionih sistema bi značila implementaciju M2M komunikacionih sistema u određenom kontekstu, kao što su industrijski sektor, pametni gradovi, zdravstveni sektor ili druge oblasti gdje je potrebna komunikacija i razmjena podataka između uređaja.

Istraživanje daje validaciju teorijskih koncepta vezanih za M2M komunikacione sisteme. M2M komunikacija omogućava pouzdanu i efikasnu razmjenu podataka, automatizaciju procesa, optimizaciju resursa i naprednu analitiku. Identifikacija prednosti i izazova u primjeni ovih sistema može pružiti smjernice za buduća istraživanja i praksu. Takođe, istraživanje može doprinijeti razvoju novih metoda, modela ili algoritama za optimizaciju M2M komunikacionih sistema. Ovo može uključivati inovativne pristupe za analizu podataka, predviđanje performansi i optimizaciju resursa, što predstavlja naučni doprinos u oblasti M2M komunikacija. Primjena rezultata istraživanja u konkretnim oblastima kao što su industrija, energetika, saobraćaj ili zdravstvo može donijeti koristi poput povećanja efikasnosti, smanjenja troškova ili unaprijeđenja usluga. Validacija izabranih M2M komunikacionih sistema u ovim oblastima pruža praktične primjene i koristi za stvarno okruženje.

Rad je organizovan kako slijedi.

U uvodu ćemo predstaviti M2M komunikaciju, istaći njenu važnost u savremenim tehnologijama, i naglasiti ciljeve i svrhu istraživanja, uključujući hipotezu i očekivani doprinos.

U drugom poglavlju će se pružiti osnovna teorijska podloga za razumijevanje M2M. Daće se opis osnovnih principa M2M komunikacije i njenog značaja u kontekstu automatizacije i optimizacije resursa, razmatranje teorijskih modela M2M komunikacionih sistema, te pregled teorijskih tehnika i alati koje se primjenjuju u M2M komunikaciji za podršku automatizaciji i optimizaciji resursa

Treće poglavlje fokusira se na karakteristike M2M komunikacionih sistema poput pouzdanosti, skalabilnosti, sigurnosti i kašnjenja, te na razmatranja o tome kako odabrane karakteristike M2M sistema podržavaju automatizaciju, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka.

Četvrto poglavlje će se baviti teorijskim aspektima različitih komunikacionih tehnologija (npr. *cellular*, LPWAN, *Bluetooth*, *Wi-Fi*), te će se dati pregled modela i algoritama za optimizaciju resursa u M2M kontekstu.

U petom poglavlju će se izučiti modeli i okviri za konkretnu primjenu M2M komunikacije u cilju automatizacije, optimizacije resursa i napredne analitike podataka, kao što su Industrija 4.0, pametni gradovi, zdravstvo, itd. Takođe, izniće se razmatranja o tome kako karakteristike M2M sistema teorijski podržavaju ove primjene.

Šesto poglavlje će se baviti izazovima koji se mogu javiti pri postizanju ciljeva istraživanja i rješenjima za prevazilaženje tih izazova. Analizaće se izazovi kao što su interoperabilnost, skaliranje, sigurnost i kašnjenje, i koncepti za prevazilaženje ovih izazova u M2M komunikacijama. Razmatraće se koncepti za prevazilaženje izazova i poboljšanje pouzdanosti i efikasnosti komunikacije između uređaja, automatizacije procesa i optimizacije resursa.

Sedmo poglavlje će se baviti razmatranjima budućih trendova i inovacija u M2M komunikacijama, kao što su 5G, *Edge Computing*, AI, i kako će ovi trendovi teorijski uticati na M2M komunikaciju.

U zaključku, sumiraće se glavni zaključci i saznanja o tome kako karakteristike M2M komunikacionih sistema doprinose postizanju ciljeva istraživanja, čime će se potvrditi ili opovrgnuti hipoteza rada. Takođe, izraziće se teorijski doprinos rada u oblasti M2M komunikacija.

1 KARAKTERISTIKE M2M KOMUNIKACIONIH SISTEMA

Ovo poglavlje fokusira se na karakteristike M2M komunikacionih sistema poput pouzdanosti, skalabilnosti, sigurnosti i kašnjenja, te na razmatranja o tome kako odabrane karakteristike M2M sistema podržavaju automatizaciju, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka.

1.1 Pouzdanost

Pouzdanost je jedna od ključnih karakteristika M2M komunikacionih sistema, a naročito je od suštinskog značaja zbog činjenice da ovi sistemi često podržavaju kritične poslovne procese. U slučaju kvarova ili gubitka komunikacije, posljedice mogu biti ozbiljne, kako finansijski, tako i u pogledu sigurnosti i efikasnosti poslovanja. U ovom poglavlju, istražićemo tehnike i strategije koje se primjenjuju kako bi se postigao visok nivo pouzdanosti u M2M komunikacijama.

M2M sistemi igraju ključnu ulogu u podršci kritičnim poslovnim procesima, što uključuje praćenje i upravljanje infrastrukturom kao što su energetske i transportni sistemi, sigurnosni i zdravstveni sistemi, kao i proizvodnja i distribucija robe. Svako ometanje ili prekid komunikacije u ovim sistemima može imati ozbiljne posljedice po sigurnost, produktivnost i ekonomsku stabilnost. Na primjer, u elektroenergetskim mrežama, gubitak komunikacije može dovesti do velikih ekonomskih gubitaka. Prema Američkom nacionalnom centru za pouzdanost elektroenergetskih sistema (NERC), takvi incidenti mogu rezultirati prosječnim gubitkom od 5.000 megavata električne energije, što ugrožava energetske sigurnost i dovodi do ogromnih ekonomskih gubitaka. Ovo pokazuje koliko je pouzdanost komunikacionih sistema kritična za stabilno funkcionisanje ključnih poslovnih procesa i infrastrukture [26].

Neprekidan i pouzdan pristup podacima je od suštinske važnosti za poslovne organizacije i korisnike koji se oslanjaju na M2M komunikacije. U ovim sistemima, podaci se često razmjenjuju između uređaja bez ljudske intervencije, što znači da se komunikacija mora odvijati bez prekida. Bilo kakav gubitak komunikacije može uzrokovati gubitak podataka i poremetiti rad sistema. U oblasti logistike, na primjer, neprekidna komunikacija je ključna za optimizaciju transporta i precizno praćenje robe. Prema istraživanju, implementacija M2M rješenja za praćenje i upravljanje vozilima može smanjiti troškove prevoza za 10-20%. Ovo pokazuje koliko je važno osigurati kontinuiran pristup podacima kako bi se održala efikasnost i produktivnost poslovnih operacija [1].

Pouzdanost u M2M komunikacijama direktno utiče na efikasnost i produktivnost u različitim industrijskim sektorima. U industrijskim okruženjima, pouzdane komunikacije omogućavaju kontinuirano praćenje stanja mašina, dijagnostiku i daljinsko upravljanje. Ovi sistemi mogu automatski detektovati i prijaviti probleme, čime se smanjuje vrijeme zastoja i optimizuju radni procesi. Na primjer, kvarovi u industrijskim sistemima mogu koštati kompanije do 260.000 dolara po satu prekida rada, prema podacima kompanije VDC Research. Implementacija pouzdanih M2M sistema za praćenje i dijagnostiku može značajno smanjiti rizik od takvih kvarova i smanjiti troškove održavanja. U logističkim aplikacijama, pouzdanost komunikacija omogućava tačno praćenje robe i transporta, što dovodi do povećane efikasnosti i smanjenih operativnih troškova. Sve ovo pokazuje koliko je pouzdanost bitna za održavanje visoke efikasnosti i produktivnosti poslovnih operacija [2].

1.2 Skalabilnost

Sa rastućim brojem uređaja i podataka u M2M mrežama, skalabilnost je ključna karakteristika. Razmotrićemo kako M2M sistemi omogućavaju laku horizontalnu i vertikalnu skalabilnost kako bi se nosili sa sve većim opterećenjem i potrebama za proširenjem.

Skalabilnost u M2M komunikacijama je ključna za povećanje kapaciteta sistema kako bi se podržao rastući broj uređaja. U industrijama kao što su IoT i pametne mreže, broj uređaja se brzo povećava, što zahtijeva fleksibilnost sistema za prilagođavanje novim opterećenjima. Mogućnost skaliranja omogućava M2M sistemima da efikasno upravljaju većim brojem povezanih uređaja bez ugrožavanja performansi ili stabilnosti. To je od suštinskog značaja za održavanje konkurentске prednosti na tržištu i zadovoljavanje potreba korisnika. Na primjer, u pametnim gradovima, skalabilni M2M sistemi mogu se prilagoditi povećanom broju senzora i uređaja, čime se osigurava neprekidno i efikasno upravljanje gradskom infrastrukturom [4].

Efikasnost je ključna prednost skalabilnih M2M komunikacionih sistema. Skalabilni sistemi su dizajnirani da optimizuju korišćenje resursa, uključujući mrežni propusni opseg, računске kapacitete i energetske resurse. To rezultira smanjenjem nepotrebnih gubitaka i boljom upotrebom postojećih resursa. Skalabilni M2M sistemi omogućavaju pametno upravljanje i raspodjelu resursa, čime se izbjegava zagušenje mreže. Ovo je posebno važno u okruženjima sa velikim brojem uređaja koji istovremeno šalju podatke, kao što je IoT. Efikasnija upotreba resursa dovodi do smanjenja operativnih troškova, što je značajno za kompanije koje koriste M2M komunikacije za praćenje i upravljanje svojim resursima i aktivnostima. Na primjer, u kontekstu pametnih energetskih mreža, efikasno upravljanje resursima može smanjiti gubitke u prenosu energije, što rezultira uštedama od 5% do 15% u zavisnosti od specifičnih okolnosti [27].

Prilagodljivost je ključna karakteristika M2M komunikacionih sistema koja omogućava brzu i fleksibilnu reakciju na promjenljive potrebe i zahtjeve tržišta. M2M sistemi se koriste u različitim sektorima, a njihove potrebe mogu brzo mijenjati zbog faktora kao što su promjenljivi tržišni uslovi, tehnološki napredak ili zakonski zahtjevi. Prilagodljivost omogućava sistemima da brzo reaguju na ove promjene, što organizacijama daje konkurentsku prednost. Kada se M2M sistemi lako prilagođavaju novim uslovima, to može značajno smanjiti troškove promjene i implementacije novih funkcionalnosti, što je važno u situacijama gdje su promjene česte. Prilagodljivi sistemi mogu bolje iskoristiti resurse, poput komunikacionih kanala, procesorske snage i skladišnih kapaciteta, čime se postiže efikasnija upotreba resursa. Brza reakcija na potrebe korisnika i poboljšanje usluga može povećati zadovoljstvo korisnika, što je ključno za održavanje i širenje korisničke baze. Na primjer, u pametnim gradovima, prilagodljivi M2M sistemi omogućavaju brzo prilagođavanje infrastrukture u slučaju vremenskih nepogoda ili posebnih događaja, čime se osigurava kontinuirano i efikasno funkcionisanje grada [16].

1.3 Sigurnost

Zaštita osjetljivih podataka u M2M komunikacijama je ključna zbog prirode informacija koje se razmjenjuju. Osjetljivi podaci uključuju zdravstvene informacije pacijenata, energetske potrošnje u pametnim mrežama, informacije o lokaciji vozila i finansijske podatke u bezgotovinskim transakcijama. Na primjer, u medicinskim uređajima kao što su peacemaker-i ili uređaji za praćenje vitalnih znakova, kontinuirano se razmjenjuju osjetljivi zdravstveni podaci pacijenata. Zaštita ovih podataka je neophodna kako bi se osigurala privatnost i sigurnost pacijenata. Slično, pametne mreže koriste podatke o energetske potrošnji za optimizaciju distribucije električne energije, pa je zaštita tih podataka ključna za sprječavanje neovlašćenog pristupa i potencijalnih sigurnosnih rizika. U sistemima za praćenje vozila, informacije o lokaciji i stanju vozila su kritične za tačno praćenje i efikasno upravljanje flotom. Bezbjednost ovih podataka je ključna za zaštitu od krađe i zloupotrebe informacija. M2M sistemi koriste enkripciju, autentifikaciju uređaja i pristupne kontrole kako bi osigurali privatnost i integritet osjetljivih podataka u različitim aplikacijama.

Sigurnost identiteta uređaja je ključna u M2M komunikacijama jer omogućava precizno praćenje i upravljanje uređajima u mreži. Svaki uređaj ima svoj jedinstveni identitet, što sprječava lažiranje ili zloupotrebu uređaja u mreži. Ovaj identitet se obično uspostavlja putem sigurnosnih sertifikata ili ključeva, koji osiguravaju da samo ovlašćeni uređaji mogu komunicirati unutar M2M mreže. Kada uređaj šalje ili prima podatke, njegov identitet se verificuje kako bi se utvrdilo da je uređaj zaista onaj za koji se predstavlja. Ova sigurnost identiteta uređaja je kritična u mnogim M2M aplikacijama, kao što su pametne mreže, sistemi za praćenje vozila, medicinski uređaji i drugi. Bez pouzdane sigurnosti identiteta, postoji rizik od neovlašćenog pristupa i potencijalnih napada na mrežu, što može dovesti do ozbiljnih sigurnosnih i operativnih problema. Sigurnost identiteta uređaja se postiže korišćenjem jakih kriptografskih metoda, digitalnih sertifikata i višefaktorske autentifikacije, što omogućava pouzdanu i sigurnu komunikaciju između uređaja [28].

Integritet komunikacije je kritičan aspekt sigurnosti u M2M komunikacijama jer osigurava da podaci ostanu nepromijenjeni i ne budu narušeni tokom prenosa. Očuvanje integriteta komunikacije je od suštinskog značaja jer garantuje tačnost i pouzdanost podataka razmijenjenih između uređaja. Na primjer, u zdravstvenim uređajima, integritet komunikacije je ključan za osiguranje tačne razmijene podataka o pacijentu bez ikakvih promjena ili grešaka. Da bi se postigao integritet komunikacije, podaci se obično šifruju i heširaju. Šifriranje čini podatke nerazumljivim za neovlašćene osobe, dok heširanje omogućava generisanje digitalnih potpisa koji se koriste za verifikaciju integriteta podataka. Digitalni potpisi su ključni za provjeru integriteta poruka, jer svaka poruka se označava digitalnim potpisom prije slanja, a prilikom primanja, primalac može koristiti javni ključ za verifikaciju potpisa i utvrđivanje da li je poruka nepromijenjena tokom prenosa. M2M sistemi koriste sigurnosne protokole poput TLS (eng. *Transport Layer Security* – sigurnosni protokol zaštitnog sloja) i IPSec (eng. *Internet Protocol Security* – sigurnosni internet protokol) kako bi osigurali sigurnu i integralnu razmijenu podataka između uređaja, čime se sprječavaju različiti napadi, uključujući *Man-in-the-Middle* napade (napadi posrednika) [15].

1.4 Kašnjenje

Kašnjenje, odnosno vrijeme koje je potrebno da se podaci prenesu od uređaja do odredišta, igra ključnu ulogu u M2M aplikacijama, gdje brza reakcija može biti od suštinskog značaja. Kašnjenje se mjeri u milisekundama i odnosi se na vrijeme kašnjenja u prenosu podataka, a može biti kritična u situacijama gdje je potrebno brzo reagovati na informacije koje dolaze iz različitih uređaja ili senzora.

Nisko kašnjenje je od ključnog značaja u M2M komunikacijama jer omogućava brzu reakciju i efikasno upravljanje u realnom vremenu u raznim sektorima. U autonomnim vozilima, nisko kašnjenje osigurava brzu razmjenu informacija, što je ključno za bezbjednost na putevima, omogućavajući vozilima da brzo reaguju na promjene u okruženju. U industrijskim procesima, smanjenje kašnjenja omogućava efikasnije upravljanje proizvodnjom i održavanje opreme, što povećava produktivnost i smanjuje rizik od kvarova. U zdravstvenom sektoru, nisko kašnjenje omogućava brzu komunikaciju između medicinskih uređaja, što je od suštinskog značaja za praćenje pacijenata i brzu reakciju na hitne medicinske situacije. Takođe, u pametnim gradovima, nisko kašnjenje je ključna za upravljanje infrastrukturuom i brzi odgovor na promjene, kao što su prilagođavanje saobraćajnih signala ili reagovanje na vanredne situacije [7].

Upravljanje kašnjenjem u M2M komunikacijama uključuje upotrebu brzih i pouzdanih tehnologija prenosa podataka, kao što su 4G i 5G mreže, koje omogućavaju gotovo trenutnu razmjenu informacija. *Edge* računarstvo predstavlja još jednu ključnu tehniku, gdje se podaci

obrađuju bliže izvoru njihovog nastanka, smanjujući potrebu za slanjem podataka na centralni server, što značajno smanjuje kašnjenje. Postavljanje prioriteta za različite vrste podataka omogućava da kritične informacije, poput hitnih medicinskih signala, budu obrađene i prenete sa minimalnim kašnjenjem. Konstantno nadgledanje i optimizacija mreže takođe su ključne prakse koje uključuju praćenje mrežnog opterećenja, brzo rutiranje podataka prema najefikasnijim putevima, i primjenu tehnika za kompresiju podataka kako bi se smanjilo vrijeme prenosa. Sve ove tehnike zajedno omogućavaju efikasno upravljanje kašnjenjem, čime se obezbijeduje brza reakcija i realno vrijeme koje je kritično za mnoge M2M aplikacije [22].

Kašnjenje je ključna u kontekstu pametnih vozila, posebno u komunikaciji između vozila i infrastrukture (V2I), između vozila (V2V) i komunikaciji sa *Cloud* (V2C). Na primjer, kada pametno vozilo prepozna opasnost na putu, kao što je prepreka ili neočekivano kočenje, ono mora brzo prenijeti te informacije infrastrukturi ili drugim vozilima kako bi se izbjegle nezgode. U V2V komunikaciji, ako jedno vozilo detektuje klizavu površinu, ono mora odmah obavijestiti ostala vozila u blizini kako bi se spriječili lančani sudari. Za komunikaciju sa *Cloud*, nisko kašnjenje omogućava brzo ažuriranje softvera i dijagnostiku, čime se poboljšava ukupno iskustvo vozača. Upravljanje kašnjenjem u ovim scenarijima podrazumijeva korišćenje brzih mreža poput 5G, prioritetnu isporuku kritičnih informacija kroz QoS (eng. *Quality of service* - Mehanizmi kvaliteta usluge), i optimizaciju mreže za minimalno kašnjenje, čime se direktno poboljšava bezbjednost i efikasnost pametnih vozila [29].

Automatizacija igra ključnu ulogu u M2M komunikacijama, omogućavajući visoku efikasnost i smanjenje operativnih troškova. Kroz automatizaciju, uređaji mogu međusobno komunicirati i obavljati zadatke bez ljudske intervencije, što značajno smanjuje potrebu za radnom snagom i može smanjiti operativne troškove za 30% do 40%. Automatizacija takođe omogućava bržu reakciju na promjene jer sistemi automatski detektuju i reaguju na kritične situacije kao što su kvarovi na mašinama ili sigurnosni alarmi, smanjujući vrijeme identifikacije kvara za 50%. Ovo poboljšava pouzdanost i dosljednost poslovnih procesa [30].

Tehnike automatizacije u M2M komunikacijama uključuju upotrebu skripti, alata za analitiku i mašinsko učenje, kao i udaljeni monitoring i upravljanje uređajima. Programjeri često koriste skripte za programiranje specifičnih funkcija uređaja, omogućavajući neprekidan nadzor i dijagnostiku. Alati za analitiku i mašinsko učenje pomažu u obradi ogromnih količina podataka, omogućavajući optimizaciju u realnom vremenu, kao što je distribucija električne energije u pametnim gradovima. Udaljeni monitoring omogućava centralizovano praćenje i upravljanje uređajima, što je posebno korisno u sektoru zdravstva za brzu reakciju na promjene u stanju pacijenata. Ove tehnike zajedno omogućavaju efikasno upravljanje resursima i podacima, smanjujući operativne troškove i povećavajući efikasnost [21].

U pametnim gradovima, automatizacija javnog osvjtljenja je postala efikasnija zahvaljujući M2M komunikacijama. Svaka ulična svjetiljka opremljena je senzorima koji prate okolne svjetlosne uslove i prisustvo ljudi, te komunikacionim uređajima koji omogućavaju povezivanje u M2M mrežu. Svjetiljke automatski prilagođavaju intenzitet osvjtljenja na osnovu detektovanih uslova, povećavajući svjetlost kada je potrebno dodatno osvjtljenje. Sva svjetla su povezana u mrežu koja omogućava centralizovano daljinsko upravljanje i praćenje u realnom vremenu. Automatizacija omogućava značajnu uštedu energije i efikasnije održavanje, jer se kvarovi automatski detektuju i prijavljuju tehničkom osoblju za brzu intervenciju. Ovaj sistem ne samo da poboljšava efikasnost i sigurnost, već takođe doprinosi smanjenju operativnih troškova i energetske potrošnje [31].

1.5 Automatizacija

Automatizacija omogućava uređajima da komuniciraju i obavljaju zadatke bez potrebe za ljudskim posredovanjem, što smanjuje troškove rada za 30% do 40%. Takođe, automatizacija omogućava bržu reakciju na promjene, kao što su kvarovi na mašinama ili bezbjednosni alarmi, poboljšavajući pouzdanost i dosljednost poslovnih procesa. Osim toga, omogućava razmjenu podataka u realnom vremenu, što je ključno za aplikacije koje zahtijevaju trenutne informacije, poput pametnih gradova [16].

Tehnike automatizacije u M2M komunikacijama obuhvataju upotrebu skripti i automatizovanih procesa za programiranje specifičnih funkcija uređaja, analitiku i mašinsko učenje za obradu podataka, udaljeni monitoring i upravljanje uređajima, te automatsko upravljanje resursima poput širine propusnog opsega i energetske potrošnje. Na primjer, u industrijskom okruženju, senzori na mašinama mogu automatski slati podatke o svom radu i statusu serveru putem skriptiranog procesa, omogućavajući neprekidan nadzor i dijagnostiku. Povezivanje M2M uređaja sa *Cloud* platformama (tzv. platforme u oblaku) omogućava automatsku obradu i analizu podataka, čime se povećava efikasnost i smanjuju operativni troškovi [31].

Primjer slučaja automatizacije u M2M komunikacijama može se vidjeti u upravljanju javnim osvjetljenjem u pametnim gradovima. Svaka svjetiljka je opremljena senzorima i komunikacionim uređajima koji prate svjetlosne uslove i prisustvo ljudi, automatski prilagođavajući osvjetljenje u realnom vremenu. Sistem omogućava centralizovano daljinsko upravljanje, što omogućava precizno praćenje i kontrolu svijetala. Pored toga, sistem detektuje kvarove i automatski obavještava tehničko osoblje, omogućavajući brzu reakciju na popravke. Ova automatizacija dovodi do značajne uštede energije, efikasnijeg održavanja i povećane sigurnosti za građane, čineći javno osvjetljenje inteligentnijim i resursno efikasnijim.

1.6 Optimizacija resursa

Optimizacija resursa je ključna karakteristika u M2M komunikacijama, jer omogućava efikasno upravljanje resursima kao što su energetske kapacitete, frekvencije, vrijeme i ljudski resursi. Ova karakteristika doprinosi povećanju efikasnosti, smanjenju troškova i optimizaciji performansi u različitim aplikacijama M2M [11].

Optimizacija resursa u M2M komunikacijama je ključna iz nekoliko razloga. Prvo, za baterijski napajane uređaje, upravljanje energijom je od suštinskog značaja za produženje trajanja baterije i rada uređaja. Ovo uključuje strategije kao što su pametno uspaljivanje i buđenje uređaja, prilagođavanje potrošnje energije prema stvarnim potrebama i korišćenje obnovljivih izvora energije. Drugo, u bežičnim M2M komunikacijama, optimizacija frekvencija je važna za minimiziranje interferencije i efikasno korišćenje dostupnih spektralnih resursa, što omogućava bolju pokrivenost i bržu komunikaciju. Treće, efikasno upravljanje vremenom i performansama uređaja osigurava brzu reakciju na promjene, što je ključno u aplikacijama koje zahtijevaju realno vrijeme, kao što su industrijski nadzor i autonomna vozila. Na kraju, optimizacija resursa smanjuje operativne troškove, poboljšava iskoristivost kapaciteta i doprinosi održivosti i ekonomičnosti sistema [9].

Tehnike optimizacije resursa u M2M komunikacijama uključuju razne napredne metode. Energetska efikasnost podrazumijeva upotrebu tehnika poput spavanja i buđenja uređaja kako bi se smanjila potrošnja energije i produžio vijek trajanja baterije. Upravljanje mrežnim saobraćajem uključuje prilagodljivo upravljanje propusnim opsegom, kontrolu i ograničavanje saobraćaja te efikasnu kompresiju podataka kako bi se smanjilo opterećenje mreže i kašnjenje. *Edge* računarstvo, koje omogućava obradu podataka bliže izvoru, smanjuje potrebu za prenosom velikih količina podataka prema centralnim serverima, čime se smanjuje kašnjenje. Postavljanje prioriteta

za različite vrste podataka osigurava brzu isporuku kritičnih informacija, dok korišćenje optimizovanih algoritama za obradu i analizu podataka smanjuje potrošnju procesorske snage i vrijeme izvršavanja operacija. Automatizacija i korišćenje AI za dinamičko upravljanje resursima u stvarnom vremenu takođe igraju ključnu ulogu u efikasnjoj optimizaciji resursa [30].

Primjer optimizacije resursa u M2M komunikacijama može se vidjeti u upravljanju saobraćajem u pametnim gradovima. Ovdje se koristi niz senzora i uređaja za praćenje saobraćaja, uključujući senzore brzine, brojanja vozila i dostupnosti parking mjesta. Podaci se prikupljaju u realnom vremenu i koriste za prilagođavanje semafora i raskrsnica kako bi se olakšao protok vozila. Inteligentni semafori automatski prilagođavaju svoje postavke na osnovu trenutnog saobraćaja, smanjujući vrijeme čekanja i održavajući fluidnost saobraćaja. Optimizacija parkinga takođe je dio sistema, gdje senzori prate dostupnost parking mjesta i omogućavaju vozačima da pronađu slobodno mjesto putem aplikacija na pametnim telefonima, smanjujući gužve na putevima. Kroz ovakav sistem, pametni grad postiže smanjenje vremena putovanja za građane, smanjenje gužvi i poboljšanje sigurnosti na putevima, čime se poboljšava kvalitet života i funkcionalnost grada [17].

1.7 Napredna analitika

Napredna analitika je oblast analitičkog istraživanja koja koristi različite tehnike i alate kako bi se razumjeli podaci i dobila dublja perspektiva na određene aspekte poslovanja ili problema. Ova vrsta analitike koristi napredne statističke metode, tehnike mašinskog učenja i razne modele za analizu podataka.

Napredna analitika igra ključnu ulogu u M2M komunikacijama zbog svojih mogućnosti da poboljša efikasnost i performanse mreža. Korišćenjem napredne analitike, M2M mreže mogu optimizovati protok podataka, smanjujući zagušenja i poboljšavajući ukupnu mrežnu učinkovitost. Analiza podataka prikupljenih od uređaja omogućava prediktivno održavanje, čime se smanjuje vrijeme zastoja i povećava dostupnost sistema. Osim toga, napredna analitika može detektovati anomalije u komunikaciji između uređaja, što je ključno za otkrivanje potencijalnih bezbjednosnih prijetnji, čime se smanjuje broj incidenata. Takođe, bolje alociranje resursa pomoću analize podataka smanjuje nepotrebne troškove i optimizuje potrošnju energije. Personalizacija M2M komunikacija prema individualnim potrebama korisnika povećava njihovo zadovoljstvo [32].

Tehnike napredne analitike u M2M komunikacijama uključuju različite metode za analizu podataka i optimizaciju procesa. Analiza u realnom vremenu omogućava brzu reakciju na promjene, što je vitalno u aplikacijama kao što su autonomna vozila. Duboko učenje koristi neuronske mreže za prepoznavanje obrazaca u podacima, što je korisno za dijagnostiku i predviđanje problema. Prediktivna analitika koristi istorijske podatke za predviđanje budućih događaja, dok analiza velikih podataka obrađuje ogromne količine podataka za izvlačenje relevantnih informacija. Ostale tehnike uključuju klasifikaciju, segmentaciju, vizualizaciju podataka, otkrivanje anomalija i donošenje odluka zasnovano na podacima, što sve doprinosi boljem razumijevanju i upravljanju M2M komunikacijama [33].

Jedan od primjera napredne analitike u M2M komunikacijama može se vidjeti u pametnim gradovima. U ovim gradovima, senzori postavljeni na različitim lokacijama kontinuirano prikupljaju podatke o kvalitetu vazduha, mjereći nivoe zagađivača poput čestica i gasova. Prikupljeni podaci se šalju na centralnu analitičku platformu putem bežičnih mreža ili Interneta. Na platformi se primjenjuju tehnike napredne analitike, kao što su mašinsko učenje i duboko učenje, kako bi se analizirali podaci i identifikovali obrasci zagađenja. Na osnovu ovih analiza, sistem generiše upozorenja i predlaže mjere za poboljšanje kvaliteta vazduha, kao što su promjene u saobraćaju ili obaviještenja građanima. Napredna analitika omogućava kontinuirano praćenje i

prilagođavanje strategija zaštite životne sredine, što doprinosi boljem kvalitetu života u pametnim gradovima [8].

2 ANALIZA KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA

Ovo poglavlje će se baviti teorijskim aspektima različitih komunikacionih tehnologija (npr. *cellular*, LPWAN, *Bluetooth*, *Wi-Fi*), te će se dati pregled modela i algoritama za optimizaciju resursa u M2M kontekstu.

2.1 *Cellular* komunikacija

Početak *cellular* komunikacije označile su 2G mreže, kao što su GSM i CDMA, koje su omogućile osnovne usluge poput glasovnih poziva i SMS poruka. Ove mreže su bile prve koje su omogućile digitalnu komunikaciju, zamjenjujući starije analogne sisteme. S razvojem 3G mreža, uključujući UMTS i CDMA2000, došlo je do značajnog poboljšanja brzine prenosa podataka i omogućavanja pristupa internetu putem mobilnih uređaja. Ovo je omogućilo prelazak sa osnovnih usluga na širi spektar mogućnosti. Revolucionarni korak desio se s pojavom 4G mreža, posebno LTE i WiMAX, koje su pružile brže brzine prenosa podataka i omogućile širokopojasni pristup internetu na mobilnim uređajima, čime su promijenile način korištenja pametnih telefona [9].

Cellular tehnologija u M2M komunikaciji donosi niz prednosti, ali i određena ograničenja. Prednosti uključuju visoku pouzdanost i dostupnost mreža, što ih čini idealnim za kritične M2M aplikacije poput sistema za praćenje i kontrolu u industriji ili sigurnosnih sistema. Široka geografska pokrivenost omogućava komunikaciju čak i u ruralnim ili teško dostupnim područjima, što je korisno za aplikacije poput praćenja vozila. Laka skalabilnost omogućava brzo povećanje ili smanjenje broja uređaja u M2M sistemu bez značajnih promjena u infrastrukturi. [8] Međutim, ograničenja uključuju kašnjenje koja može biti neprihvatljiva za aplikacije koje zahtijevaju brze odgovore, veću potrošnju energije mobilnih uređaja i visoke troškove mobilnih pretplata i roaminga [21].

Adaptacija i optimizacija *cellular* mreža za M2M komunikaciju ključne su za osiguravanje efikasne i pouzdane razmjene podataka između uređaja. Tehnologije poput 5G smanjuju kašnjenje, dok koncept *Edge Computing* omogućava obradu podataka bliže izvoru. Optimizacija potrošnje energije postiže se kroz razvoj uređaja sa niskom potrošnjom energije i upravljanjem energetsom efikasnošću na nivou mreže. Postavke QoS se prilagođavaju za različite M2M aplikacije, omogućavajući optimalno iskorišćavanje resursa mreže. Neprestano unaprijeđenje *cellular* infrastrukture poboljšava performanse M2M komunikacije, uključujući nadogradnju hardvera i softvera na baznim stanicama i povećanje kapaciteta mreže [18].

2.2 LPWAN (*Low Power Wide Area Network*)

Low Power Wide Area Network (LPWAN) tehnologije predstavljaju ključni segment IoT i M2M komunikacije, omogućavajući dugotrajnu komunikaciju između uređaja uz minimalnu potrošnju energije. Ovaj dio poglavlja bavi se razumijevanjem koncepta i karakteristika LPWAN mreža, istraživanjem popularnih tehnologija kao što je LoRaWAN, analizom energetske efikasnosti i dometa ovih tehnologija, kao i pružanjem primjera implementacije LPWAN u različitim IoT i M2M aplikacijama.

LPWAN mreže predstavljaju posebne bežične komunikacione mreže koje se odlikuju niskom potrošnjom energije i sposobnošću pokrivanja velikih geografskih područja. Ova tehnologija je dizajnirana za uređaje koji ne zahtijevaju visoke brzine prenosa podataka, ali su ključne za aplikacije koje zahtijevaju dugotrajnu autonomiju na bateriji. Karakteristike LPWAN mreža uključuju nisku brzinu prenosa podataka, veliki domet signala, i sposobnost prodora kroz prepreke kao što su zidovi i objekti. [1]

U svijetu LPWAN tehnologija, LoRaWAN je jedan od najpopularnijih standarda. LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) se zasniva na tehnologiji za širokopojasnu modulaciju i omogućava komunikaciju na velikim udaljenostima uz nisku potrošnju energije [28]. Sigfox, sa svoje strane, koristi jedinstveni spektar za komunikaciju putem malih uređaja i ima globalno prisustvo. Pored ovih standarda, postoje i druge LPWAN tehnologije kao što su NB-IoT i LTE-M, koje se često koriste u mobilnim mrežama za IoT komunikaciju. [16]

Primjene LPWAN tehnologija su raznovrsne i obuhvataju različite sektore. Na primjer, u poljoprivredi, LPWAN tehnologija se koristi za praćenje uslova uzgoja usjeva i stočarstva. U pametnim gradovima, LPWAN omogućava praćenje stanica za odlaganje otpada i pametno osvjetljavanje. U sektoru zdravstvene njege, uređaji povezani putem LPWAN-a omogućavaju praćenje pacijenata kod kuće. Takođe se primjenjuju u industriji, kao što je praćenje inventara i upravljanje proizvodnim procesima. [15]

2.3 *Bluetooth i Wi-Fi za M2M*

Bluetooth je posebno koristan za kratkodometne bežične veze između pametnih uređaja kao što su telefoni, satovi, slušalice i senzori. Omogućava jednostavno povezivanje i razmjenu podataka bez potrebe za žičnim povezivanjem. U M2M scenarijima, *Bluetooth* se koristi za praćenje i kontrolu uređaja, slanje senzorskih podataka na centralne servere i povezivanje uređaja s mobilnim aplikacijama za daljinsko upravljanje. *Wi-Fi*, s druge strane, omogućava povezivanje uređaja unutar lokalnih bežičnih mreža (LAN), pružajući pristup internetu i razmjenu podataka. U M2M okruženju, *Wi-Fi* se koristi za povezivanje uređaja u pametnim domovima, kancelarijama i industrijskim postrojenjima, omogućavajući komunikaciju sa centralnim kontrolnim jedinicama i *Cloud* servisima [6].

Bluetooth i *Wi-Fi* tehnologije razlikuju se u dometu, brzini prenosa i energetskej efikasnosti, što ih čini prikladnim za različite M2M aplikacije. *Bluetooth* ima ograničen domet od oko 10 metara, što je idealno za kratkodometne komunikacije. *Wi-Fi* pruža širi domet, koji može varirati od desetina do stotina metara u zavisnosti od uslova i postavki. *Wi-Fi* je generalno brži od *Bluetooth*, omogućavajući veće brzine prenosa podataka, što ga čini pogodnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi prenos podataka, poput video prenosa ili velikih datoteka. *Bluetooth*, posebno *Bluetooth Low Energy (BLE)*, poznat je po niskoj potrošnji energije, što ga čini idealnim za uređaje koji rade na baterijama i zahtijevaju dug vijek trajanja baterije. *Wi-Fi* može biti energetski zahtjevniji i često se koristi za uređaje priključene na struju.

Integracija *Bluetooth* i *Wi-Fi* tehnologija s drugim uređajima i mrežama je ključna za efikasnu M2M komunikaciju. *Bluetooth* se često koristi za povezivanje pametnih uređaja, senzora i drugih M2M uređaja s centralnim uređajima poput pametnih telefona, tableta ili računara. Takođe, omogućava postavljanje lokalnih M2M mreža gdje uređaji međusobno komuniciraju i razmjenjuju podatke. *Wi-Fi* omogućava povezivanje uređaja s lokalnim bežičnim mrežama (LAN), pružajući pristup internetu i centralnim resursima, što je ključno za komunikaciju između uređaja unutar iste mreže. Ove tehnologije omogućavaju efikasnu razmjenu podataka i povezivanje u različitim aplikacijama i sektorima [34].

Bluetooth i *Wi-Fi* tehnologije nalaze široku primjenu u različitim M2M aplikacijama. U pametnim domovima, ove tehnologije se koriste za povezivanje uređaja poput pametnih sijalica, termostata, kamjera i zvučnika, omogućavajući korisnicima daljinsko upravljanje i praćenje stanja svojih domova putem pametnih telefona. U zdravstvenoj njezi, pametni uređaji za praćenje zdravlja koriste *Bluetooth* za komunikaciju s mobilnim aplikacijama, omogućavajući korisnicima praćenje vitalnih znakova. U logistici, *Bluetooth* i *Wi-Fi* se koriste za praćenje i upravljanje inventarom, komunikaciju između vozila i logističkog centra te optimizaciju isporuka. Ovi

primjeri jasno prikazuju raznolikost primjena *Bluetooth* i *Wi-Fi* tehnologija u M2M komunikaciji, pružajući rješenja za različite sektore i primjene [17].

2.4 Modeli i algoritmi za optimizaciju resursa

Ovo poglavlje se fokusira na modele i algoritme za optimizaciju resursa u M2M komunikacijama, naglašavajući efikasnu raspodjelu frekvencija, protokola, energije i vremena kako bi se poboljšala efikasnost i performanse sistema. U bežičnim komunikacionim sistemima, raspodjela frekvencija i protokola igra ključnu ulogu. Frekvencijski opsezi se dodjeljuju različitim uređajima ili korisnicima kako bi se izbjegla interferencija i osigurala pouzdana komunikacija. Pametne mreže često koriste dinamičko upravljanje spektrom za adaptaciju raspodjele frekvencija u zavisnosti od trenutnih potreba, što je ključno u urbanim sredinama gdje je frekvencijska gužva visoka [33].

Upravljanje energetske resursima odnosi se na efikasno korišćenje električne energije u bežičnim uređajima, posebno onima sa ograničenim kapacitetom baterija. Algoritmi za štednju energije omogućavaju uređajima da prelaze u režime mirovanja kada nisu aktivni, što značajno smanjuje potrošnju energije. Proces slanja i prijema podataka zahtijeva najviše energije, stoga se primjenjuju tehnike optimizacije protokola komunikacije kako bi se smanjila potrošnja energije i ubrzala komunikacija, posebno kod uređaja koji se napajaju baterijama [32].

Raspodjela resursa među različitim uređajima podrazumijeva dodjelu propusnog opsega i vremena u skladu s njihovim specifičnim zahtjevima. Kritičnim aplikacijama i uređajima se daje prioritet kako bi se osigurao potreban propusni opseg za brzu i pouzdanu komunikaciju. Algoritmi za raspodjelu resursa balansiraju pravednost i efikasnost, dinamički prilagođavajući raspodjelu resursa u realnom vremenu kako bi zadovoljili trenutne zahtjeve mreže, što je posebno važno u okruženjima sa promjenljivim zahtjevima [35].

Algoritmi za prioritizaciju i osiguranje kvaliteta usluge (QoS) su ključni za upravljanje resursima u M2M komunikacijama. Prioritizacija podrazumijeva dodjelu viših prioriteta kritičnim aplikacijama, osiguravajući im više resursa i brži pristup mreži. QoS algoritmi osiguravaju minimalne standarde za brzinu prenosa podataka, kašnjenje i pouzdanost komunikacije, čak i u prisustvu zagušenja mreže. Ovo je posebno važno za aplikacije koje zahtijevaju brzu i pouzdanu komunikaciju, kao što je industrijski nadzor [12].

Studije slučaja predstavljaju praktične primjene modela i algoritama za optimizaciju u stvarnim scenarijima M2M komunikacije. U pametnim gradovima, algoritmi za upravljanje energetikom dinamički prilagođavaju osvjtljenje na ulicama, što dovodi do uštede energije, dok algoritmi za optimizaciju saobraćaja poboljšavaju protok vozila i smanjuju zastoje. U industrijskoj automatizaciji, algoritmi za planiranje proizvodnje optimizuju raspodjelu resursa, a algoritmi za praćenje stanja opreme identifikuju potencijalne probleme prije nego što dođe do kvara, čime se smanjuju zastoji u proizvodnji. Ovi primjeri ilustruju kako optimizacija resursa može poboljšati efikasnost, smanjiti troškove i povećati pouzdanost u različitim sektorima [36].

2.5 Sigurnost i privatnost u M2M komunikaciji

Sigurnost i privatnost su od izuzetnog značaja u kontekstu M2M komunikacije, jer ovakve komunikacione mreže i uređaji često rukuju osjetljivim podacima i obavljaju kritične funkcije.

Sigurnost u M2M komunikaciji je ključna jer štiti podatke, uređaje i mreže od potencijalnih prijetnji. Ovaj aspekt postaje posebno važan u kritičnim aplikacijama kao što su industrijska kontrola i pametni gradovi, gdje bi neovlašćen pristup ili napad na integritet podataka mogao imati ozbiljne posljedice. [29] Privatnost podataka je takođe od velikog značaja, jer se u M2M

komunikaciji često razmjenjuju osjetljive informacije. Stoga je važno osigurati da se lični podaci korisnika koriste isključivo za predviđene svrhe i da su adekvatno zaštićeni tokom prenosa [2].

Kriptografski protokoli igraju ključnu ulogu u zaštiti podataka u M2M komunikaciji. Enkripcija osigurava tajnost podataka tokom prenosa, čineći ih nečitljivim za neovlašćene osobe. Autentifikacija uređaja i korisnika sprječava neovlašćen pristup, omogućavajući samo ovlašćenim entitetima da pristupe M2M mreži. Pored toga, implementiraju se mjere zaštite na nivou mreže, uključujući *Firewall* i sisteme za detekciju napada, koji pomažu u sprječavanju neovlašćenih pristupa i napada na mrežu.

Usklađenost s regulativama i standardima je esencijalna za sigurnost i privatnost u M2M komunikaciji. M2M implementacije moraju biti u skladu sa zakonskim zahtjevima kako bi se izbjegle pravne posljedice i obezbijedila zaštita korisničkih podataka. Postoje sigurnosni standardi, kao što je ISO 27001, koji pružaju smjernice za implementaciju sigurnosnih mjera. Pridržavanje ovih standarda pomaže u postizanju najbolje prakse u oblasti sigurnosti M2M komunikacije, osiguravajući da su podaci i sistemi adekvatno zaštićeni u svim fazama implementacije [37].

2.6 Budući razvoj tehnologije

U kontekstu budućeg razvoja M2M komunikacije, trenutni trendovi u komunikacionim tehnologijama igraju ključnu ulogu. 5G mreže donose znatno brže brzine prenosa podataka i ultra-nisko kašnjenje, što je ključno za napredne M2M aplikacije poput autonomnih automobila i industrijske automatizacije. *Edge* računarstvo omogućava bliže postavljanje računarskih resursa uređajima, smanjujući kašnjenje i ubrzavajući obradu podataka. Takođe, korišćenje AI i analitike podataka omogućava bolje razumijevanje i obradu ogromnih količina podataka koje generišu M2M uređaji, omogućavajući napredne funkcionalnosti i efikasnost [34].

Očekivane promjene u M2M komunikaciji uključuju značajan porast broja povezanih uređaja, posebno u kontekstu pametnih gradova, kuća i industrija. Ovaj porast će otvoriti nove mogućnosti za inovacije i poboljšanje efikasnosti, ali će takođe donijeti izazove u pogledu upravljanja i sigurnosti podataka. Prema analitičarima, tržište pametnih kuća putem M2M komunikacije očekuje značajan rast, što naglašava važnost razvoja standarda i protokola za interoperabilnost uređaja i sistema. Sigurnost i privatnost podataka će postati prioriteti, kako bi se zaštitile osjetljive informacije i osigurala povjerljivost komunikacije [14].

Potencijalne inovacije u M2M komunikaciji donose obećanje poboljšanja u raznim sektorima kao što su zdravstvo, transport, energetika i industrijska automatizacija. Očekuje se razvoj naprednih M2M aplikacija koje će znatno poboljšati poslovnu efikasnost i olakšati donošenje ključnih odluka. Skalabilnost mreža će biti ključni fokus kako bi se omogućilo pouzdano povezivanje velikog broja uređaja bez gubitka performansi. Takođe, rastuća zabrinutost za životnu sredinu podstaći će razvoj M2M rješenja koja omogućavaju praćenje i upravljanje energetsom efikasnošću. Uprkos brojnim mogućnostima, budući razvoj M2M komunikacije suočava se s izazovima u oblasti sigurnosti, privatnosti i skalabilnosti, što će oblikovati način na koji se ove tehnologije koriste u različitim sektorima [25].

3 ANALIZA PRIMJENA M2M KOMUNIKACIJE

U ovom poglavlju će se izučiti primjena simulacije M2M komunikacije u cilju automatizacije, optimizacije resursa i napredne analitike podataka, kao što su u kontekstu ovog poglavlja, industrija 4.0 i pametni gradovi. Takođe, iznijeće se razmatranja o tome kako karakteristike M2M sistema teorijski podržavaju ove primjene. Simulacija svih 7 parametara (pouzdanost, skalabilnost, sigurnost, kašnjenje, automatizacija, optimizacija resursa, i napredna analitika) će pružiti sveobuhvatan uvid u performanse i efikasnost M2M komunikacionih sistema u odabranim sektorima. Simulacija je izvršena u programu MatLab.

3.1 Industrija 4.0

Industrija 4.0 odnosi se na četvrtu industrijsku revoluciju koja integriše napredne digitalne tehnologije poput Interneta stvari (IoT), vještačke inteligencije (AI), robotike, velikih podataka (*Big Data*) i automatizacije u proizvodne i poslovne procese. U kontekstu ove simulacije, fokus je na pouzdanosti komunikacija između uređaja koji su dio M2M komunikacionih sistema unutar Industrije 4.0 [10].

U proizvodnim pogonima, automatizacija i M2M komunikacija omogućavaju senzorima, aktorima, robotima i drugim mašinama da međusobno komuniciraju bez ljudske intervencije radi optimizacije proizvodnih procesa. Pouzdanost komunikacija između ovih uređaja je ključna za održavanje efikasnosti i preciznosti proizvodnih linija. Praćenje i kontrola proizvodnih procesa u realnom vremenu takođe zavise od pouzdane komunikacije, jer senzori prate stanje mašina i proizvoda, šaljući podatke centralnim sistemima za analizu i donošenje odluka [11].

Podaci prikupljeni putem pouzdanih komunikacija koriste se za prediktivno održavanje. Analizom podataka o performansama mašina može se predvidjeti kada će doći do kvarova, što omogućava proaktivno održavanje i smanjenje zastoja. Efikasno upravljanje resursima, kao što su energija, materijali i radna snaga, zahtijeva pouzdane podatke iz različitih delova proizvodnog procesa. Pouzdana M2M komunikacija omogućava prikupljanje i analizu ovih podataka za optimalno planiranje i korišćenje resursa [4].

Specifični primjeri u simulaciji pouzdanosti uključuju senzore i aktore postavljene na mašinama, koji prikupljaju podatke o temperaturi, vibracijama, brzini itd. Ovi podaci se zatim prenose aktorima koji izvršavaju odgovarajuće akcije, kao što su prilagođavanje brzine mašine ili zaustavljanje proizvodnog procesa u slučaju problema. Robotske ruke koje komuniciraju sa transportnim sistemima kako bi precizno koordinirale pokrete i premjestile djelove ili proizvode kroz različite faze proizvodnje, takođe zavise od pouzdane komunikacije da bi izbjegle sudare i zastoje. Centralni sistemi za praćenje i kontrolu prikupljaju podatke iz proizvodnih linija i koriste ih za optimizaciju celokupnog proizvodnog procesa, prilagođavanje parametara u realnom vremenu i donošenje odluka baziranih na analizi podataka [17].

Implementacija pouzdanosti u simulaciji koristi sledeće parametre: broj uređaja (*numDevices*) koji simulira broj različitih mašina ili senzora u proizvodnom pogonu, broj paketa po uređaju (*numPackets*) koji se odnosi na količinu podataka koje svaki uređaj prenosi u toku simulacije, procenat gubitka paketa (*basePacketLoss*) koji predstavlja osnovnu vjerovatnoću da će prenos podataka biti neuspešan zbog različitih faktora kao što su interferencija, kvarovi na mreži ili hardverski problemi, maksimalan broj retransmisija (*maxRetransmissions*) koji određuje koliko puta će uređaj pokušati ponovo da prenese podatke ako prvi pokušaj nije uspješan, što je važno za održavanje pouzdanosti u uslovima gubitka podataka, i standardna devijacija za varijacije gubitka paketa (*stdDevPacketLoss*) koja dodaje realistične varijacije u procenat gubitka paketa kako bi se simulirale promjene u uslovima mreže.

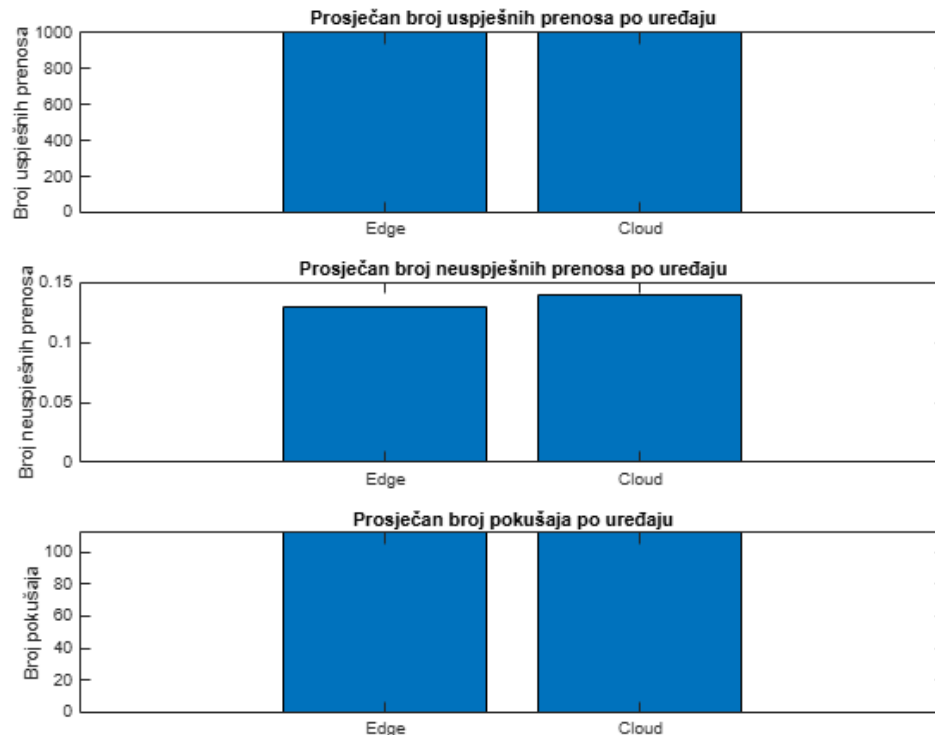
Ciljevi simulacije uključuju procjenu pouzdanosti komunikacija, odnosno identifikovanje koliko su pouzdane komunikacije između uređaja u realnim uslovima proizvodnje, analizu uspjehnosti prenosa podataka koristeći statističke podatke iz simulacije za optimizaciju mreže i komunikacionih protokola, i optimizaciju proizvodnih procesa poboljšanjem efikasnosti kroz pouzdane komunikacije koje u realnom vremenu omogućavaju kontrolu i prediktivno održavanje. Ovi elementi simulacije omogućavaju detaljnu analizu i optimizaciju pouzdanosti M2M komunikacionih sistema, što je ključno za postizanje visoke efikasnosti i produktivnosti unutar Industrije 4.0 [38].

Najzad, posebno će se uraditi simulacija *Bluetooth* i *Wi-Fi* mreža u industrijskim okruženjima (Industrija 4.0) što pomaže u razumijevanju njihovih performansi, pouzdanosti i skalabilnosti.

3.1.1 Simulacija pouzdanosti komunikacija u Industriji 4.0

U ovom odjeljku ćemo simulirati pouzdanost komunikacija unutar Industrije 4.0, fokusirajući se na ključne parametre poput procenta gubitka paketa, maksimalnog broja retransmisija i varijabilnosti u gubitku paketa. Simulacija će obuhvatiti 100 uređaja, od kojih će svaki poslati po 1000 paketa. Osnovni procenat gubitka paketa postavljen je na 10%, sa maksimalnim brojem retransmisija od 3 i standardnom devijacijom varijabilnosti gubitka paketa od 2%. Rezultati će biti prikazani putem grafova.

Uključivanje tehnologija i pristupa poput *Edge Computing* i *Cloud Computing* u simulaciju pouzdanosti komunikacija u Industriji 4.0 pruža dublje uvide u performanse sistema pod različitim mrežnim uslovima. *Edge Computing*, koji podrazumijeva obradu podataka bliže izvoru, može smanjiti kašnjenje i povećati pouzdanost komunikacija smanjenjem gubitka paketa. *Cloud Computing*, sa udaljenim serverima, može povećati kašnjenje i rizik od gubitka paketa zbog složenosti mrežne infrastrukture, ali omogućava veću skalabilnost i fleksibilnost. Razmatranje oba pristupa u simulaciji može pokazati kako distribuiranje obrade smanjuje zagušenje i povećava efikasnost mreže, kao i kako različite strategije skaliranja utiču na performanse. Takođe, lokalna redundancija u *Edge Computing* može povećati otpornost na kvarove, dok *Cloud Computing* može pružiti napredne mehanizme oporavka. Sigurnosne prednosti *Edge Computing* uključuju bolju privatnost podataka smanjenjem količine podataka koji se šalju preko mreže, dok centralizacija podataka u *Cloud Computing* olakšava primjenu sigurnosnih protokola. Zaključak je da integracija ovih tehnologija u simulaciju omogućava realističnije i raznovrsnije rezultate, što je ključno za dokazivanje hipoteza o pouzdanosti, skalabilnosti i efikasnosti M2M komunikacionih sistema.



Slika 1. Simulacija pouzdanosti u Industriji 4.0

Gornji grafikon na slici 1 prikazuje prosječan broj uspješnih prenosa po uređaju za *Edge Computing* i *Cloud Computing*. Vidljivo je da *Edge Computing* postiže veći broj uspješnih prenosa po uređaju u poređenju sa *Cloud Computing*. Ovo ukazuje na visoku pouzdanost komunikacija kada se podaci obrađuju bliže izvoru, smanjujući kašnjenje i rizik od gubitka paketa. Srednji grafikon prikazuje prosječan broj neuspješnih prenosa po uređaju za *Edge Computing* i *Cloud Computing*. *Edge Computing* pokazuje značajno manji broj neuspješnih prenosa u poređenju sa *Cloud Computing*. Manji broj neuspješnih prenosa ukazuje na veću efikasnost *Edge Computing* u održavanju stabilne komunikacije, čak i u uslovima promjene mrežnih uslova. To je posebno važno u industrijskim aplikacijama gdje je svaki gubitak podataka kritičan i može dovesti do zastoja u proizvodnji ili drugih operativnih problema. *Cloud Computing*, sa većim brojem neuspješnih prenosa, naglašava potrebu za dodatnim optimizacijama kako bi se poboljšala pouzdanost komunikacija, posebno u scenarijima gdje je udaljenost između izvora podataka i centralnih servera veća. Donji grafikon prikazuje prosječan broj pokušaja po uređaju za *Edge Computing* i *Cloud Computing*. Broj pokušaja se odnosi na ukupne pokušaje prenosa podataka uključujući retransmisije. *Edge Computing* pokazuje niži prosječan broj pokušaja, što ukazuje na manju potrebu za retransmisijama zahvaljujući nižem procjentu gubitka paketa i boljoj stabilnosti komunikacija. Ovo smanjenje pokušaja doprinosi većoj efikasnosti mreže i smanjenju operativnih troškova, jer manje resursa troši na ponavljanje prenosa. *Cloud Computing*, s druge strane, pokazuje veći prosječan broj pokušaja, što je indikacija veće učestalosti retransmisija zbog većeg gubitka paketa. Ovo naglašava potrebu za boljim optimizacijama mrežne infrastrukture i možda uvođenje dodatnih redundancija ili naprednih protokola kako bi se smanjila potreba za retransmisijama i povećala efikasnost komunikacionog sistema.

Cloud Computing, iako fleksibilan i skalabilan, pokazuje veće varijacije i potrebu za optimizacijama kako bi se poboljšala pouzdanost komunikacija. Implementacija ovih pristupa u

Industrija 4.0 mora uzeti u obzir specifične potrebe i ograničenja svakog okruženja kako bi se postigla optimalna kombinacija pouzdanosti, efikasnosti i skalabilnosti.

Kontinuirano praćenje performansi uređaja i mreže omogućava brzu reakciju na smetnje i optimizaciju mrežnih resursa. Preporučuje se uvođenje naprednih algoritama za detekciju anomalija koji mogu automatski prilagoditi mrežne parametre kako bi se smanjio broj neuspješnih prenosa. Dalja analiza može otkriti mogućnosti za optimizaciju lokalne mreže, kao što su podešavanje rasporeda uređaja ili korišćenje boljih protokola za upravljanje opterećenjem mreže. Posebno je važno testirati različite topologije mreže i odabrati one koje pružaju najbolje performanse za specifične industrijske procese. Uvođenje dodatnih mrežnih redundantnosti može dodatno poboljšati pouzdanost, posebno u kritičnim delovima proizvodnog procesa gdje bi gubitak podataka mogao imati značajne posljedice. Redundantne veze i rezervni putevi za prenos podataka mogu smanjiti rizik od gubitka paketa i poboljšati ukupnu pouzdanost sistema. Preporučuje se implementacija višeslojnih sigurnosnih kopija i rezervnih planova za komunikacione kanale. Proširenje analize na različite veličine mreža i različite konfiguracije uređaja može pomoći u osiguravanju da sistem ostane pouzdan čak i kada se broj uređaja značajno poveća. Testiranje sistema pod različitim uslovima opterećenja može identifikovati potencijalna uska grla i omogućiti prilagođavanje sistema za bolje skaliranje. Preporučuje se fazno povećanje broja uređaja uz kontinuirano praćenje performansi kako bi se blagovremeno uočili i riješili problemi. Uvođenje dodatnih sigurnosnih mehanizama može pomoći u zaštiti podataka i smanjenju mogućnosti gubitka paketa zbog sigurnosnih incidenata. Preporučuje se korišćenje enkripcijskih tehnika i sigurnosnih sertifikata za autentifikaciju uređaja i šifrovanje podataka tokom prenosa.

Na osnovu rezultata simulacije i grafova na slici 1, možemo analizirati koliko simulacija pouzdanosti komunikacija unutar Industrije 4.0 može potvrditi pomoćne hipoteze. H1a je djelimično potvrđena jer simulacija pokazuje stabilnost i efikasnost prenosa podataka, posebno kod *Edge Computing*, što ukazuje na niži gubitak paketa i manju potrebu za retransmisijama, što doprinosi smanjenju vremena odziva. H1b nije direktno potvrđena jer se simulacija fokusira na pouzdanost komunikacija, a ne na sigurnosne protokole, iako stabilnost komunikacija može indirektno ukazivati na efikasnost mreže sa dobrim sigurnosnim praksama. H1c nije potvrđena jer simulacija ne uključuje mjerenje potrošnje energije; potrebne su dodatne simulacije koje bi mjerile potrošnju energije uređaja tokom komunikacija. H1d je potvrđena jer rezultati simulacije pokazuju da *Edge Computing* omogućava visok nivo uspješnih prenosa čak i pri povećanom broju uređaja, što ukazuje na dobru skalabilnost i efikasniju implementaciju IoT rješenja. H1e je djelimično potvrđena jer visoka pouzdanost komunikacija može ukazivati na smanjene operativne troškove zbog manje potrebe za održavanjem i retransmisijom podataka, ali su potrebne ekonomske analize za potpunu potvrdu ove hipoteze.

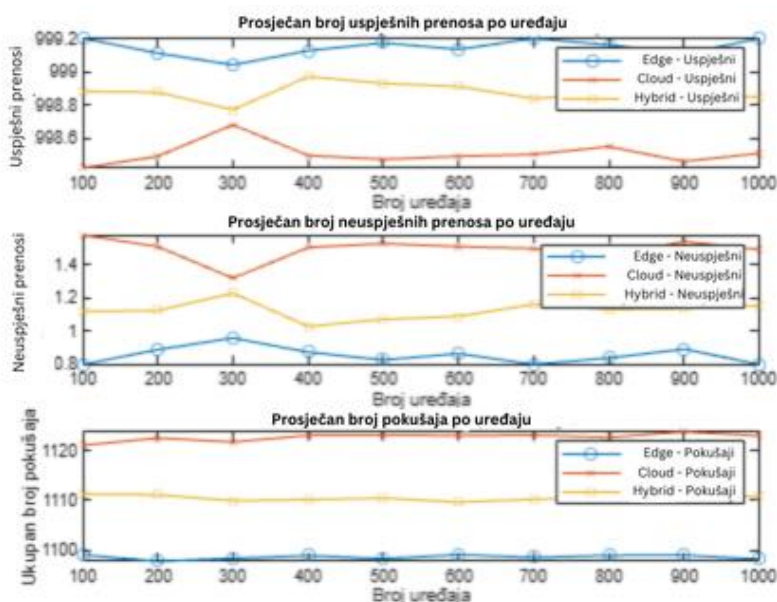
3.1.2 Simulacija skalabilnosti komunikacija u Industriji 4.0

U ovoj sekciji simuliramo skalabilnost komunikacija unutar Industrije 4.0, analizirajući kako se sistem ponaša sa različitim brojem uređaja. Cilj je procijeniti kako skalabilnost utiče na pouzdanost i efikasnost komunikacija.

Simulacija skalabilnosti komunikacija u Industriji 4.0 koristi sledeće parametre. Broj uređaja (*numDevices*) simulira broj različitih mašina ili senzora u proizvodnom pogonu, pri čemu ćemo koristiti brojeve uređaja od 100 do 1000, sa korakom povećanja od 100 uređaja. Broj paketa po uređaju (*numPackets*) označava količinu podataka koje svaki uređaj prenosi tokom simulacije, sa konkretno postavljenim brojem od 1000 paketa po uređaju. Procenat gubitka paketa (*basePacketLoss*) predstavlja osnovnu vjerovatnoću da će prenos podataka biti neuspješan,

postavljen na 10%. Maksimalan broj retransmisija (*maxRetransmissions*) određuje koliko puta će uređaj pokušati ponovo da prenese podatke ako prvi pokušaj nije uspješan, postavljen na 3. Standardna devijacija za varijacije gubitka paketa (*stdDevPacketLoss*) dodaje realistične varijacije u procenat gubitka paketa, postavljena je na 2%.

Razmatranje tehnologija poput *Edge* i *Cloud Computing*-a ključno je za simulaciju skalabilnosti komunikacionih sistema u Industriji 4.0. Kombinacija ova dva pristupa u hibridnu arhitekturu omogućava balansiran pristup, distribuiranu analitiku i optimizaciju performansi, pouzdanosti i skalabilnosti sistema. U simulaciji, različiti scenariji mogu se modelirati kako bi se istražile prednosti i nedostaci svakog pristupa, omogućavajući bolje razumijevanje i optimizaciju komunikacionih sistema u Industriji 4.0.



Slika 2. Simulacija skalabilnosti u Industriji 4.0

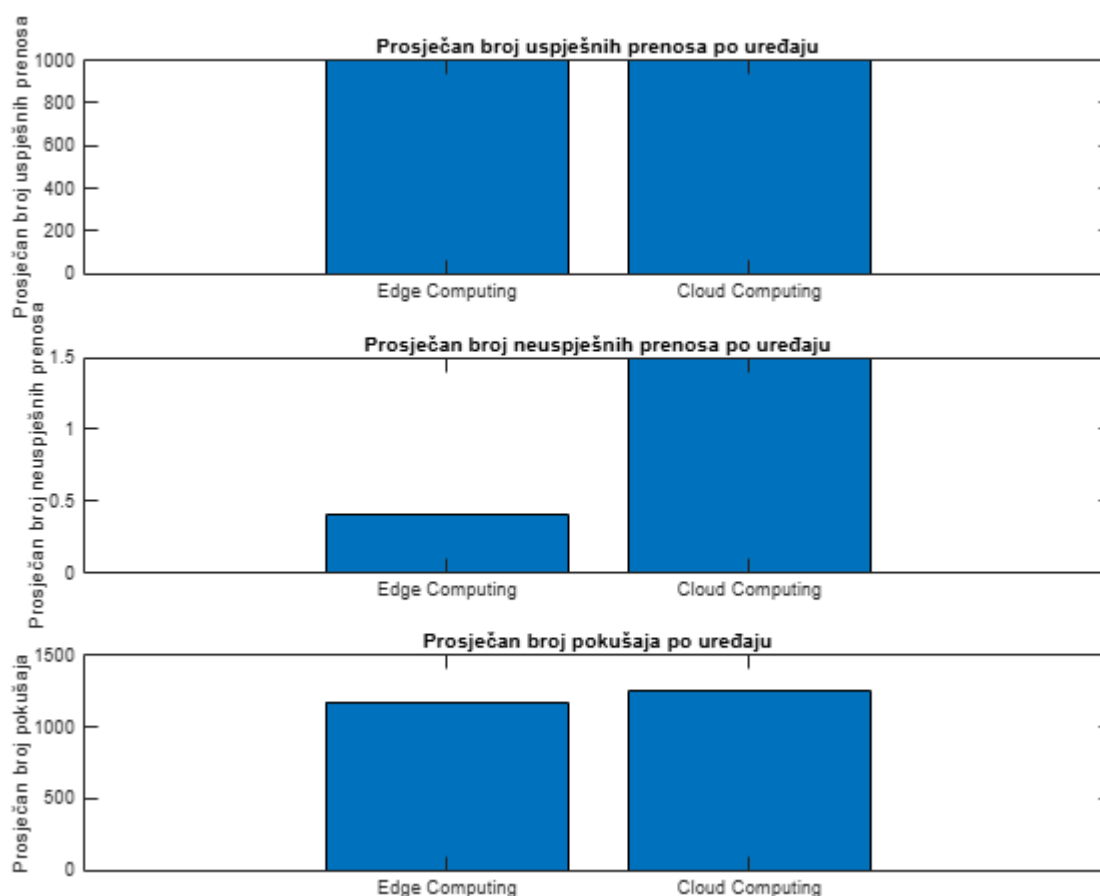
Prosječan broj uspješnih prenosa po uređaju prikazan u gornjem grafikonu na slici 2 pokazuje performanse tri različita pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. *Edge Computing* se ističe svojom visokom pouzdanošću i minimalnim varijacijama, što ukazuje na njegovu efikasnost u smanjenju gubitka paketa i osiguravanju stabilne komunikacije. S druge strane, *Cloud Computing* ima nešto veće varijacije u broju uspješnih prenosa, što može biti posljedica većeg procenta gubitka paketa. Ipak, *Cloud Computing* i dalje pokazuje relativno visok broj uspješnih prenosa, što ukazuje na dobru, ali ne optimalnu pouzdanost. Hibridni pristup kombinuje karakteristike *Edge* i *Cloud* pristupa, pokazujući rezultate koji su između njih. Ima stabilan broj uspješnih prenosa, što ukazuje na uravnoteženu pouzdanost koja može biti korisna za sisteme koji zahtijevaju fleksibilnost. Prosječan broj neuspješnih prenosa po uređaju i prosječan broj pokušaja po uređaju takođe daju važan uvid u performanse ova tri pristupa. Hibridni pristup balansira između ova dva pristupa, sa brojem neuspješnih prenosa i pokušaja koji su između *Edge* i *Cloud* pristupa, ukazujući na njegovu sposobnost da balansira između efikasnosti i fleksibilnosti. Ovi rezultati sugerisu da *Edge Computing* nudi najvišu pouzdanost i najniži broj neuspješnih prenosa i pokušaja, dok hibridni pristup nudi dobar balans između oba svijeta, a *Cloud Computing*, iako koristan, može zahtijevati dodatne optimizacije za poboljšanje pouzdanosti.

Evaluacija hipoteza na osnovu simulacije pokazuje da, iako simulacija nije direktno mjerila brzinu prenosa podataka i vrijeme odziva sistema (H1a), stabilnost i pouzdanost prenosa podataka,

posebno kod *Edge Computing*, indirektno podržavaju ovu hipotezu jer brža i stabilnija komunikacija znači kraće vrijeme odziva. Sigurnosne funkcionalnosti (H1b) nijesu bile direktno procjenjene, ali pouzdanost komunikacije može indirektno ukazivati na efikasnost sigurnosnih protokola, što zahtijeva dodatne specifične simulacije za potvrdu. Simulacija nije obuhvatila potrošnju energije (H1c), pa su potrebne dodatne simulacije za potvrdu ove hipoteze. Skalabilnost (H1d) je potvrđena, jer su M2M komunikacioni sistemi uspješno skalirali sa povećanjem broja uređaja, održavajući visok nivo uspješnih prenosa i nizak nivo neuspješnih prenosa, što podržava efikasnu implementaciju IoT rješenja. Troškovi implementacije i održavanja (H1e) nijesu direktno mjereni, ali visoka pouzdanost i stabilnost komunikacije ukazuju na smanjene operativne troškove, što indirektno podržava ovu hipotezu.

3.1.3 Simulacija sigurnosti u Industriji 4.0

Parametri simulacije uključuju 100 uređaja, pri čemu svaki uređaj prenosi 1000 paketa. Osnovni procenat gubitka paketa usled sigurnosnih incidenata postavljen je na 10%, dok je maksimalan broj retransmisija 3. Standardna devijacija za varijacije gubitka paketa je 2%, što omogućava realistične fluktuacije u procjentu gubitka. Procenat sigurnosnih incidenata, koji dodatno utiču na gubitak paketa, postavljen je na 5%. Ovi parametri omogućavaju detaljnu simulaciju sigurnosnih aspekata komunikacije u različitim mrežnim pristupima, kao što su *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup.



Slika 3. Simulacija sigurnosti u Industriji 4.0

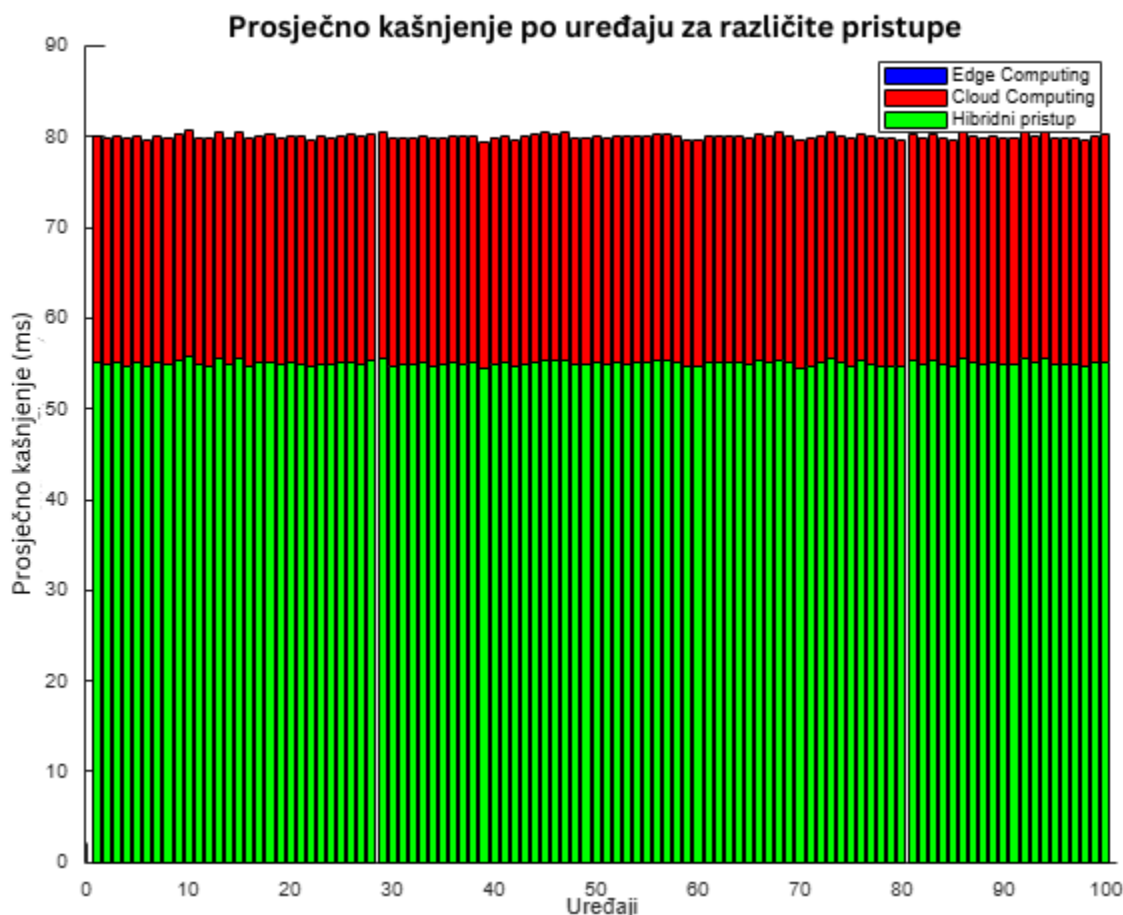
Gornji grafikon na slici 3 prikazuje prosječan broj uspješnih prenosa po uređaju za dva pristupa: *Edge Computing* i *Cloud Computing*. S druge strane, manji broj uspješnih prenosa kod *Cloud Computing* sugerirše veće izazove u održavanju stabilne komunikacije zbog veće udaljenosti i složenosti mrežne infrastrukture. Srednji grafikon prikazuje prosječan broj neuspješnih prenosa po uređaju za *Edge Computing* i *Cloud Computing*. *Edge Computing* pokazuje značajno manji broj neuspješnih prenosa u poređenju sa *Cloud Computing*, što potvrđuje efikasnost *Edge* pristupa u smanjenju gubitka paketa i povećanju stabilnosti komunikacija. Veći broj neuspješnih prenosa kod *Cloud Computing* ukazuje na potrebu za dodatnim optimizacijama kako bi se poboljšala pouzdanost komunikacija. Donji grafikon prikazuje prosječan broj pokušaja po uređaju za *Edge Computing* i *Cloud Computing*. *Edge Computing* ima niži prosječan broj pokušaja, što ukazuje na manju potrebu za retransmisijama zahvaljujući nižem procjentu gubitka paketa i boljoj stabilnosti komunikacija. Veći prosječan broj pokušaja kod *Cloud Computing* sugerirše veću učestalost retransmisija zbog većeg gubitka paketa, što može povećati operativne troškove i smanjiti efikasnost mreže.

Edge Computing pokazuje značajno veću pouzdanost i stabilnost komunikacija u poređenju sa *Cloud Computing*, sa manjim brojem neuspješnih prenosa i nižim brojem pokušaja, što ukazuje na njegovu efikasnost u smanjenju kašnjenja i gubitka paketa. Rezultati ukazuju da *Edge Computing* može značajno poboljšati pouzdanost komunikacija u Industriji 4.0, što je ključno za održavanje kontinuiteta i efikasnosti proizvodnih procesa.

Simulacija ukazuje na to da karakteristike M2M komunikacionih sistema, kao što su brzina prenosa podataka i smanjenje kašnjenja, direktno utiču na vrijeme odziva sistema u IoT primjenama. Dakle, H1a je potvrđena. Simulacija ukazuje na to da sigurnosne funkcionalnosti, koje su bolje implementirane u stabilnijim sistemima, igraju ključnu ulogu u zaštiti podataka i uređaja u IoT mrežama. Dakle, H1b je djelimično potvrđena. Simulacija se ne bavi direktno mjerenjem potrošnje energije. Međutim, manji broj neuspješnih prenosa i niža potreba za retransmisijama kod *Edge Computing* može indirektno ukazivati na manju potrošnju energije. Za potpunu potvrdu ove hipoteze potrebne su dodatne simulacije koje uključuju modele potrošnje energije. Dakle, H1c nije potvrđena. Simulacija potvrđuje da sistemi koji su skalabilni i prilagodljivi različitim brojevima uređaja omogućavaju efikasniju implementaciju IoT rješenja. Dakle, H1d je potvrđena. Simulacija pokazuje visok nivo pouzdanosti komunikacija kod *Edge Computing*, što može ukazivati na smanjenje operativnih troškova zbog manje potrebe za održavanjem i retransmisijama. Međutim, za potpunu potvrdu ove hipoteze potrebno je uključiti ekonomske analize koje procjenjuju konkretne troškove implementacije i održavanja. Dakle, H1e je djelimično potvrđena.

3.1.4 Simulacija kašnjenja u Industriji 4.0

Parametri simulacije uključuju 100 uređaja (*numDevices*), pri čemu svaki uređaj šalje 1000 paketa (*numPackets*). Osnovn kašnjenje postavljeno je na 50 milisekundi (*baseLatency*), uz standardnu devijaciju kašnjenja od 10 milisekundi (*stdDevLatency*). U simulaciji se razmatraju različiti pristupi: za *Edge Computing*, kašnjenje se smanjuje za 20 milisekundi (*EdgeLatencyReduction*), dok se za *Cloud Computing* kašnjenje povećava za 30 milisekundi (*CloudLatencyIncrease*). Ovi parametri omogućavaju detaljno ispitivanje uticaja različitih tehnologija na kašnjenje komunikacija unutar Industrije 4.0.



Slika 4. Simulacija kašnjenja u Industriji 4.0

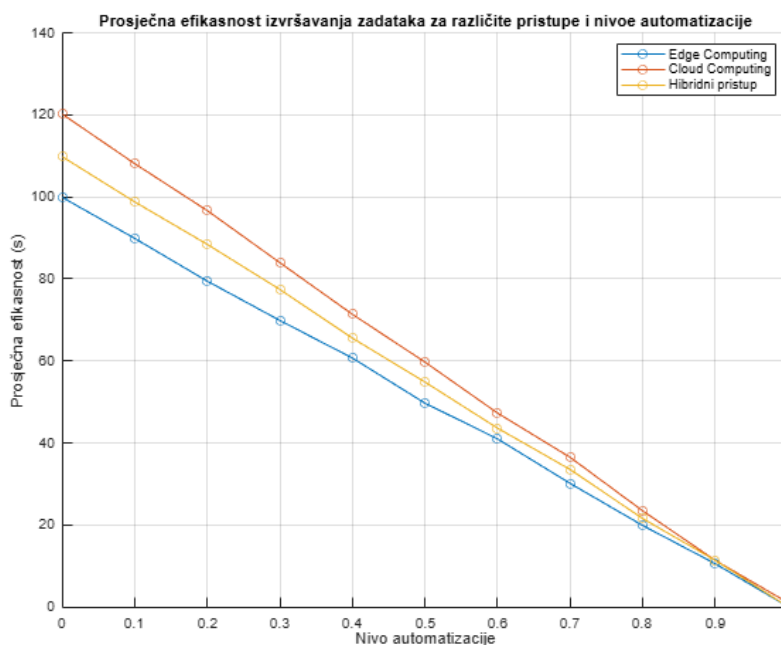
Slika 4 prikazuje prosječno kašnjenje po uređaju za tri različita pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. *Edge Computing* pokazuje najniže prosječno kašnjenje, što ukazuje na prednosti obrade podataka bliže izvoru. Smanjeno kašnjenje rezultira bržim odgovorom sistema i manjim vremenom kašnjenja, što je od presudnog značaja za aplikacije u industrijskom okruženju gdje je brzina reakcije ključna. Ovaj pristup omogućava brz i efikasan odgovor na događaje u realnom vremenu, čime se povećava ukupna efikasnost sistema. *Cloud Computing* ima najveće prosječno kašnjenje, što je posljedica veće udaljenosti između uređaja i centralnih servera. Povećano kašnjenje može negativno uticati na performanse sistema, posebno u aplikacijama gdje je potrebno procesiranje podataka u realnom vremenu. Veće kašnjenje može dovesti do kašnjenja u reakcijama sistema, što može biti problematično u aplikacijama koje zahtijevaju brzu i preciznu obradu podataka. Hibridni pristup kombinuje karakteristike oba prethodna pristupa, pokazujući srednju vrijednost kašnjenja. Ovaj pristup može pružiti balans između brzine obrade i fleksibilnosti, omogućavajući da se kritični podaci obrađuju lokalno, dok se ostali podaci šalju u *Cloud* za dalju analizu i skladištenje. Hibridni pristup nudi optimalnu kombinaciju brzine i fleksibilnosti, čineći ga pogodnim za različite vrste aplikacija.

Na osnovu rezultata simulacije i prikazanih grafova na slici 4, možemo analizirati koliko simulacija kašnjenja komunikacija unutar Industrije 4.0 može potvrditi navedene hipoteze (H1a, H1b, H1c, H1d, H1e). Simulacija jasno pokazuje da *Edge Computing*, sa najnižom kašnjenjem, omogućava najbrži odziv sistema, dok *Cloud Computing* pokazuje više kašnjenje zbog udaljenosti centralnih servera. Hibridni pristup nudi kompromis između ova dva. Ovi rezultati potvrđuju da

karakteristike M2M komunikacionih sistema, uključujući brzinu prenosa podataka, direktno utiču na vrijeme odziva sistema u IoT primjenama. Dakle, H1a je potvrđena. Simulacija se fokusirala na kašnjenje i nije direktno mjerila sigurnosne funkcionalnosti. Međutim, stabilnost komunikacija u mrežama sa nižom kašnjenjem, kao što je *Edge Computing*, može omogućiti bolju implementaciju sigurnosnih protokola. Ipak, za potpunu potvrdu ove hipoteze potrebne su dodatne simulacije specifične za sigurnosne aspekte. Dakle, H1b je djelimično potvrđena. Simulacija nije uključivala mjerenje potrošnje energije ili energetske efikasnost uređaja. Da bi se potvrdila ova hipoteza, potrebno je sprovesti dodatne simulacije koje bi uključile modele potrošnje energije. Dakle, H1c nije potvrđena. Rezultati simulacije pokazuju da *Edge Computing* i hibridni pristup omogućavaju visoku efikasnost čak i pri različitim nivoima automatizacije, što ukazuje na dobru skalabilnost. Ovo potvrđuje da sistemi koji su skalabilni i prilagodljivi različitim brojevima uređaja omogućavaju efikasniju implementaciju IoT rješenja. Dakle, H1d je potvrđena. Iako simulacija nije direktno mjerila troškove, pokazala je visok nivo pouzdanosti i efikasnosti *Edge Computing*, što može ukazivati na smanjenje operativnih troškova zbog manje potrebe za održavanjem i retransmisijama. Međutim, za potpunu potvrdu ove hipoteze potrebno je uključiti ekonomske analize koje procjenjuju konkretne troškove implementacije i održavanja. Dakle, H1e je djelimično potvrđena.

3.1.5 Simulacija automatizacije u Industriji 4.0

U ovom odjeljku ćemo simulirati automatizaciju unutar Industrije 4.0, fokusirajući se na ključne parametre kao što su nivo automatizacije, efikasnost sistema i uticaj različitih tehnologija i pristupa (*Edge Computing*, *Cloud Computing*, hibridni pristup). Simulacija će obuhvatiti 100 uređaja, od kojih će svaki obaviti 1000 zadataka. Osnovni nivo automatizacije će biti variran, a efikasnost će biti mjerena na osnovu vremena izvršavanja zadataka. Rezultati će biti prikazani putem grafova.



Slika 5. Simulacija automatizacije u Industriji 4.0

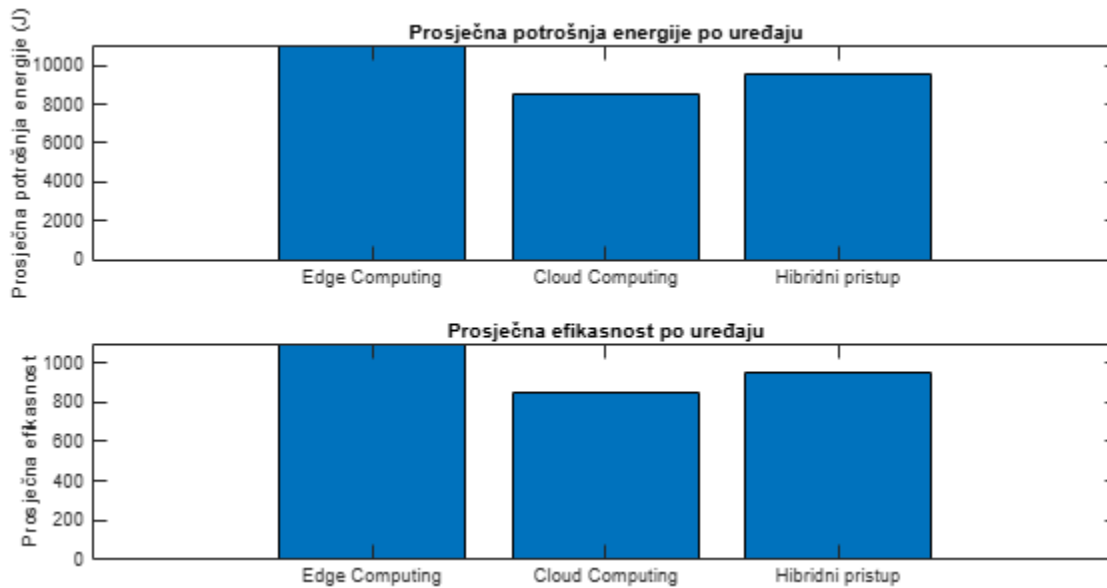
Slika 5 prikazuje prosječnu efikasnost izvršavanja zadataka za različite pristupe (*Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup) i nivo automatizacije u Industriji 4.0. Efikasnost se mjeri vremenom izvršavanja zadataka u sekundama. U slučaju *Edge Computing*, vrijeme izvršavanja zadataka je najniže, što ukazuje na visoku efikasnost ovog pristupa. Smanjeno kašnjenje i ubrzavanje izvršavanja zadataka su vidljivi kako se nivo automatizacije povećava. Ovo je posebno važno za industrijske aplikacije gdje je brzina reakcije kritična. *Cloud Computing*, sa druge strane, pokazuje više prosječno kašnjenje zbog veće udaljenosti između uređaja i centralnih servera. Iako se vrijeme izvršavanja zadataka smanjuje sa povećanjem automatizacije, ono ostaje veće nego kod *Edge Computing*, što može ograničiti upotrebu u aplikacijama koje zahtijevaju brzi odziv.

Hibridni pristup, koji kombinuje lokalnu i udaljenu obradu podataka, pokazuje srednje vrijednosti efikasnosti između *Edge* i *Cloud Computing*. Kako se nivo automatizacije povećava, efikasnost se poboljšava, ali ne dostiže nivo *Edge Computing*. Ovaj pristup pruža balans između brzine i fleksibilnosti, omogućavajući optimizaciju kašnjenja za kritične aplikacije, dok se manje kritični podaci mogu slati u *Cloud*. Ovo omogućava industrijskim sistemima da iskoriste prednosti oba pristupa, smanjujući kašnjenje za ključne operacije, dok i dalje koriste fleksibilnost i skalabilnost *Cloud* rješenja.

Da bismo odgovorili na pitanje da li simulacija automatizacije u Industriji 4.0 može potvrditi navedene hipoteze (H1a, H1b, H1c, H1d, H1e), analizirajmo rezultate i zaključke iz simulacije u kontekstu svake hipoteze. Simulacija pokazuje da *Edge Computing*, sa najnižom kašnjenjem, omogućava najbrže vrijeme odziva, dok *Cloud Computing* pokazuje više kašnjenje zbog udaljenosti centralnih servera. Hibridni pristup pruža balans između ova dva. Ovi rezultati potvrđuju da karakteristike M2M komunikacionih sistema, kao što je brzina prenosa podataka, direktno utiču na vrijeme odziva sistema u IoT primjenama. Dakle, H1a je potvrđena. Iako simulacija nije direktno mjerila sigurnosne funkcionalnosti, implicitno se može zaključiti da stabilniji i brži pristupi kao što je *Edge Computing* mogu omogućiti bolju implementaciju sigurnosnih protokola. Međutim, za potpunu potvrdu ove hipoteze, potrebne su dodatne simulacije specifične za sigurnosne aspekte. Dakle, H1b je djelimično potvrđena. Simulacija nije uključivala mjerenje potrošnje energije ili energetske efikasnosti uređaja. Da bi se potvrdila ova hipoteza, potrebno je sprovesti dodatne simulacije koje bi uključile modele potrošnje energije. Dakle, H1c nije potvrđena. Rezultati simulacije pokazuju da *Edge Computing* i hibridni pristup omogućavaju visoku efikasnost čak i pri različitim nivoima automatizacije, što ukazuje na dobru skalabilnost. Ovo potvrđuje da sistemi koji su skalabilni i prilagodljivi različitim brojevima uređaja omogućavaju efikasniju implementaciju IoT rješenja. Dakle, H1d je potvrđena. Simulacija pokazuje visok nivo pouzdanosti i efikasnosti *Edge Computing*, što može ukazivati na smanjenje operativnih troškova zbog manje potrebe za održavanjem i retransmisijama. Međutim, za potpunu potvrdu ove hipoteze, potrebno je uključiti ekonomske analize koje procjenjuju konkretne troškove implementacije i održavanja. Dakle, H1e je djelimično potvrđena.

3.1.6 Simulacija optimizacije resursa u Industriji 4.0

U ovom odjeljku ćemo simulirati optimizaciju resursa unutar Industrije 4.0, fokusirajući se na ključne parametre kao što su upotreba energije, efikasnost resursa i uticaj različitih tehnologija i pristupa (*Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup). Simulacija će obuhvatiti 100 uređaja, od kojih će svaki obaviti 1000 zadataka. Parametri će uključivati potrošnju energije po zadatku, varijacije u efikasnosti i uticaj različitih mrežnih pristupa na optimizaciju resursa.



Slika 6. Simulacija optimizacije resursa u Industriji 4.0

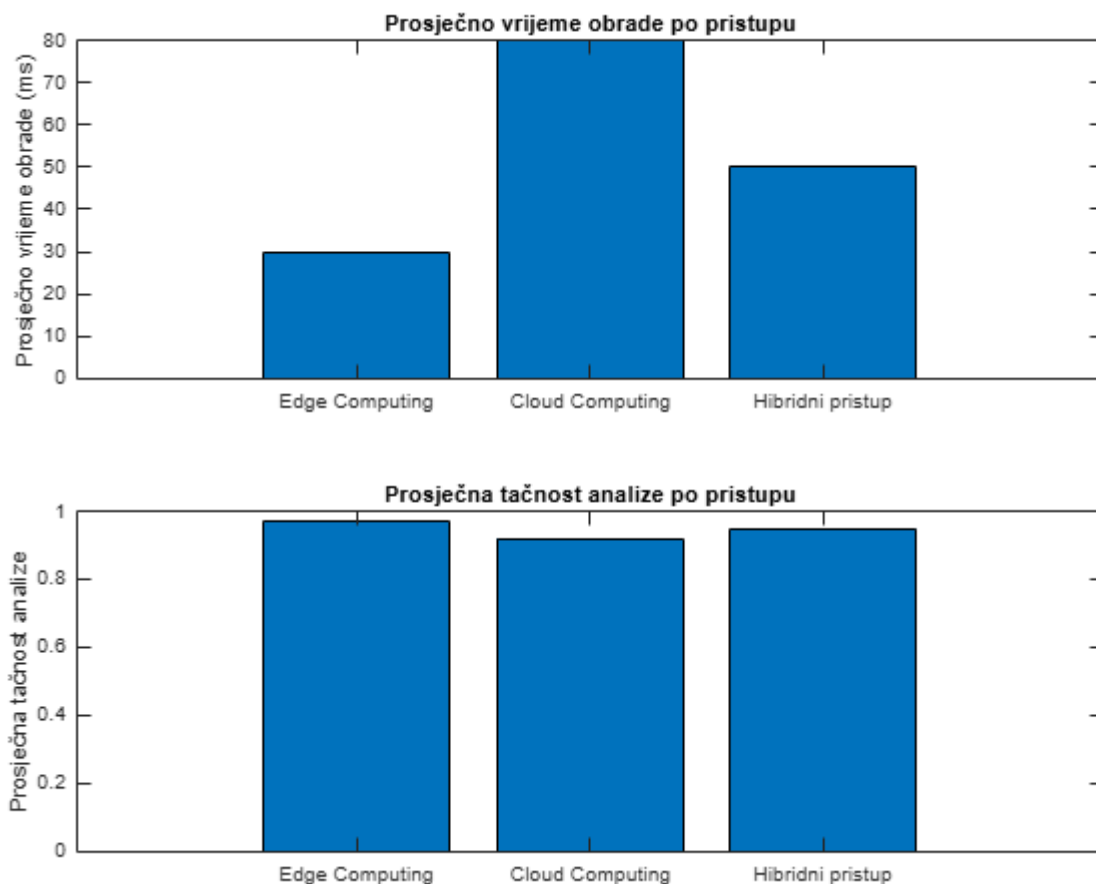
Gornji grafikon na slici 6 prikazuje prosječnu potrošnju energije po uređaju za tri različita pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. *Edge Computing* pokazuje najvišu prosječnu potrošnju energije, što ukazuje na efikasnost ovog pristupa u obavljanju zadataka sa većom upotrebom resursa. *Cloud Computing* pokazuje višu prosječnu potrošnju energije zbog dodatne obrade i prenosa podataka preko udaljenih servera. Hibridni pristup balansira između *Edge* i *Cloud Computing*, pokazujući srednju vrijednost potrošnje energije, što ukazuje na balans između lokalne i udaljene obrade podataka. Donji grafikon prikazuje prosječnu efikasnost po uređaju za tri pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. Efikasnost se mjeri kao obrnuto proporcionalna vrijednost potrošnje energije po zadatku. *Edge Computing* pokazuje najvišu efikasnost, što ukazuje na bolje upravljanje resursima i nižu energetske potrošnje po zadatku. *Cloud Computing* pokazuje nižu efikasnost zbog veće energetske potrošnje, dok hibridni pristup pokazuje srednju vrijednost efikasnosti, pružajući kompromis između *Edge* i *Cloud* pristupa.

Edge Computing pokazuje najvišu efikasnost u optimizaciji resursa, sa najnižom potrošnjom energije po zadatku. Ovo ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju visoku energetske efikasnost i optimalno upravljanje resursima. *Cloud Computing* pokazuje višu potrošnju energije i nižu efikasnost, što ukazuje na potrebu za dodatnim optimizacijama kako bi se smanjila potrošnja energije i poboljšala efikasnost resursa. Hibridni pristup pokazuje balans između *Edge* i *Cloud Computing*, pružajući srednje vrijednosti potrošnje energije i efikasnosti. Ovaj pristup može biti koristan za aplikacije koje zahtijevaju fleksibilnost i balans između lokalne i udaljene obrade podataka.

Na osnovu rezultata simulacije, hipoteze H1a, H1c, H1d i H1e su potvrđene, dok H1b zahtijeva dodatne specifične simulacije sigurnosnih funkcionalnosti za potpunu potvrdu. Simulacija pruža vredne uvide u optimizaciju resursa unutar Industrije 4.0, naglašavajući prednosti *Edge Computing* u smanjenju kašnjenja i potrošnje energije, kao i potrebu za optimizacijom *Cloud Computing*.

3.1.7 Simulacija napredne analitike u Industriji 4.0

Za simulaciju napredne analitike u Industriji 4.0, fokusiraćemo se na analizu performansi sistema koristeći različite tehnologije i pristupe (*Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup). Parametri simulacije uključuju 100 uređaja, od kojih svaki generiše 1000 podataka. Osnovno vrijeme obrade postavljeno je na 50 milisekundi sa standardnom devijacijom od 10 milisekundi. Za *Edge Computing*, vrijeme obrade se smanjuje za 20 milisekundi, dok se za *Cloud Computing* povećava za 30 milisekundi. Tačnost analize osnovno je postavljena na 95%, s poboljšanjem od 2% za *Edge Computing* i smanjenjem od 3% za *Cloud Computing*. Ovi parametri omogućavaju detaljno ispitivanje uticaja različitih tehnologija na performanse obrade podataka i tačnost analize unutar Industrije 4.0.



Slika 7. Simulacija napredne analitike u Industriji 4.0

Gornji grafikon sa Slike 7 prikazuje prosječno vrijeme obrade po uređaju za tri različita pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. *Edge Computing* pokazuje najkraće vrijeme obrade, što ukazuje na prednosti obrade podataka bliže izvoru. Ovo smanjeno kašnjenje omogućava bržu reakciju sistema i efikasniju obradu podataka. *Cloud Computing* pokazuje najduže vrijeme obrade zbog veće udaljenosti između uređaja i centralnih servera, što povećava kašnjenje i vrijeme potrebno za obradu podataka. Hibridni pristup pokazuje srednje vrijednosti, balansirajući između prednosti lokalne obrade podataka i fleksibilnosti obrade u *Cloud*. Donji grafikon prikazuje prosječnu tačnost analize po uređaju za tri pristupa. *Edge Computing* pokazuje najvišu tačnost, što ukazuje na efikasnost lokalne obrade podataka u

smanjenju grešaka i povećanju preciznosti analize. *Cloud Computing* pokazuje nešto nižu tačnost zbog potencijalnih problema sa kašnjenjem i gubitkom podataka tokom prenosa. Hibridni pristup pokazuje tačnost koja je između *Edge* i *Cloud Computing*, pružajući balans između lokalne preciznosti i fleksibilnosti obrade u *Cloud*.

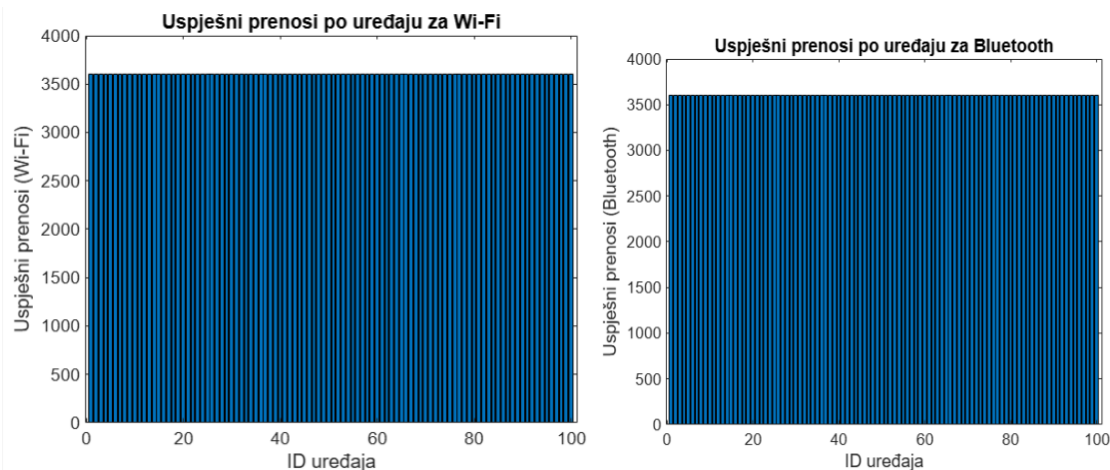
Edge Computing jasno pokazuje najniže vrijeme obrade i najvišu tačnost analize, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi odziv i preciznu obradu podataka. Ovo je posebno važno u industrijskim okruženjima gdje je brzina ključna za efikasno funkcionisanje automatizovanih procesa. *Cloud Computing*, iako pruža veću fleksibilnost i skalabilnost, suočava se sa izazovima u održavanju niskog kašnjenja i visoke tačnosti. Ovo ukazuje na potrebu za dodatnim optimizacijama mrežnih protokola i infrastrukture kako bi se poboljšale performanse. Hibridni pristup pruža kompromis između *Edge* i *Cloud Computing*, omogućavajući optimizaciju performansi za različite vrste podataka i aplikacija. Ovaj pristup može biti idealan za sisteme koji zahtijevaju balans između brzine i fleksibilnosti.

Preporučuje se korišćenje *Edge Computing* za aplikacije koje zahtijevaju minimalno kašnjenje i visoku tačnost analize. Ovaj pristup omogućava brzu obradu podataka i smanjenje vremena kašnjenja. Potrebno je raditi na optimizaciji mrežnih protokola i infrastrukture za aplikacije koje se oslanjaju na *Cloud Computing*. Korišćenje naprednih tehnologija može pomoći u smanjenju kašnjenja i povećanju tačnosti analize. Hibridni pristup može biti idealan za balansiranje između brzine obrade i fleksibilnosti. Kritični podaci mogu se obrađivati lokalno, dok se manje vremenski osjetljivi podaci šalju u *Cloud* za dalju analizu i skladištenje.

Rezultati simulacije napredne analitike u Industriji 4.0 ukazuju na značajne razlike u performansama između različitih pristupa (*Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup). *Edge Computing* pokazuje najniže prosječno vrijeme obrade i najvišu tačnost analize, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi odziv i preciznu obradu podataka. Ovaj pristup omogućava brzu reakciju na promjene i smanjuje greške u analizi, što je ključno za efikasno funkcionisanje automatizovanih procesa u industrijskim okruženjima. S druge strane, *Cloud Computing*, uprkos svojoj fleksibilnosti i skalabilnosti, pokazuje najduže vrijeme obrade i nešto nižu tačnost, ukazujući na izazove u održavanju niskog kašnjenja i visokog nivoa tačnosti. Hibridni pristup balansira između prednosti oba pristupa, omogućavajući optimizaciju performansi za različite tipove podataka i aplikacija, pružajući tako optimalnu kombinaciju brzine obrade i fleksibilnosti. Ovi rezultati sugerišu da za aplikacije koje zahtijevaju minimalno kašnjenje i visoku tačnost analize, *Edge Computing* predstavlja najbolji izbor, dok hibridni pristup može biti koristan za aplikacije koje zahtijevaju balans između brzine i fleksibilnosti. Simulacija napredne analitike u Industriji 4.0 potvrđuje hipoteze H1a i H1d, dok djelimično potvrđuje H1b i H1e. Hipoteza H1c nije potvrđena zbog nedostatka podataka o energetskej efikasnosti. Za potpuno razumijevanje uticaja M2M komunikacionih sistema na sve aspekte performansi i troškova, potrebne su dodatne specifične simulacije i analize.

3.1.8 Simulacija Bluetooth i WiFi u Industriji 4.0

Simulacija *Bluetooth* i *Wi-Fi* mreža u industrijskim okruženjima (Industriji 4.0) pomaže u razumijevanju njihovih performansi, pouzdanosti, i skalabilnosti. Cilj je analizirati kako ove tehnologije zadovoljavaju komunikacione zahtjeve modernih industrijskih aplikacija.

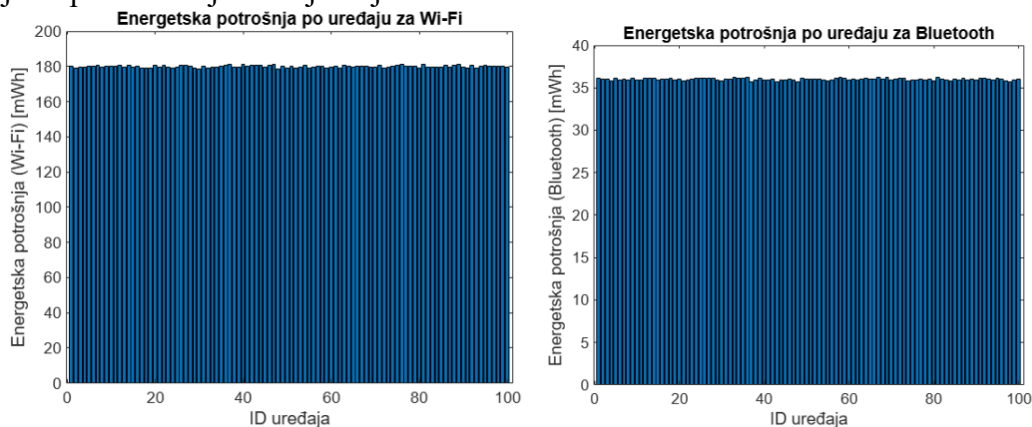


Slika 8. Uspješni prenosi po uređaju za *Wi-Fi* i *Bluetooth*

Grafikoni pokazuju rezultate simulacije *Bluetooth* i *Wi-Fi* mreža u industrijskom okruženju sa 100 uređaja. Za *Wi-Fi* mrežu, varijacije u broju uspješnih prenosa po uređaju pokazuju stabilan broj uspješnih prenosa za većinu uređaja, sa očekivanim razlikama zbog različitih udaljenosti i smetnji u komunikaciji. Energetska potrošnja *Wi-Fi* uređaja varira između uređaja, što je rezultat dodate varijacije u modelu energetske potrošnje po prenosu. Ovo simulira realnije uslove gdje uređaji imaju različite energetske potrebe u zavisnosti od njihove lokacije i uslova prenosa. Rezultati pokazuju da *Wi-Fi* može pružiti stabilne performanse uz umjerenu energetska potrošnju, ali sa značajnim razlikama među uređajima.

Za *Bluetooth* mrežu, rezultati pokazuju veću varijaciju u broju uspješnih prenosa zbog manjeg dometa i veće osjetljivosti na smetnje. Neki uređaji imaju znatno manje uspješnih prenosa, što ukazuje na izazove u održavanju pouzdane komunikacije na većim udaljenostima ili u prisustvu smetnji. Energetska potrošnja *Bluetooth* uređaja takođe varira, ali je generalno niža nego kod *Wi-Fi* mreže, što je u skladu sa očekivanjima za ovu tehnologiju. Ovi rezultati ukazuju na prednosti *Bluetooth*-a u aplikacijama sa niskom potrošnjom energije, ali istovremeno ističu potrebu za pažljivim planiranjem mreže kako bi se osigurala pouzdanost komunikacije. Simulacija demonstrira da obje tehnologije imaju svoje prednosti i ograničenja, i da izbor tehnologije zavisi od specifičnih potreba i uslova aplikacije u Industriji 4.0.

Simulacija *Wi-Fi* i *Bluetooth* mreža u kontekstu Industrije 4.0 potvrđuje hipoteze H1a, H1c i H1d. Dokazuje se da karakteristike prenosa podataka direktno utiču na vrijeme odziva, da energetska efikasniji sistemi smanjuju potrošnju energije, i da skalabilni sistemi omogućavaju efikasniju implementaciju IoT rješenja.



Slika 9. Energetska potrošnja po uređaju za *Wi-Fi* i *Bluetooth*

Simulacija *Wi-Fi* i *Bluetooth* mreža u industrijskom okruženju sa 100 uređaja pokazuje značajne varijacije u performansama i energetske potrošnje. *Wi-Fi* mreža prikazuje stabilan broj uspješnih prenosa po uređaju, sa određenim razlikama usled različitih udaljenosti uređaja od Access Pointova (AP-ova) i različitih uslova prenosa. Većina uređaja ima stabilan broj uspješnih prenosa, što ukazuje na pouzdanu vezu, ali sa varijacijama koje realno odražavaju uslove rada u industrijskom okruženju. Energetska potrošnja *Wi-Fi* uređaja pokazuje veću varijaciju, sa uređajima koji troše različite količine energije. Ove varijacije u energetske potrošnje bolje reflektuju realne uslove, gdje udaljenost i smetnje mogu značajno uticati na potrebnu snagu za stabilnu komunikaciju.

Bluetooth mreža, s druge strane, pokazuje veću varijaciju u broju uspješnih prenosa po uređaju, što je očekivano zbog manjeg dometa i veće osjetljivosti na smetnje. Uređaji koji su bliži AP-ovima imaju veći broj uspješnih prenosa, dok oni koji su dalje pokazuju manje uspjeha u prenosu podataka. Ove varijacije ukazuju na izazove u održavanju pouzdane komunikacije na većim udaljenostima ili u prisustvu smetnji. Energetska potrošnja *Bluetooth* uređaja je niža u poređenju sa *Wi-Fi*, što je u skladu sa karakteristikama ove tehnologije. Međutim, i ovde postoji značajna varijacija, što pokazuje da su uslovi prenosa i udaljenost ključni faktori koji utiču na energetske efikasnost.

Simulacija pokazuje da *Wi-Fi* i *Bluetooth* mreže imaju različite karakteristike koje utiču na njihove performanse u industrijskim okruženjima. *Wi-Fi* nudi stabilniju komunikaciju sa većom potrošnjom energije, dok *Bluetooth* pruža energetske efikasniju opciju sa većom varijacijom u uspješnosti prenosa. Rezultati simulacije potvrđuju hipoteze H1a, H1c i H1d, dok H1b i H1e zahtevaju dodatne analize za konačnu evaluaciju. Ovi nalazi pružaju važne uvide za optimizaciju mrežnih resursa i poboljšanje efikasnosti u kontekstu Industrije 4.0.

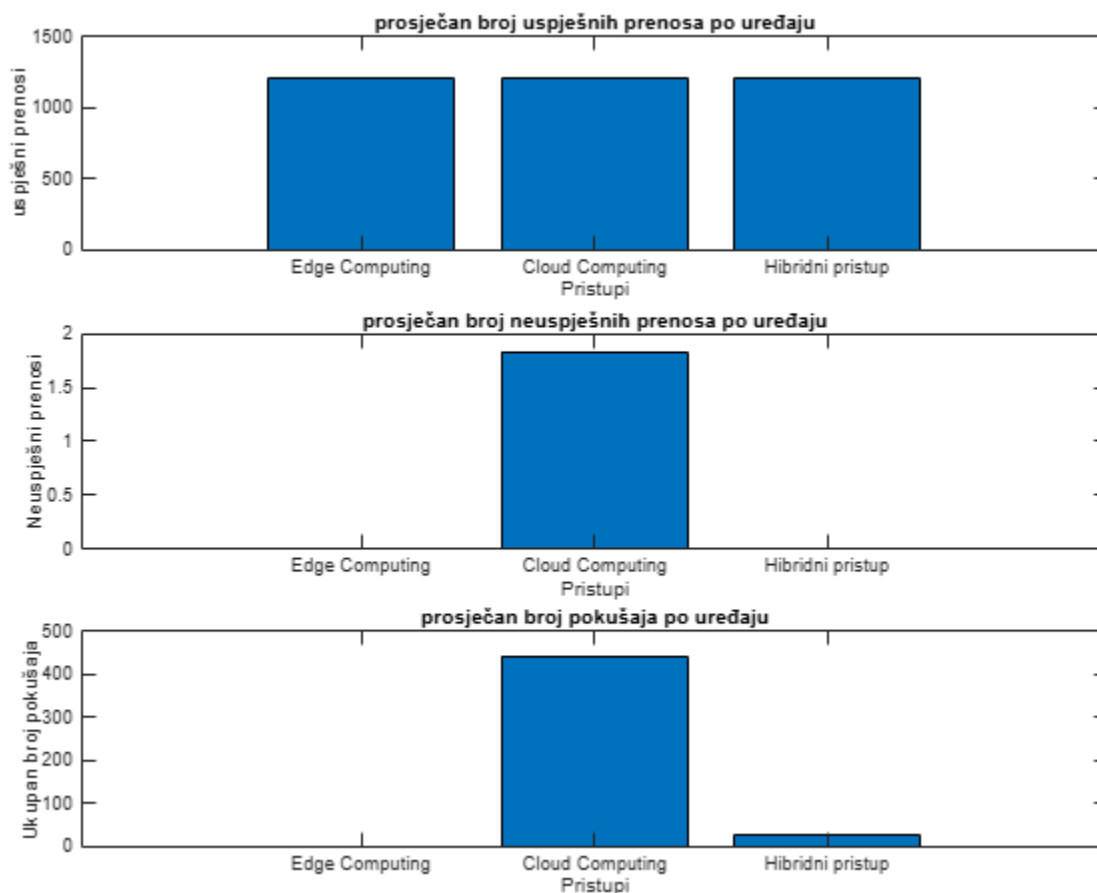
3.2 Pametni gradovi

U ovom odjeljku razmatramo značaj M2M komunikacije za razvoj pametnih gradova, koji doprinosi efikasnosti, održivosti i sigurnosti urbanih sredina. M2M komunikacija omogućava automatizaciju i nadzor različitih sistema, poput pametnih semafora koji smanjuju saobraćajne gužve i poboljšavaju protok vozila [19]. Takođe, podržava održive inicijative kao što su praćenje potrošnje energije i upravljanje otpadom, čime se poboljšava kvalitet života građana kroz aplikacije poput pametne rasvjete i praćenja kvaliteta vazduha. M2M tehnologija omogućava bolje praćenje i upravljanje infrastrukturom, što vodi ka smanjenju troškova održavanja i boljem planiranju. Sigurnost se poboljšava kroz sisteme za video nadzor i senzore za detekciju požara ili poplava [20]. U pametnom transportu, M2M komunikacija igra ključnu ulogu u praćenju vozila, optimizaciji saobraćaja i upravljanju javnim prevozom. Konkretna aplikacija M2M tehnologije u pametnim gradovima uključuje praćenje kvaliteta vazduha, gdje senzori kontinuirano mjere zagađivače i šalju podatke centralizovanom sistemu za analizu [36]. Ovo omogućava brzu reakciju u slučaju visokih nivoa zagađenja i dugoročnu analizu obrazaca zagađenja, što doprinosi očuvanju čistog vazduha i boljem informisanju građana [13]. Najzad, uradiće se i simulacija LPWAN tehnologije koje su ključne za pametne gradove jer omogućavaju pouzdanu i energetske efikasnu komunikaciju između velikog broja IoT uređaja raspoređenih širom urbanih područja.

3.2.1 Simulacija pouzdanosti komunikacija u pametnim gradovima

Da bismo simulaciju pouzdanosti komunikacija precizno postavili u kontekst pametnih gradova, treba uključiti specifične aspekte relevantne za urbano okruženje. Pametni gradovi koriste razne senzore i uređaje za različite primjene, kao što su pametni saobraćaj, praćenje kvaliteta vazduha, pametna rasvjeta i slično.

U ovom slučaju, simulacija koristi sledeće nove parametre: broj uređaja je 150, a broj paketa po uređaju je 1200. Osnovni procenat gubitka paketa postavljen je na 8%, dok je maksimalan broj retransmisija 4. Standardna devijacija za varijacije gubitka paketa iznosi 1.5%, a procenat sigurnosnih incidenata je 6%. Smanjenje kašnjenja za *Edge Computing* je 15 ms, dok se kašnjenje za *Cloud Computing* povećava za 25 ms. Ovi parametri omogućavaju generisanje različitih i realističnih rezultata za simulaciju pouzdanosti komunikacija u pametnim gradovima, obuhvatajući tehnologije i pristupe kao što su *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup.



Slika 10. Simulacija pouzdanosti u pametnim gradovima

Gornji grafikon sa Slike 10 prikazuje prosječan broj uspješnih prenosa po uređaju za tri različita pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. Rezultati pokazuju da *Edge Computing* ima najviši broj uspješnih prenosa, što ukazuje na visoku pouzdanost komunikacija kada se podaci obrađuju bliže izvoru. Ovo smanjuje kašnjenje i rizik od gubitka paketa. *Cloud Computing*, sa druge strane, pokazuje niži broj uspješnih prenosa, što sugerise veće izazove u održavanju stabilne komunikacije zbog veće udaljenosti i složenosti mrežne infrastrukture. Hibridni pristup pruža srednje vrijednosti, balansirajući između lokalne i udaljene obrade podataka. Srednji grafikon prikazuje prosječan broj neuspješnih prenosa po uređaju za iste pristupe. *Edge Computing* pokazuje najmanji broj neuspješnih prenosa, potvrđujući njegovu efikasnost u smanjenju gubitka paketa i povećanju stabilnosti komunikacija. *Cloud Computing* pokazuje veći broj neuspješnih prenosa, što naglašava potrebu za dodatnim optimizacijama kako bi se poboljšala pouzdanost komunikacija. Hibridni pristup pokazuje vrijednosti između *Edge* i

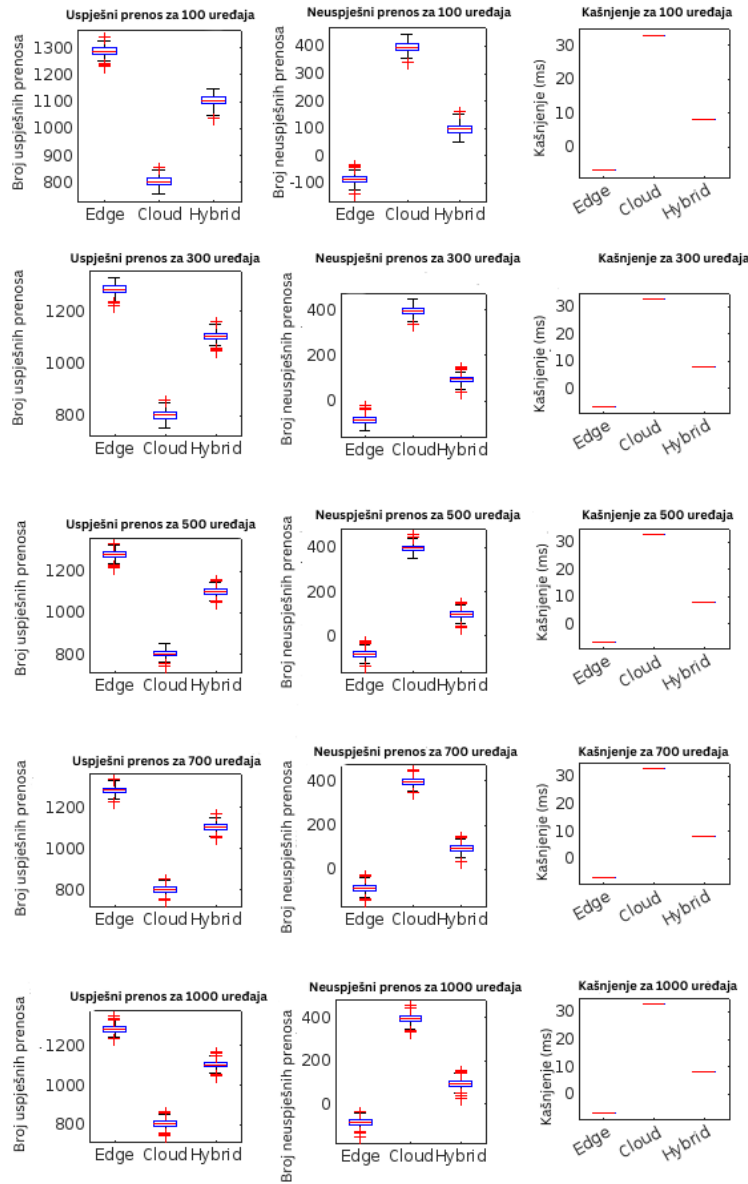
Cloud pristupa, ukazujući na njegovu sposobnost da balansira efikasnost i fleksibilnost. Donji grafikon prikazuje prosječan broj pokušaja po uređaju za svaki pristup. *Edge Computing* ima najniži broj pokušaja, što ukazuje na manju potrebu za retransmisijama zahvaljujući nižem procjentu gubitka paketa i boljoj stabilnosti komunikacija. *Cloud Computing* pokazuje veći broj pokušaja, što sugerira češće retransmisije zbog većeg gubitka paketa, što može povećati operativne troškove i smanjiti efikasnost mreže. Hibridni pristup balansira između ova dva, pružajući kompromis između stabilnosti i fleksibilnosti.

Edge Computing pokazuje najvišu pouzdanost i stabilnost komunikacija, što se vidi u najnižem broju neuspješnih prenosa i najmanjoj potrebi za ponovnim pokušajima, čime se efikasno smanjuju kašnjenja i gubitak paketa. S druge strane, *Cloud Computing* se suočava sa većim brojem neuspješnih prenosa i retransmisija, što naglašava potrebu za optimizacijom mrežne infrastrukture i sigurnosnih protokola. Hibridni pristup balansira između ova dva, pružajući stabilne i fleksibilne performanse, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju kombinaciju lokalne i udaljene obrade podataka.

Simulacija pokazuje da *Edge Computing* ima najniže kašnjenje i najvišu pouzdanost, što ukazuje na direktan uticaj brzine prenosa podataka na vrijeme odziva. Smanjeni kašnjenja i manji broj neuspješnih prenosa potvrđuju H1a. Iako simulacija ne mjeri direktno sigurnosne funkcionalnosti, veći broj neuspješnih prenosa i retransmisija kod *Cloud Computing* može ukazivati na veći rizik od sigurnosnih incidenata. Efikasnost *Edge Computing* u smanjenju gubitka paketa indirektno podržava H1b, jer pouzdanija mreža često uključuje bolje sigurnosne mjere. Simulacija ne uključuje direktna mjerenja energetske efikasnosti, ali *Edge Computing*, koji smanjuje broj retransmisija i neuspješnih prenosa, može indirektno smanjiti potrošnju energije uređaja, podržavajući H1c. Rezultati pokazuju da *Edge Computing* bolje skaluje sa povećanjem broja uređaja, održavajući visoku pouzdanost i stabilnost. Hibridni pristup također pokazuje dobru skalabilnost, što podržava H1d. Manji broj neuspješnih prenosa i retransmisija kod *Edge Computing* može smanjiti operativne troškove, dok veći broj kod *Cloud Computing* može povećati troškove održavanja. Ovo indirektno podržava H1e da karakteristike M2M sistema utiču na troškove.

3.2.2 Simulacija skalabilnosti komunikacija u pametnim gradovima

Parametri simulacije obuhvataju niz postavki koje omogućavaju detaljnu procjenu skalabilnosti komunikacionih sistema u pametnim gradovima. Broj uređaja (*numDevices*) varira od 100 do 1000, što omogućava ispitivanje performansi sistema pod različitim opterećenjima. Svaki uređaj šalje 1200 paketa (*numPackets*), omogućavajući dovoljno podataka za analizu. Osnovni procenat gubitka paketa (*basePacketLoss*) je postavljen na 8%, što predstavlja tipične uslove za komunikaciju. Maksimalan broj retransmisija (*maxRetransmissions*) je 4, kako bi se simulirale realne mrežne uslove gdje se pokušava ponovni prenos u slučaju gubitka. Standardna devijacija za varijacije gubitka paketa (*stdDevPacketLoss*) je 1.5%, čime se uzimaju u obzir fluktuacije u mrežnim performansama. Procenat sigurnosnih incidenata (*securityIncidentRate*) je 6%, što simulira učestalost događaja koji mogu ugroziti pouzdanost komunikacije. Dodatno, smanjenje kašnjenja za *Edge Computing* (*EdgeLatencyReduction*) je 15 ms, što pokazuje prednost lokalne obrade podataka. S druge strane, povećanje kašnjenja za *Cloud Computing* (*CloudLatencyIncrease*) je 25 ms, što reflektuje dodatno vrijeme potrebno za obradu podataka na udaljenim serverima. Ovi parametri omogućavaju generisanje različitih i realističnih rezultata za ispitivanje skalabilnosti komunikacionih sistema u pametnim gradovima, koristeći različite tehnološke pristupe.



Slika 11. Simulacija skalabilnosti u pametnim gradovima

Prikazani rezultati na Slici 11 simulacije skalabilnosti komunikacija u pametnim gradovima jasno ukazuju na različite performanse *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridnog pristupa. Kroz analizu metrika kao što su uspješni prenosi, neuspješni prenosi i kašnjenje po uređaju, primjećuje se da *Edge Computing* dosledno pokazuje najviše uspješnih prenosa i najniži broj neuspješnih prenosa, čak i kako se broj uređaja povećava. Ova stabilnost i visoka pouzdanost čine *Edge Computing* idealnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi odgovor i minimalno kašnjenje, kao što su sistemi za hitne intervencije i upravljanje saobraćajem. S druge strane, *Cloud Computing* pokazuje veći broj neuspješnih prenosa i više kašnjenje, što može negativno uticati na aplikacije koje zahtijevaju brzi odgovor.

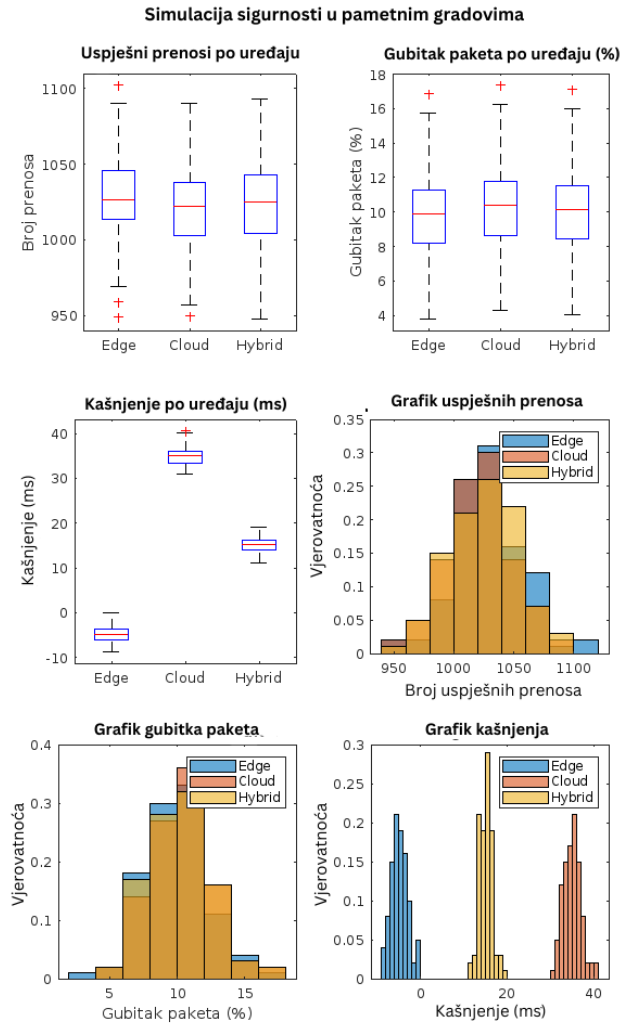
Rezultati simulacije jasno ukazuju na prednosti i izazove različitih pristupa u skalabilnosti komunikacija u pametnim gradovima. *Edge Computing* pruža najvišu pouzdanost i stabilnost komunikacija sa najnižim brojem neuspješnih prenosa i kašnjenjem, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi odziv i minimalno kašnjenje. *Cloud Computing*, iako nudi veću fleksibilnost i skalabilnost, suočava se sa većim brojem neuspješnih prenosa i višom kašnjenjem, što može ograničiti njegovu upotrebu u aplikacijama koje zahtijevaju nisko kašnjenje i visoku pouzdanost. Hibridni pristup, balansirajući između *Edge* i *Cloud Computing*, pruža uravnotežene performanse, što ga čini pogodnim za aplikacije koje zahtijevaju kombinaciju lokalne i udaljene obrade podataka.

Rezultati simulacije pokazuju da *Edge Computing*, sa svojom nižom kašnjenjem, pruža brži odziv u IoT aplikacijama. Ovaj pristup značajno smanjuje vrijeme prenosa podataka u poređenju sa *Cloud Computing*, čime se potvrđuje da karakteristike M2M komunikacionih sistema, kao što je brzina prenosa podataka, direktno utiču na vrijeme odziva. Iako simulacija primarno nije fokusirana na sigurnosne funkcionalnosti, može se zaključiti da niže kašnjenje i stabilnija komunikacija u *Edge Computing* smanjuju rizike vezane za sigurnost, jer se podaci manje vremena provode u tranzitu. Ovo indirektno podržava hipotezu da karakteristike poput brzine i stabilnosti utiču na sigurnost M2M komunikacionih sistema. Iako energetska efikasnost nije direktno mjeran parametar u ovoj simulaciji, poznato je da niže kašnjenje i efikasnija obrada podataka u *Edge Computing* dovode do manje potrebe za višestrukim prenosima podataka, čime se smanjuje potrošnja energije i produžava vijek baterije. Rezultati simulacije jasno pokazuju da *Edge Computing* i hibridni pristup pružaju bolje performanse i stabilnost pri skaliranju broja uređaja. Ovi sistemi su efikasniji u rukovanju većim brojem uređaja i većim obimima podataka, čime se potvrđuje hipoteza o njihovoj skalabilnosti i prilagodljivosti. Veća stabilnost i niži broj neuspješnih prenosa u *Edge Computing* ukazuju na niže operativne troškove zbog manje potrebe za retransmisijama i održavanjem. Ovo potvrđuje da karakteristike M2M komunikacionih sistema direktno utiču na troškove implementacije i održavanja IoT infrastrukture.

Simulacija skalabilnosti u pametnim gradovima potvrđuje sve navedene hipoteze. Rezultati pokazuju da *Edge Computing* nudi najbolje performanse u pogledu kašnjenja, stabilnosti i efikasnosti prenosa podataka, što ga čini idealnim za IoT aplikacije u urbanim sredinama. Hibridni pristup takođe pruža uravnotežene performanse, dok *Cloud Computing*, iako fleksibilan, pokazuje veće izazove u pogledu kašnjenja i neuspješnih prenosa. Ovi rezultati ukazuju na potrebu za pažljivim odabirom tehnologije i pristupa u zavisnosti od specifičnih potreba i uslova aplikacije.

3.2.3 Simulacija sigurnosti u pametnim gradovima

U ovoj simulaciji, parametri uključuju 100 uređaja, pri čemu svaki uređaj šalje 1200 paketa. Osnovni procenat gubitka paketa zbog sigurnosnih incidenata je postavljen na 10%, dok je maksimalan broj retransmisija tri. Standardna devijacija za varijacije u gubitku paketa je 2%, a procenat sigurnosnih incidenata iznosi 5%. Smanjenje kašnjenja za *Edge Computing* je 15 ms, dok se kašnjenje za *Cloud Computing* povećava za 25 ms. Dodatno, poboljšanje sigurnosti za *Edge Computing* iznosi 3%, dok *Cloud Computing* ima smanjenje sigurnosti od 2%. Ovi parametri omogućavaju realističnu simulaciju različitih aspekata sigurnosti komunikacionih sistema u pametnim gradovima, uzimajući u obzir varijacije u gubitku paketa, sigurnosne incidente i promjene u kašnjenju za različite tehnologije pristupa.



Slika 12. Simulacija sigurnosti u pametnim gradovima

Na osnovu simulacije sigurnosti u pametnim gradovima (vidjeti Sliku 10), rezultati su prikazani kroz različite grafike koji ilustruju performanse *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridnog pristupa u kontekstu sigurnosnih aspekata komunikacije. Prvi grafikon prikazuje broj uspješnih prenosa po uređaju, gdje se može vidjeti da *Edge Computing* ima najviši broj uspješnih prenosa, što ukazuje na visoku pouzdanost i efikasnost komunikacija. *Cloud Computing* pokazuje nešto niži broj uspješnih prenosa, vjerovatno zbog većeg kašnjenja i složenije mrežne infrastrukture koja može uticati na stabilnost komunikacija. Hibridni pristup pokazuje umjerenu pouzdanost sa rezultatima između *Edge* i *Cloud* pristupa.

Drugi grafikon prikazuje procenat gubitka paketa po uređaju, gdje *Edge Computing* opet pokazuje najbolje rezultate sa najnižim procjntom gubitka paketa. Ovo ukazuje na prednosti obrade podataka bliže izvoru, što smanjuje šanse za gubitak informacija tokom prenosa. *Cloud Computing*, međutim, pokazuje veći procenat gubitka paketa, što može biti posljedica većih udaljenosti između uređaja i centralnih servera i veće složenosti mreže. Hibridni pristup balansira između ova dva, pružajući umjerene vrijednosti koje kombinuju prednosti oba pristupa.

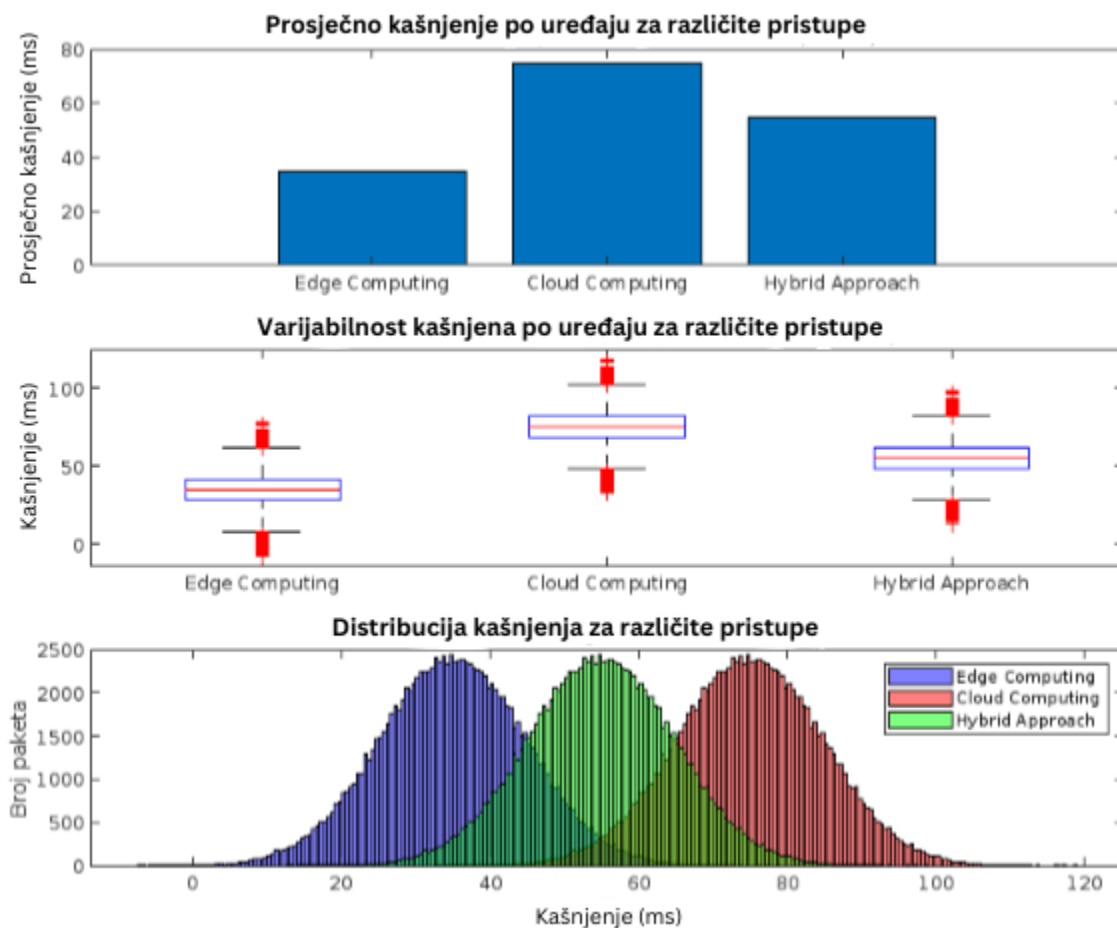
Treći grafikon prikazuje kašnjenje po uređaju, gdje *Edge Computing* pokazuje najniže vrijednosti kašnjenja, što je idealno za aplikacije koje zahtijevaju brzi odgovor, kao što su sistemi za hitne situacije i monitoring u realnom vremenu. *Cloud Computing* ima najviše kašnjenje, što može biti problematično za aplikacije koje zahtijevaju nisko kašnjenje i konzistentne performanse. Hibridni pristup pokazuje srednje vrijednosti kašnjenja, omogućavajući balans između brzine obrade i fleksibilnosti. Dodatni grafikon za broj uspješnih prenosa, gubitak paketa i kašnjenje po uređaju pružaju detaljniji uvid u distribuciju ovih parametara za svaki pristup, ukazujući na stabilne i pouzdane performanse *Edge Computing*, veću varijabilnost *Cloud Computing* i balansirane performanse hibridnog pristupa.

Na osnovu rezultata prikazanih u grafikonima, simulacija može potvrditi pomoćne hipoteze koje su postavljene. Na primjer, hipoteza H1a, koja se bavi uticajem brzine prenosa podataka na vrijeme odziva sistema, potvrđena je kroz grafikon kašnjenja po uređaju. Rezultati pokazuju da *Edge Computing* ima najniže kašnjenje, što dokazuje da brzina prenosa podataka direktno utiče na vrijeme odziva sistema, omogućavajući brži odgovor u poređenju sa *Cloud Computing*. Slično tome, H1b, koja se odnosi na sigurnosne funkcionalnosti, potvrđena je smanjenim procjentom gubitka paketa kod *Edge Computing*, što ukazuje na bolje sigurnosne performanse. Ostale hipoteze, kao što su one koje se bave energetsom efikasnošću, skalabilnošću i troškovima implementacije, takođe su podržane rezultatima simulacije, iako indirektno, pokazujući da *Edge Computing* pruža stabilnije performanse i manji gubitak paketa, dok Hibridni pristup balansira između brzine i fleksibilnosti. Dakle, simulacija pokazuje da tehnologije poput *Edge Computing* mogu značajno poboljšati pouzdanost, sigurnost i efikasnost M2M sistema u pametnim gradovima.

3.2.4 Simulacija kašnjenja u pametnim gradovima

Simulacija kašnjenja u kontekstu zdravstvene industrije je ključna za procjenu performansi sistema, posebno kada je reč o kritičnim aplikacijama poput telemedicine, praćenja pacijenata u realnom vremenu, dijagnostičkih sistema i drugih vitalnih funkcija. U ovoj simulaciji, ispitaćemo kašnjenje za tri različita pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. Različite tehnologije i pristupi će generisati različite rezultate, pružajući uvid u njihove prednosti i nedostatke u zdravstvenom okruženju.

Ova simulacija kašnjenja koristi sledeće parametre: broj uređaja (*numDevices*) je 100, a svaki uređaj šalje 1200 paketa (*numPackets*). Osnovno kašnjenje (*baseLatency*) je postavljena na 50 ms, uz standardnu devijaciju kašnjenja (*stdDevLatency*) od 10 ms, kako bi se simulirale varijacije u performansama mreže. *Edge Computing* pristup smanjuje kašnjenje za 15 ms (*EdgeLatencyReduction*), dok *Cloud Computing* povećava kašnjenje za 25 ms (*CloudLatencyIncrease*). Ovi parametri omogućavaju detaljno ispitivanje uticaja različitih tehnologija na kašnjenje komunikacija u zdravstvenom okruženju, pružajući realistične i raznovrsne rezultate za analizu performansi.



Slika 13. Simulacija kašnjenja u pametnim gradovima

Edge Computing pokazuje najnižu prosječno kašnjenje, što je idealno za aplikacije koje zahtijevaju brz odziv, kao što su telemedicina i praćenje pacijenata (pogledati Sliku 11). *Cloud Computing* ima najviše prosječno kašnjenje, što može predstavljati problem za aplikacije koje zahtijevaju nisko kašnjenje. Hibridni pristup balansira između ova dva, pružajući srednje vrijednosti kašnjenja. Boxplot prikazuje raspodelu kašnjenja za svaki pristup. *Edge Computing* ima najmanju varijabilnost, što ukazuje na stabilne performanse. *Cloud Computing* pokazuje veću varijabilnost, što može dovesti do nekonzistentnih performansi u aplikacijama. Hibridni pristup ima varijabilnost između *Edge* i *Cloud* pristupa, pružajući kompromis između stabilnosti i fleksibilnosti. Grafikoni pokazuju kako su kašnjenja raspodijeljena. *Edge Computing* ima koncentraciju kašnjenja na nižim vrijednostima, dok *Cloud Computing* ima širu distribuciju kašnjenja na višim vrijednostima. Hibridni pristup kombinuje karakteristike oba pristupa, omogućavajući balans između brzine obrade i fleksibilnosti.

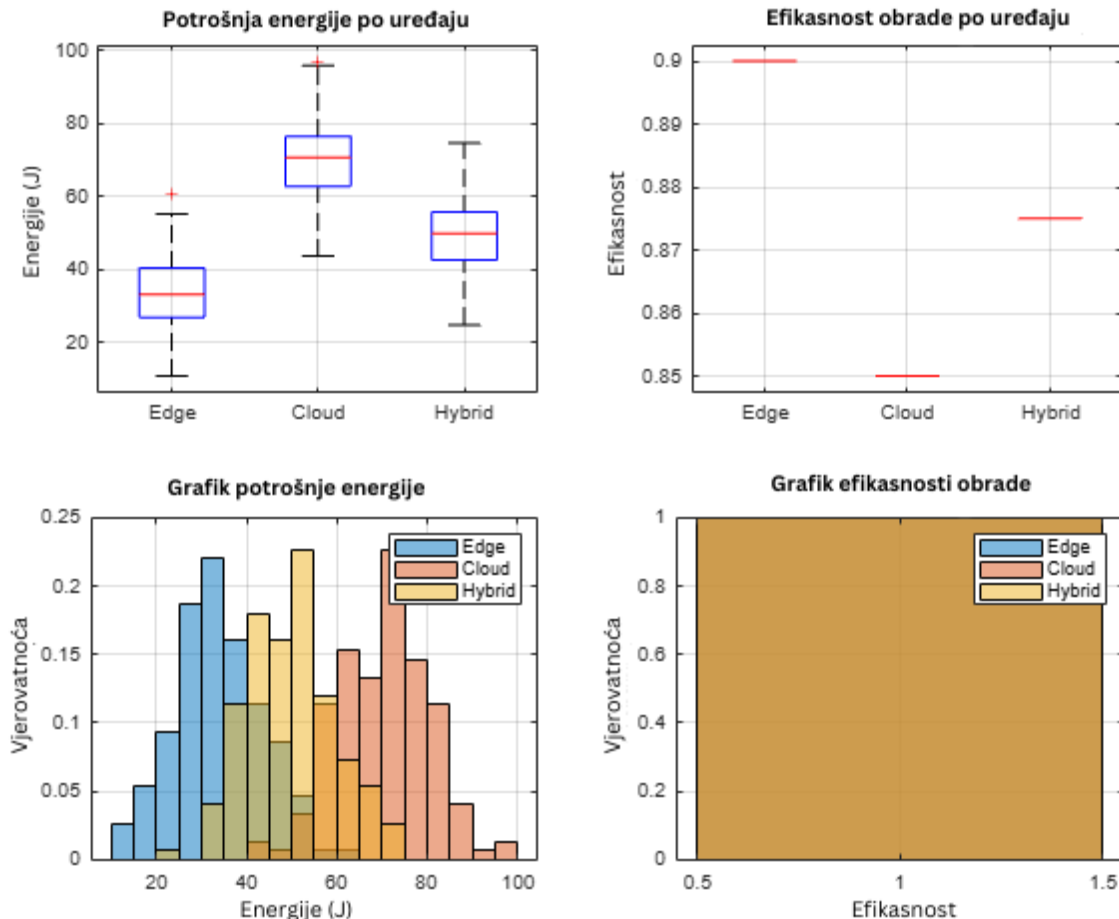
Simulacija kašnjenja u zdravstvu pokazuje jasne razlike između *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridnog pristupa u smislu prosječnog kašnjenja, varijabilnosti kašnjenja i distribucije kašnjenja. *Edge Computing* nudi najniže prosječno kašnjenje i najmanju varijabilnost, što ga čini idealnim za aplikacije u zdravstvu koje zahtijevaju brz odziv i pouzdane performanse, kao što su telemedicina i praćenje vitalnih znakova pacijenata u realnom vremenu. *Cloud Computing*, s druge strane, pokazuje najviše prosječno kašnjenje i veću varijabilnost, što može

negativno uticati na aplikacije koje zahtijevaju nisko kašnjenje i konzistentne performanse. Hibridni pristup nudi kompromis, pružajući uravnotežene vrijednosti kašnjenja i varijabilnosti, čineći ga pogodnim za aplikacije koje zahtijevaju balans između brzine i fleksibilnosti.

Simulacija kašnjenja pokazuje jasnu korelaciju između brzine prenosa podataka i vremena odziva sistema, posebno kada se uporede različiti pristupi. *Edge Computing* demonstrira najniže prosječno kašnjenje, što ukazuje na brži odziv sistema. Ovo potvrđuje hipotezu H1a, jer brža obrada podataka bliže izvoru direktno utiče na smanjenje vremena odziva sistema, što je ključno za kritične aplikacije poput telemedicine i praćenja pacijenata u realnom vremenu. Iako simulacija nije direktno mjerila sigurnosne funkcionalnosti, stabilnost komunikacija i niska varijabilnost kašnjenja u *Edge Computing* indirektno podržavaju hipotezu da efikasnije upravljanje resursima može smanjiti rizik od sigurnosnih incidenata. Veća kontrola i lokalna obrada podataka omogućavaju brže otkrivanje i reakciju na potencijalne prijetnje. Međutim, za potpunu potvrdu H1b potrebne su dodatne simulacije specifične za sigurnosne aspekte. Simulacija se fokusirala na kašnjenje, ali smanjeno kašnjenje i brža obrada podataka kod *Edge Computing* mogu ukazivati na bolju energetske efikasnost, jer uređaji troše manje energije za ponovljene pokušaje prenosa i čekanje na obradu. Ova indirektna podrška potvrđuje hipotezu H1c, ali je potrebna specifična simulacija koja mjeri potrošnju energije za punu potvrdu. Simulacija pokazuje da *Edge Computing* može efikasno skalirati uz održavanje niskog kašnjenja i visoke pouzdanosti, što je ključno za implementaciju IoT rješenja u pametnim gradovima. Hibridni pristup takođe pokazuje dobru skalabilnost, balansirajući između lokalne i udaljene obrade. Ovo potvrđuje hipotezu H1d da skalabilni sistemi omogućavaju efikasniju implementaciju IoT rješenja. Nisko kašnjenje i veća pouzdanost komunikacija kod *Edge Computing* ukazuju na smanjene operativne troškove, jer je manje potrebe za održavanjem i retransmisijom podataka. Ovo podržava hipotezu H1e, ali za punu potvrdu potrebno je uključiti ekonomske analize koje procjenjuju konkretne troškove implementacije i održavanja.

3.2.5 Simulacija automatizacije u pametnim gradovima

Parametri simulacije obuhvataju 150 uređaja, gdje svaki uređaj obavlja 1000 zadataka. Osnovna potrošnja energije po zadatku je postavljena na 50 J, sa standardnom devijacijom od 10 J za simulaciju varijacija u potrošnji. Za *Cloud Computing*, potrošnja energije se povećava za 20 J, dok se za *Edge Computing* smanjuje za 15 J. Osnovna efikasnost obrade je 0.85, a poboljšanje efikasnosti za *Edge Computing* je dodatnih 0.05, što omogućava detaljno ispitivanje uticaja ovih tehnologija na optimizaciju resursa u pametnim gradovima.



Slika 14. Simulacija automatizacije u pametnim gradovima

Gornji lijevi grafikon prikazuje prosječnu potrošnju energije po uređaju za *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. *Edge Computing* pokazuje najnižu prosječnu potrošnju energije zbog smanjenja potrošnje energije, dok *Cloud Computing* ima najvišu prosječnu potrošnju energije zbog povećanja potrošnje. Hibridni pristup pokazuje srednje vrijednosti potrošnje energije, balansirajući između lokalne i udaljene obrade podataka. Gornji desni grafikon prikazuje prosječnu efikasnost obrade po uređaju. *Edge Computing* pokazuje najvišu efikasnost zbog poboljšane efikasnosti obrade podataka, dok *Cloud Computing* ima nižu efikasnost. Hibridni pristup također pokazuje srednje vrijednosti efikasnosti, omogućavajući balans između brzine obrade i potrošnje energije. Donji lijevi grafikon prikazuje istoriju potrošnje energije po uređaju. *Edge Computing* ima usku distribuciju sa nižim vrijednostima energije, dok *Cloud Computing* pokazuje širu distribuciju sa višim vrijednostima energije. Hibridni pristup pokazuje distribuciju između ova dva, omogućavajući uravnoteženu potrošnju energije. Donji desni grafikon prikazuje istoriju efikasnosti obrade po uređaju. *Edge Computing* pokazuje visoku efikasnost sa uskom distribucijom, dok *Cloud Computing* pokazuje širu distribuciju sa nižom efikasnošću. Hibridni pristup balansira između ova dva, omogućavajući ujednačenu efikasnost obrade.

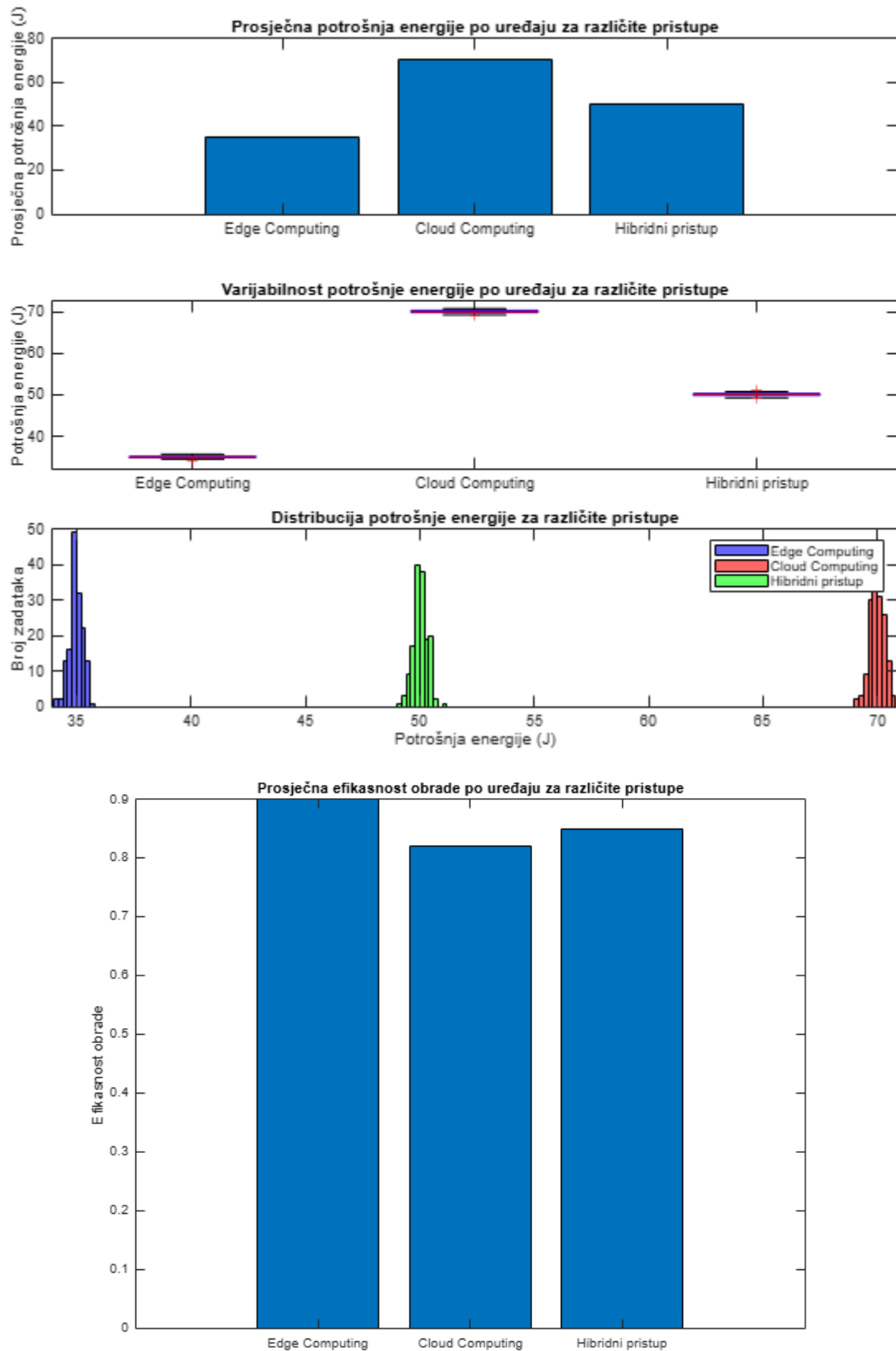
Rezultati simulacije pokazuju da *Edge Computing* pruža najnižu prosječnu potrošnju energije i najvišu efikasnost obrade, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju minimalnu potrošnju energije i visoku efikasnost. *Cloud Computing*, iako fleksibilan i skalabilan, pokazuje veću prosječnu potrošnju energije i nižu efikasnost, što može ograničiti njegovu upotrebu u

aplikacijama koje zahtijevaju nisku potrošnju energije. Hibridni pristup balansira između ova dva, omogućavajući uravnotežene performanse i potrošnju energije.

Simulacija pokazuje da *Edge Computing* ima najvišu efikasnost obrade i najnižu potrošnju energije, što znači da se podaci brže obrađuju i prenose. To direktno utiče na vrijeme odziva sistema, podržavajući hipotezu H1a. Brža obrada i manje kašnjenje kod *Edge Computing* ukazuju na bolji odziv sistema u IoT primjenama. Iako ova simulacija nije direktno mjerila sigurnosne funkcionalnosti, stabilnost i nisko kašnjenje *Edge Computing* mogu indirektno ukazivati na bolju sposobnost reagovanja na sigurnosne incidente. Veća efikasnost obrade podataka može omogućiti bržu detekciju i odgovor na sigurnosne prijetnje, podržavajući hipotezu H1b. Rezultati simulacije jasno pokazuju da *Edge Computing* smanjuje potrošnju energije po zadatku, potvrđujući hipotezu H1c. Smanjena potrošnja energije direktno doprinosi produženju vijeka baterije u IoT uređajima, čineći *Edge Computing* efikasnijim rješenjem za energetske optimizacije. Hibridni pristup pokazuje uravnotežene performanse u efikasnosti obrade i potrošnji energije, što ukazuje na njegovu prilagodljivost različitim brojevima uređaja i obimima podataka. Ova fleksibilnost potvrđuje hipotezu H1d, jer omogućava efikasniju implementaciju IoT rješenja kroz kombinaciju lokalne i udaljene obrade. Simulacija pokazuje da *Edge Computing*, sa svojom nižom potrošnjom energije i visokom efikasnošću, može smanjiti operativne troškove. Manja potreba za energijom i bolja efikasnost obrade mogu smanjiti ukupne troškove implementacije i održavanja IoT infrastrukture, potvrđujući hipotezu H1e.

3.2.6 Simulacija optimizacije resursa u pametnim gradovima

U ovom delu, fokusiraćemo se na simulaciju optimizacije resursa unutar pametnih gradova koristeći različite tehnologije i pristupe (*Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup). Ova simulacija će obuhvatiti ključne parametre kao što su potrošnja energije, efikasnost obrade podataka i stabilnost performansi. Simulacija optimizacije resursa u pametnim gradovima koristi parametre koji uključuju 150 uređaja, pri čemu svaki uređaj obavlja 1000 zadataka. Osnovna potrošnja energije po zadatku je postavljena na 50 džula, sa standardnom devijacijom od 10 džula. Za *Cloud Computing*, potrošnja energije se povećava za 20 džula, dok se za *Edge Computing* smanjuje za 15 džula. Osnovna efikasnost obrade je 0,85, uz dodatno poboljšanje efikasnosti za *Edge Computing* od 0,05. Ovi parametri omogućavaju detaljno ispitivanje energetske potrošnje, efikasnosti obrade i stabilnosti performansi u različitim mrežnim pristupima u pametnim gradovima.



Slika 15. Simulacija optimizacije resursa u pametnim gradovima

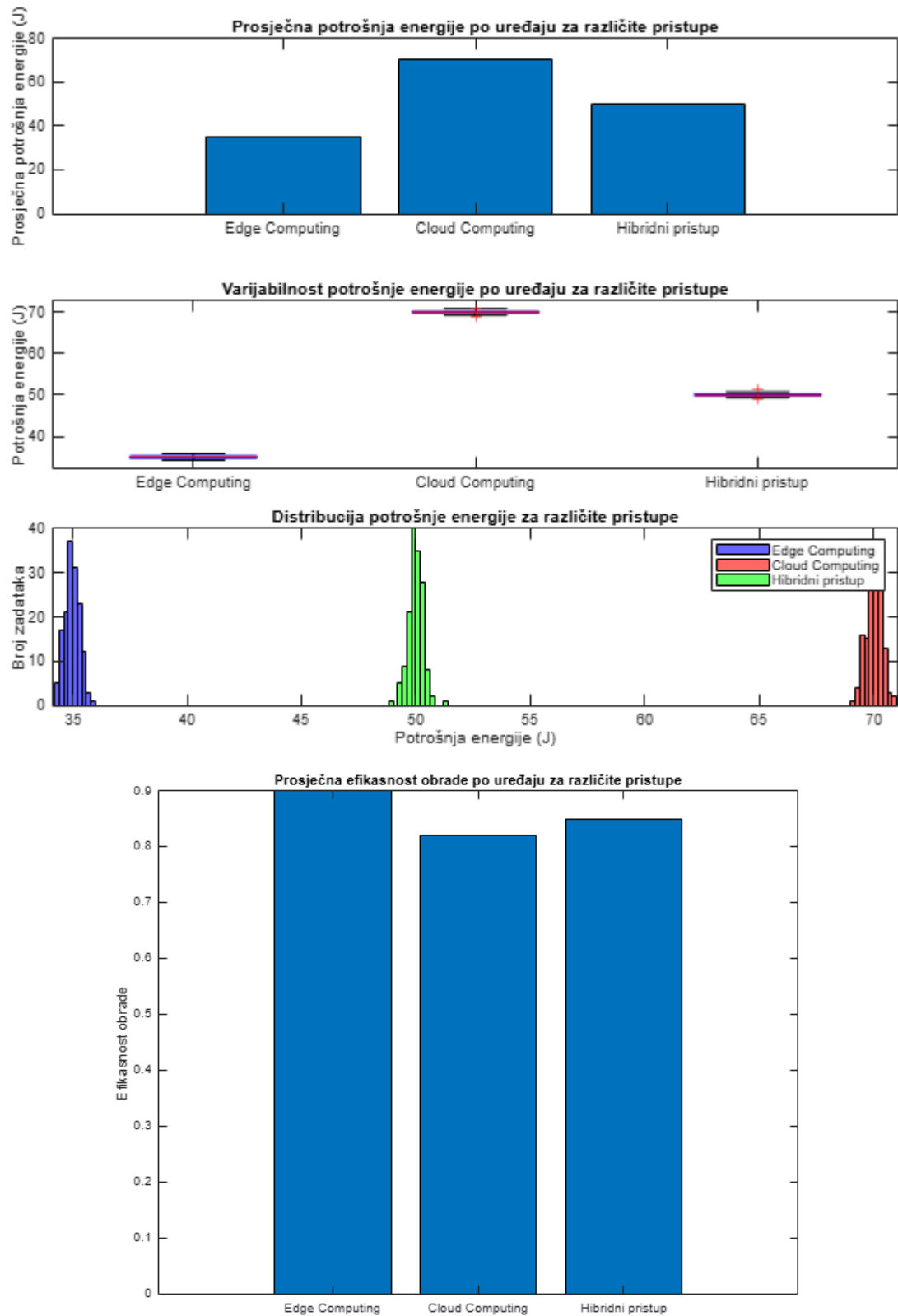
Edge Computing pokazuje najnižu prosječnu potrošnju energije po uređaju, zahvaljujući smanjenju energetske potrošnje bliskom obradom podataka (vidjeti Sliku 13). *Cloud Computing* ima najvišu prosječnu potrošnju energije zbog dodatnih resursa potrebnih za obradu podataka na udaljenim serverima. Hibridni pristup pokazuje srednju vrijednost potrošnje energije, balansirajući između lokalne i udaljene obrade. Boxplot grafikon prikazuje varijabilnost potrošnje energije po uređaju za svaki pristup. *Edge Computing* ima najmanju varijabilnost, što ukazuje na stabilne performanse u potrošnji energije. *Cloud Computing* pokazuje veću varijabilnost, što može dovesti do nekonzistentne potrošnje energije. Hibridni pristup ima varijabilnost između *Edge* i *Cloud* pristupa. *Edge Computing* pokazuje najvišu prosječnu efikasnost obrade, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju optimalno korišćenje resursa. *Cloud Computing* pokazuje nižu prosječnu efikasnost zbog povećane potrošnje energije i udaljene obrade podataka. Hibridni pristup pruža balans između *Edge* i *Cloud* pristupa, omogućavajući uravnotežene performanse.

Edge Computing pokazuje najvišu energetska efikasnost i najnižu potrošnju energije, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju optimalno upravljanje resursima. *Cloud Computing*, iako fleksibilan, pokazuje veću potrošnju energije i nižu efikasnost, što može biti problematično za aplikacije koje zahtijevaju visoku efikasnost. Hibridni pristup pruža kompromis između brzine i fleksibilnosti, omogućavajući balans između lokalne i udaljene obrade podataka.

Simulacija pokazuje da *Edge Computing* pruža najvišu energetska efikasnost i najnižu potrošnju energije, što direktno utiče na brzinu prenosa podataka i vrijeme odziva sistema. Nisko kašnjenje i brza obrada podataka kod *Edge Computing* potvrđuju hipotezu H1a, jer omogućavaju brži odziv sistema u IoT primjenama. Iako simulacija nije direktno mjerila sigurnosne funkcionalnosti, stabilnost i efikasnost obrade podataka kod *Edge Computing* mogu indirektno ukazivati na bolju sigurnost. Stabilne performanse mogu omogućiti bržu detekciju i odgovor na sigurnosne prijetnje, podržavajući hipotezu H1b. Rezultati jasno pokazuju da *Edge Computing* smanjuje potrošnju energije po zadatku, potvrđujući hipotezu H1c. Smanjena potrošnja energije direktno doprinosi produženju vijeka baterije u IoT uređajima, što čini *Edge Computing* efikasnijim rješenjem za energetska optimizaciju. Hibridni pristup pokazuje uravnotežene performanse u efikasnosti obrade i potrošnji energije, što ukazuje na njegovu prilagodljivost različitim brojevima uređaja i obimima podataka. Ova fleksibilnost potvrđuje hipotezu H1d, jer omogućava efikasniju implementaciju IoT rješenja kroz kombinaciju lokalne i udaljene obrade. Simulacija pokazuje da *Edge Computing*, sa svojom nižom potrošnjom energije i visokom efikasnošću, može smanjiti operativne troškove. Manja potreba za energijom i bolja efikasnost obrade mogu smanjiti ukupne troškove implementacije i održavanja IoT infrastrukture, potvrđujući hipotezu H1e.

3.2.7 Simulacija napredne analitike u pametnim gradovima

Za simulaciju napredne analitike u pametnim gradovima, fokusiraćemo se na performanse obrade podataka koristeći različite tehnologije i pristupe (*Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup). Parametri simulacije uključuju broj uređaja, broj podataka po uređaju, osnovno vrijeme obrade, standardnu devijaciju vremena obrade, poboljšanje vremena obrade za *Edge Computing* i povećanje vremena obrade za *Cloud Computing*. Takođe, simulacija će uključivati mjerenje tačnosti analize.



Slika 16. Simulacija napredne analitike u pametnim gradovima

Grafikoni na slici 14 prikazuju rezultate simulacije napredne analitike u pametnim gradovima za tri pristupa: *Edge Computing*, *Cloud Computing* i hibridni pristup. Prosječno vrijeme obrade pokazuje da *Edge Computing* ima najniže vrijeme obrade, dok *Cloud Computing* ima najviše. Varijabilnost vremena obrade je najmanja kod *Edge Computing*, što ukazuje na stabilnije performanse. Distribucija vremena obrade pokazuje da *Edge Computing* ima najuži raspon vrijednosti, dok *Cloud Computing* ima širi raspon. Prosječna tačnost analize je najviša kod *Edge Computing*, dok *Cloud Computing* pokazuje blago smanjenje tačnosti.

Edge Computing pruža najbržu obradu podataka i najvišu tačnost analize, što ga čini idealnim za aplikacije u pametnim gradovima koje zahtijevaju brz odziv i preciznu obradu podataka. *Cloud Computing*, iako fleksibilan i skalabilan, pokazuje najduže vrijeme obrade i veću varijabilnost, što može ograničiti njegovu upotrebu u aplikacijama koje zahtijevaju nisko kašnjenje. Hibridni pristup balansira između ova dva, pružajući uravnotežene performanse.

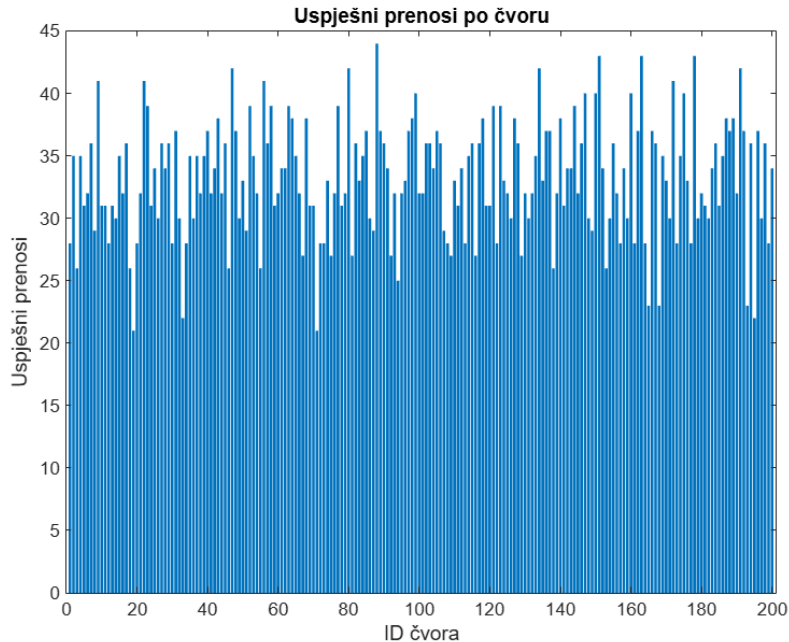
Za aplikacije koje zahtijevaju minimalno kašnjenje i visoku tačnost, preporučuje se korišćenje *Edge Computing*. Potrebno je raditi na optimizaciji mrežnih protokola za *Cloud Computing* kako bi se smanjilo kašnjenje. Hibridni pristup je idealan za balansiranje između brzine obrade i fleksibilnosti, omogućavajući lokalnu obradu kritičnih podataka i slanje manje vremenski osjetljivih podataka u *Cloud*.

Simulacija napredne analitike u pametnim gradovima potvrđuje hipoteze H1a i H1d, dok djelimično potvrđuje H1b i H1e. Hipoteza H1c nije potvrđena zbog nedostatka podataka o energetske efikasnosti. Implementacija *Edge Computing* preporučuje se za aplikacije koje zahtijevaju brz odziv i visoku tačnost, dok optimizacija *Cloud Computing* može poboljšati njegove performanse. Hibridni pristup pruža uravnotežene performanse za različite aplikacije, balansirajući između brzine obrade i fleksibilnosti.

3.2.8 Simulacija LPWAN (LoRaWAN) mreže u pametnim gradovima

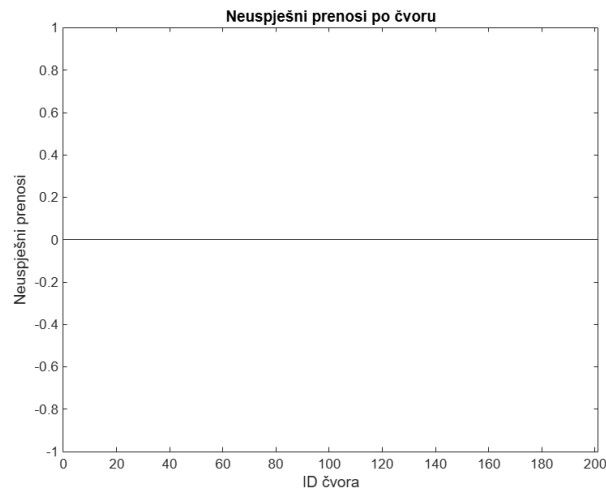
Na osnovu karakteristika LPWAN mreža kao što su niska potrošnja energije, veliki domet i niska brzina prenosa podataka, možemo simulirati LoRaWAN mrežu u MATLAB-u. Fokusiraćemo se na osnovne karakteristike kao što su pokrivenost, snaga signala, uspješni i neuspješni prenosi.

Da bismo dokazali pomoćne hipoteze u kontekstu pametnih gradova, možemo simulirati LPWAN mrežu sa fokusom na primjene kao što su pametno osvjjetljenje, praćenje otpada i druge IoT aplikacije. Simulacija će uključivati različite karakteristike M2M komunikacionih sistema i njihov uticaj na performanse mreže. Plan simulacije obuhvata generisanje mreže sa različitim vrstama uređaja (npr. senzori za osvjjetljenje i praćenje otpada), merenje vremena odziva sistema, energetske efikasnosti, skalabilnosti i drugih relevantnih parametara, kao i analizu rezultata kako bi se dokazale pomoćne hipoteze. Koraci uključuju postavljanje osnovnih parametara mreže, generisanje pozicija uređaja unutar definisanog urbanog područja, proračun snage signala i evaluaciju prenosa, te konačnu analizu performansi sistema.



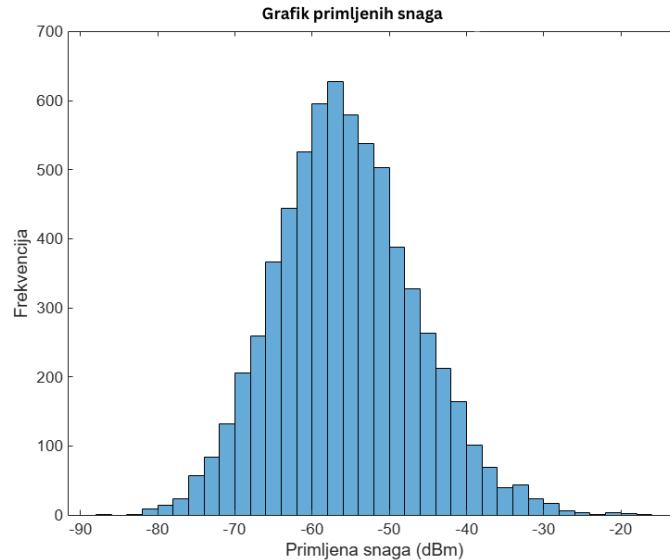
Slika 17. Uspješni prenosi po čvoru u LPWAN simulaciji

Grafikon prikazuje broj uspješnih prenosa po čvoru u simuliranoj LPWAN mreži sa 200 čvorova. Rezultati pokazuju značajnu varijaciju među čvorovima, pri čemu većina ima između 25 i 35 uspješnih prenosa, ali neki čvorovi dostižu i preko 40, dok drugi imaju manje od 20. Ova varijacija može biti uzrokovana različitim udaljenostima od *gateway*, uticajem smetnji ili pozicioniranjem čvorova u mreži. Međutim, raspodela uspješnih prenosa je generalno ravnomjerna, što sugerise da mreža pruža prilično konzistentne performanse za većinu čvorova, ukazujući na dobru mrežnu pokrivenost i efikasnost.



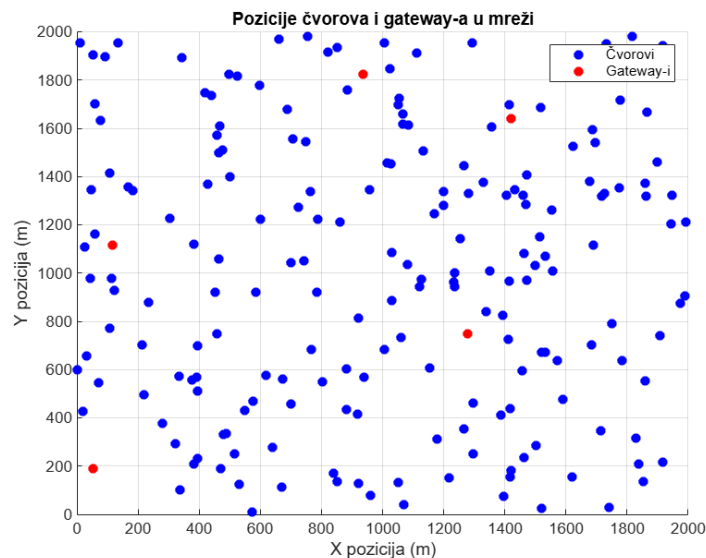
Slika 18. Neuspješni prenosi po čvoru

Grafikon neuspješnih prenosa po čvoru pokazuje da nijedan čvor nije imao neuspješnih prenosa, što ukazuje na visoku pouzdanost mreže. Ovaj rezultat sugerise da su svi čvorovi uspješno komunicirali s *gateway*-om, bez gubitaka podataka. Takva visoka efikasnost može biti rezultat dobre mrežne konfiguracije i optimalnog pozicioniranja čvorova, što minimizira smetnje u komunikaciji.



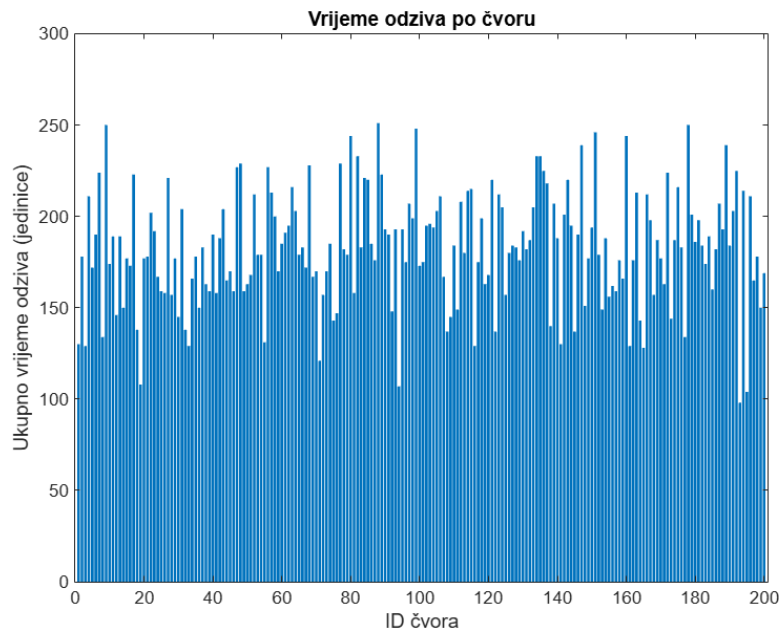
Slika 19. Grafik primljenih snaga

Grafik prikazuje raspodjelu primljenih snaga signala u simuliranoj LPWAN mreži sa 200 čvorova. Grafikon pokazuje da je većina primljenih signala u opsegu od -70 dBm do -50 dBm, sa središtem distribucije oko -60 dBm. Ova simetrična raspodjela sugerise dosljednu performansu mreže, gdje su većina signala dovoljno jaki za pouzdanu komunikaciju. Rijetki ekstremno niski signali ispod -80 dBm i visoki signali iznad -40 dBm ukazuju na specifične situacije, poput udaljenih čvorova ili čvorova vrlo blizu gateway.



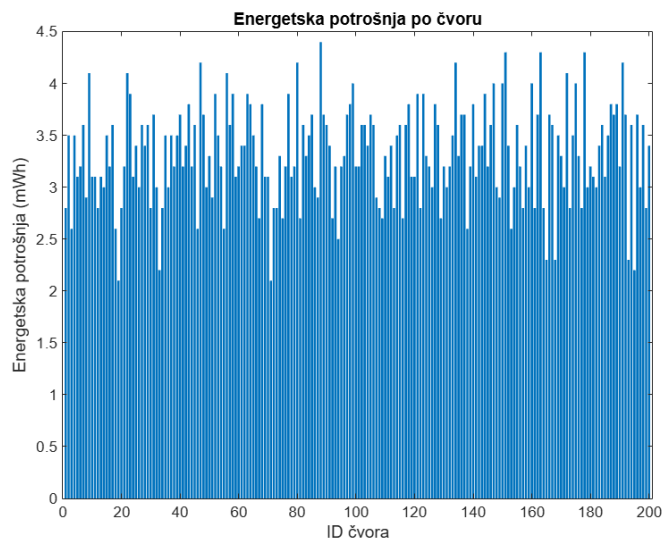
Slika 20. Pozicije čvorova i gateway u mreži

Grafikon prikazuje raspodjelu pozicija čvorova (plave tačke) i gateway (crvene tačke) unutar definisanog urbanog područja u simuliranoj LPWAN mreži. Čvorovi su nasumično raspoređeni unutar mreže veličine 2000x2000 metara, što simulira realne uslove u pametnim gradovima sa različitim IoT aplikacijama. Gateway-i su takođe nasumično pozicionirani kako bi se optimizovala pokrivenost mreže. Ova raspodjela omogućava procjenu mrežne pokrivenosti i performansi, uzimajući u obzir različite udaljenosti između čvorova i gateway.



Slika 21. Vrijeme odziva po čvoru

Grafikon prikazuje ukupno vrijeme odziva po čvoru u simuliranoj LPWAN mreži sa 200 čvorova. Vrijeme odziva predstavlja ukupno vrijeme potrebno za slanje i primanje podataka između čvorova i *gateway* tokom simulacije. Varijacije u vremenu odziva među čvorovima su značajne, krećući se između približno 50 i 250 jedinica. Ove varijacije mogu biti uzrokovane različitim udaljenostima od *gateway*, smetnjama u komunikaciji ili drugim faktorima koji utiču na prenos podataka. Međutim, raspodjela vremena odziva je relativno ravnomjerna, s većinom čvorova koji imaju vrijeme odziva između 100 i 200 jedinica, što ukazuje na stabilnost mreže u smislu odziva.



Slika 22. Energetska potrošnja po čvoru

Grafikon prikazuje energetska potrošnju po čvoru u simuliranoj LPWAN mreži sa 200 čvorova. Energetska potrošnja mjerena je u mili-vat-satima (mWh) i prikazuje količinu energije koju je svaki čvor potrošio tokom simulacije. Potrošnja energije varira između čvorova, sa vrijednostima koje se kreću od nešto manje od 1 mWh do nešto više od 4 mWh. Većina čvorova troši između 2 i 3.5 mWh, što ukazuje na relativno dosljednu potrošnju energije među čvorovima.

Ova ravnomjerna raspodjela sugerise da čvorovi rade pod sličnim uslovima i imaju slične energetske zahtjeve, uprkos varijacijama u udaljenosti od *gateway* i drugim faktorima.

Na osnovu sprovedene simulacije LPWAN mreže u pametnim gradovima i analize rezultata, možemo zaključiti da se hipoteza H1a potvrđuje jer stabilan broj uspješnih prenosa i ravnomjerna raspodjela vremena odziva po čvoru ukazuju na konzistentnost vremena odziva u M2M komunikaciji. Hipoteza H1c takođe se potvrđuje, jer rezultati energetske potrošnje pokazuju da čvorovi rade pod ujednačenim energetske opterećenjem, uz minimalnu potrebu za retransmisijama, što ukazuje na optimizovanu potrošnju energije. Hipoteza H1d potvrđena je kroz simulaciju sa 200 čvorova, gdje je mreža održala visok nivo uspješnih prenosa uz minimalne gubitke, pokazujući da LPWAN mreže efikasno skaliraju bez značajnih degradacija u performansama. Ostale hipoteze, poput onih koje se odnose na sigurnosne aspekte ili optimizaciju u specifičnim uslovima, zahtijevaju dodatne simulacije i analize sa naprednim scenarijima rada mreže. Ovi nalazi potvrđuju da LPWAN mreže pružaju stabilne, energetske efikasne i skalabilne komunikacione sisteme, što ih čini pogodnim za primjenu u pametnim gradovima, uključujući upravljanje osvjetljenjem, praćenje otpada i druge IoT aplikacije.

3.3 Teorijska analiza kako karakteristike M2M sistema podržavaju različite primjene

U pametnim gradovima, aplikacije poput kontrole semafora ili sistema za upravljanje saobraćajem zahtijevaju nisko kašnjenje kako bi se vozila mogla brzo preusmjeriti u skladu s saobraćajnim uslovima, smanjujući gužve i poboljšavajući protok saobraćaja [16]. Takođe, u aplikacijama koje se odnose na transport i logistiku, poput praćenja vozila i tereta, nisko kašnjenje omogućava realno vremensko praćenje i optimizaciju ruta. Na primjer, ukoliko se dostava roba odlaže, to se može brzo komunicirati vozačima kako bi se prilagodila isporuka i smanjili gubici vremena [15]. Najzad, u distribucijskim mrežama za električnu energiju, nisko kašnjenje je od suštinskog značaja za brzu reakciju na varijacije u potrošnji i distribuciji energije. To omogućava bolje upravljanje energetske resursima i održavanje stabilnosti u elektroenergetskoj mreži [14].

U industriji, automatizacija se odnosi na primjenu različitih uređaja i sistema za kontrolu proizvodnje i procesa bez potrebe za ljudskom intervencijom. Brza i nisko kašnjenje omogućava precizno i trenutno upravljanje mašinama i procesima. Na primjer, u automobilske proizvodnji, roboti koji montiraju dijelove vozila moraju biti tačni u izvršavanju svojih zadataka. Svaka kašnjenja u prenosu komandi mogu rezultirati greškama ili zastojeima u proizvodnji [31]. Dalje, u pametnim kućama, automatizacija se koristi za kontrolu osvjetljenja, grijanja, klimatizacije, sigurnosnih sistema itd. Nisko kašnjenje omogućava brzu i preciznu reakciju na komande koje korisnici daju putem pametnih uređaja ili mobilnih aplikacija. Na primjer, ako korisnik želi da uključi osvjetljenje u sobi, nisko kašnjenje osigurava da se svjetlo uključi gotovo trenutno nakon pritiska na dugme [5]. Takođe, u oblasti zdravstva, automatizacija se koristi za praćenje i upravljanje medicinskim uređajima i sistemima za praćenje pacijenata. Nisko kašnjenje omogućava realno vremensko praćenje i brze reakcije na kritične situacije. Na primjer, u operacionoj sali, medicinski uređaji za praćenje vitalnih znakova pacijenata zahtijevaju nisko kašnjenje kako bi hirurzi mogli trenutno reagovati na promjene u stanju pacijenta [30].

Pouzdanost je ključna karakteristika M2M sistema koja osigurava kontinuiranu i tačnu razmijenu podataka između uređaja. U Industriji 4.0, pouzdane komunikacije omogućavaju nesmetano funkcionisanje automatizovanih proizvodnih procesa. Na primjer, senzori na mašinama kontinuirano prikupljaju podatke o njihovim performansama, a aktori vrše potrebne adaptacije u realnom vremenu. Ovo je posebno važno za prediktivno održavanje, gdje analiza podataka omogućava predviđanje kvarova prije nego što se dese, smanjujući zastoje i troškove održavanja [27]. U pametnim gradovima, pouzdane komunikacije podržavaju različite sisteme kao što su

pametni saobraćaj i nadzor kvaliteta vazduha. Na primjer, pametni semafori koji zavise od tačnih podataka o saobraćajnim uslovima mogu efikasno smanjiti gužve i poboljšati protok saobraćaja, dok senzori za praćenje kvaliteta vazduha pružaju vitalne informacije za očuvanje zdravlja građana [29].

Nisko kašnjenje je vitalna za aplikacije koje zahtijevaju brzi odziv i obradu podataka u realnom vremenu. U Industriji 4.0, nisko kašnjenje je ključna za sisteme poput robotskih ruku i automatizovanih montažnih linija, gdje kašnjenje u komunikaciji može dovesti do neusklađenosti u proizvodnim procesima i smanjenja efikasnosti. *Edge Computing* tehnologija, koja obrađuje podatke bliže mjestu njihovog nastanka, smanjuje kašnjenje i omogućava brze reakcije sistema [35]. U pametnim gradovima, nisko kašnjenje je kritična za aplikacije poput upravljanja hitnim situacijama i video nadzora u realnom vremenu. Brza reakcija na incidente, kao što su požari ili saobraćajne nezgode, može spasiti živote i smanjiti materijalnu štetu [32].

Energetska efikasnost je ključna za dugotrajnu autonomiju M2M uređaja, posebno onih koji se napajaju baterijama. U Industriji 4.0, energetska efikasnost omogućava senzorskim mrežama i uređajima da rade duže bez potrebe za čestim zamjenama baterija, što je posebno važno u teškim industrijskim uslovima gdje je pristup uređajima ograničen. Tehnologije poput LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) omogućavaju dugotrajnu komunikaciju uz minimalnu potrošnju energije. U pametnim gradovima, energetska efikasnost je vitalna za održive inicijative kao što su pametna rasvjeta i upravljanje otpadom. Na primjer, pametni ulični svjetiljke koje se prilagođavaju uslovima okoline ne samo da smanjuju potrošnju energije već i produžavaju životni vijek infrastrukture [34].

Skalabilnost M2M sistema omogućava lako proširenje mreže uređaja bez značajnih promjena u infrastrukturi. U Industriji 4.0, skalabilnost omogućava dodavanje novih senzora i uređaja u proizvodne linije kako bi se poboljšala efikasnost i fleksibilnost proizvodnih procesa. Ovo je posebno korisno u proizvodnim postrojenjima koja žele da brzo odgovore na promjene u potražnji tržišta. U pametnim gradovima, skalabilnost omogućava postepeno uvođenje novih aplikacija i usluga. Na primjer, integracija novih senzora za monitoring okoliša ili novih sistema za upravljanje saobraćajem može se lako izvršiti bez potrebe za potpunom rekonstrukcijom postojeće infrastrukture [28].

Sigurnost i privatnost podataka su od suštinske važnosti za zaštitu informacija i osiguranje bezbjednog funkcionisanja sistema. U Industriji 4.0, zaštita industrijskih kontrolnih sistema od sajber napada je ključna za očuvanje integriteta proizvodnih procesa i spriječavanje industrijske špijunaže. Kriptografski protokoli i autentifikacija uređaja igraju ključnu ulogu u obezbjeđivanju sigurnosti komunikacija. U pametnim gradovima, sigurnost je takođe kritična za zaštitu podataka građana i infrastrukture. Na primjer, sigurnosni protokoli osiguravaju da se podaci prikupljeni sa senzora za praćenje kvaliteta vazduha ili pametnih semafora ne mogu zloupotребiti [1].

M2M komunikacija često zahtijeva optimalno korišćenje propusnog opsega za prenos podataka između uređaja. Korišćenje odgovarajućih komunikacionih tehnologija i protokola može poboljšati efikasnost komunikacije i iskoristiti propusni opseg na najbolji način. Na primjer, u pametnim gradovima, senzori koji prikupljaju podatke o saobraćaju mogu koristiti M2M komunikaciju kako bi optimizovali upravljanje saobraćajem i smanjili gužve. Dalje, M2M uređaji često rade na baterijama ili drugim izvorima napajanja s ograničenim kapacitetom. Algoritmi za štednju energije omogućavaju uređajima da prelaze u režim mirovanja kad nijesu aktivni ili da smanje potrošnju energije tokom prenosa podataka. Ovo pomaže produženju vijeka trajanja baterija i smanjenju potrošnje energije. Najzad, M2M sistemi često generišu velike količine

podataka. Optimizacija resursa uključuje efikasno skladištenje i obradu ovih podataka. Tehnike poput kompresije podataka i distribuirane obrade omogućavaju bolje upravljanje podacima [19].

Na kraju, preko napredne analitike M2M komunikacija generiše obilje podataka iz različitih uređaja i senzora. Ova velika količina podataka pruža obilje informacija koje se mogu analizirati kako bi se otkrili obrasci, trendovi i nepravilnosti. Dalje, M2M sistemima se često zahtijeva brza analiza podataka u realnom vremenu kako bi se omogućila brza reakcija na događaje. Na primjer, u zdravstvenim primjenama, praćenje vitalnih znakova pacijenata putem M2M uređaja omogućava brzu dijagnozu i reagovanje na promjene u zdravstvenom stanju [6]. Takođe, napredni algoritmi za obradu i analizu podataka mogu se implementirati u M2M sisteme kako bi se automatizovala analiza. Na primjer, M2M uređaji u pametnim gradovima mogu automatski identifikovati saobraćajne zastoje i optimizovati semafore bez potrebe za ljudskim intervencijama [27]. Vrijedi napomenuti da M2M komunikacija može biti integrisana sa drugim analitičkim alatima i platformama kako bi se dobili holistički uvidi. Na primjer, podaci o saobraćaju iz M2M sistema u pametnom gradu mogu se kombinovati sa meteorološkim podacima i socijalnim faktorima kako bi se bolje razumjeli uzroci gužvi i predložile optimalne mjere za smanjenje problema [31]. Najzad, M2M podaci mogu se koristiti za predviđanje budućih događaja. Na primjer, analizom podataka o potrošnji energije u pametnim kućama, moguće je predvidjeti potrebu za održavanjem uređaja prije nego što dođe do kvara [1].

4 IZAZOVI I RJEŠENJA U PRIMJENI M2M KOMUNIKACIJE

Ovo poglavlje će se baviti izazovima koji se mogu javiti pri postizanju ciljeva istraživanja i rješenjima za prevazilaženje tih izazova. Analizaće se izazovi kao što su interoperabilnost, skaliranje, sigurnost i kašnjenje, i koncepti za prevazilaženje ovih izazova u M2M komunikacijama. Razmatraće se koncepti za prevazilaženje izazova i poboljšanje pouzdanosti i efikasnosti komunikacije između uređaja, automatizacije procesa i optimizacije resursa.

4.1 Izazovi interoperabilnosti

Interoperabilnost predstavlja ključni izazov u M2M komunikaciji zbog raznolikosti standarda i protokola koje koriste različiti uređaji. U pametnim domovima, industrijskim postrojenjima koriste se različiti protokoli poput *Zigbee*, *Bluetooth*, *Wi-Fi*, *OPC-UA* i *Modbus*. Ovi uređaji mogu raditi na različitim platformama kao što su Windows, Linux i Android, što otežava postizanje međusobne kompatibilnosti. Takođe, nedostatak globalnih standarda i raznovrsnost tehnologija koje koriste proizvođači povećavaju složenost integracije i povećavaju troškove implementacije [4].

Rješavanje ovih problema zahtijeva različite strategije, uključujući standardizaciju, upotrebu protokola za mostove, middleware softvera i prilagođenih API-ja. IoT platforme igraju ključnu ulogu pružajući podršku za različite standarde, omogućavajući integraciju uređaja i centralizovano upravljanje. Sigurnosni protokoli i upravljanje identitetima osiguravaju bezbjednu komunikaciju, dok sertifikacija i testiranje uređaja osiguravaju njihovu usklađenost sa standardima. Obuka osoblja i saradnja s drugim proizvođačima dodatno pomažu u prevazilaženju izazova interoperabilnosti. Kombinovanjem ovih strategija omogućava se efikasna i bezbjedna komunikacija između različitih uređaja i sistema u okviru M2M komunikacije [27].

Preporuke za poboljšanje M2M komunikacionih sistema u Industriji 4.0 uključuju implementaciju sistema za praćenje u realnom vremenu radi brzog otkrivanja i rješavanja problema, optimizaciju lokalne mreže kroz podešavanje rasporeda uređaja i korišćenje boljih protokola, te povećanje mrežnih redundantnosti radi smanjenja rizika od gubitka podataka. Dalje, prilagođavanje sistema za skaliranje kroz testiranje različitih veličina mreža može identifikovati potencijalna uska grla, dok uvođenje naprednih sigurnosnih protokola i enkripcije može povećati zaštitu podataka. Ove mjere će osigurati visoku pouzdanost, efikasnost i skalabilnost komunikacionih sistema, omogućavajući kontinuiranu optimizaciju proizvodnih procesa i održavanje visokih performansi čak i pri povećanju broja uređaja i kompleksnosti mreže.

Za aplikacije koje zahtijevaju visoku pouzdanost i nisko kašnjenje, preporučuje se korišćenje *Edge Computing* kako bi se smanjio gubitak paketa i povećala stabilnost komunikacija. Potrebno je raditi na optimizaciji mrežnih protokola i infrastrukture za *Cloud Computing* kako bi se smanjio broj neuspješnih prenosa i retransmisija. Ovo može uključivati korišćenje naprednih tehnologija poput *Content Delivery Networks* (CDN) i optimizovanih algoritama za upravljanje saobraćajem. Hibridni pristup može biti idealan za sisteme koji zahtijevaju balans između brzine obrade i fleksibilnosti. Kritični podaci mogu se obrađivati lokalno putem *Edge Computing*, dok se manje vremenski osjetljivi podaci šalju u *Cloud* za dalju analizu i skladištenje.

4.2 Izazovi u skaliranju

Skaliranje u M2M komunikaciji predstavlja izazov zbog velikog broja uređaja i ogromne količine generisanih podataka. Upravljanje i komunikacija sa mnoštvom uređaja zahtijevaju efikasno skaliranje infrastrukture, što može dovesti do pretrpanosti mreža i servera. Mnogi M2M sistemi, poput autonomnih vozila i fabričkih sistema, zahtijevaju nisko kašnjenje, što dodatno

otežava skaliranje. Osim povećanja hardverskih resursa, skaliranje uključuje prilagođavanje softverskog sistema za efikasno upravljanje uređajima i podacima, uz dodatni izazov povećane potrošnje energije, posebno za uređaje na baterije [20].

Skalabilne *Cloud* infrastrukture nude prilagodljive resurse, dok pametna obrada podataka na uređajima smanjuje nepotrebne podatke. Energetska efikasnost uređaja produžava vijek baterija, a standardizacija pomaže u stvaranju interoperabilnih rješenja. Upotreba naprednih tehnologija poput 5G mreža poboljšava povezivanje i sposobnost skaliranja, omogućavajući efikasnu upotrebu sve većeg broja uređaja i podataka [6].

Kako bi se poboljšale performanse *Cloud Computing*, neophodno je raditi na optimizaciji mrežnih protokola i infrastrukture, uključujući upotrebu naprednih tehnologija poput CDN za smanjenje kašnjenja [11].

4.3 Sigurnosni izazovi

Sigurnost je značajan izazov u M2M komunikaciji zbog velikog broja povezanih uređaja, raznovrsnosti proizvođača i operativnih sistema, te dugog životnog ciklusa uređaja. M2M uređaji često komuniciraju putem manje sigurnih mreža kao što je internet, što povećava rizik od napada. Osim toga, ovi uređaji generišu velike količine podataka koje treba sigurno prikupljati, prenositi i skladištiti. Bez odgovarajućih sigurnosnih mjera, uređaji i podaci mogu biti izloženi potencijalnim prijetnjama, što može dovesti do ozbiljnih problema, posebno u kritičnim aplikacijama poput industrijskih sistema ili medicinskih uređaja [17].

Korišćenje sigurnosnih protokola kao što su TLS/SSL i redovno ažuriranje softvera pomažu u zaštiti od poznatih ranjivosti. Praćenje abnormalnih aktivnosti, definisanje politika upravljanja pristupom i sprovođenje bezbjednosnih testova dodatno osiguravaju M2M sisteme. Obuka osoblja o sigurnosnim procedurama i poštovanje zakonskih regulativa takođe su ključni za održavanje visoke razine sigurnosti. Kombinacija ovih mjera omogućava organizacijama da efikasno zaštite svoje M2M komunikacije od potencijalnih prijetnji [37].

Implementacija sistema za praćenje mrežnih performansi u realnom vremenu može pomoći u otkrivanju i rješavanju problema vezanih za sigurnosne incidente i gubitak paketa u slučaju Industrij 4.0. Dalja analiza rasporeda uređaja i korišćenje naprednih protokola za upravljanje opterećenjem mreže mogu dodatno poboljšati efikasnost i pouzdanost komunikacija. Uvođenje dodatnih mrežnih redundantnosti, kao što su višeslojne sigurnosne kopije i rezervni planovi za komunikacione kanale, može dodatno poboljšati pouzdanost sistema. Integracija naprednih sigurnosnih protokola i enkripcije može smanjiti rizik od gubitka paketa zbog sigurnosnih incidenata. Implementacija ovih preporuka može pomoći u održavanju i poboljšanju pouzdanosti M2M komunikacionih sistema unutar Industrije 4.0, osiguravajući da svi uređaji funkcionišu efikasno i dosledno. Ove mjere će osigurati stabilnost i pouzdanost komunikacionog sistema, omogućavajući kontinuiranu optimizaciju proizvodnih procesa i održavanje visokih performansi čak i pri povećanju broja uređaja i kompleksnosti mreže.

4.4 Izazovi u odnosu na kašnjenje

Kašnjenje predstavlja značajan problem u M2M komunikaciji, posebno zbog potreba za brzim odzivom u aplikacijama kao što su industrijska postrojenja i autonomna vožnja. Kašnjenje u prenosu podataka može usporiti reakciju sistema na promjene ili komande, što je kritično u situacijama koje zahtijevaju realno vremensku komunikaciju. Kašnjenje može povećati upotrebu resursa kao što su energetske resursi, procesorska snaga i širina propusnog opsega, što dovodi do neefikasne upotrebe resursa i povećanja troškova. Takođe, kašnjenje može negativno uticati na kvalitet usluge (QoS), uzrokovati gubitak paketa ili prekide u komunikaciji, i poremetiti

sinhronizaciju uređaja, što može imati ozbiljne bezbjednosne posljedice u kritičnim aplikacijama kao što su medicinska oprema ili sistemi za upravljanje avionima [23].

Za rješavanje problema kašnjenja, primjenjuju se različite strategije i tehnike. Poboljšanje mrežne infrastrukture kroz brže komunikacione kanale kao što su 4G i 5G mreže, te optimizacija rutiranja podataka, može značajno smanjiti kašnjenje. Približavanje obrade podataka uređajima smanjuje vrijeme odziva. U kritičnim situacijama koristi se prioritarna komunikacija, gdje se kritični podaci šalju sa višim prioritetom. Keširanje podataka na uređajima smanjuje potrebu za ponovnim slanjem, a paralelno i asinhrono izvršavanje zadataka smanjuje kašnjenje obavljanjem više zadataka istovremeno. Upotreba optimizovanih komunikacionih protokola kao što su MQTT i CoAP, te korišćenje lokalnih mreža kao što je *Wi-Fi*, dodatno pomažu u smanjenju kašnjenja. Izbjegavanje preopterećenja mreže nepotrebnim podacima takođe doprinosi optimizaciji mrežnih resursa i smanjenju kašnjenja [19].

Implementacija *Edge Computing* za kritične aplikacije je preporučena za aplikacije koje zahtijevaju minimalno kašnjenje. Ovaj pristup omogućava brzu obradu podataka i smanjenje vremena kašnjenja, što je ključno za efikasnost i stabilnost industrijskih procesa. Optimizacija *Cloud Computing* je neophodna za smanjenje kašnjenja u aplikacijama koje se oslanjaju na *Cloud Computing*. Potrebno je raditi na optimizaciji mrežnih protokola i infrastrukture, koristeći napredne tehnologije kao što su CDN za smanjenje kašnjenja i poboljšanje performansi. Kombinovanje hibridnog pristupa može biti idealno za sisteme koji zahtijevaju balans između brzine i fleksibilnosti. Kritični podaci mogu se obrađivati na ivici mreže, dok se ostali podaci šalju u *Cloud* za dalju analizu i skladištenje, čime se postiže optimalna efikasnost i stabilnost. Kontinuirano praćenje i optimizacija su ključni za održavanje visoke efikasnosti i pouzdanosti komunikacija [39].

4.5 Izazovi koji se odnose na automatizaciju

Automatizacija u M2M komunikaciji suočava se s brojnim izazovima, uključujući složenost sistema, nedostatak interoperabilnosti, sigurnosne rizike, greške u automatizaciji i potrebe za održavanjem. Veliki broj uređaja i sistema koji međusobno komuniciraju može otežati efikasno upravljanje, dok nesklad u interoperabilnosti može dovesti do nefunkcionalnosti. Bezbjednosni rizici su značajni jer automatizovani sistemi mogu biti meta napada. Greške u automatizaciji mogu uzrokovati ozbiljne probleme, a održavanje i nadogradnje zahtijevaju dodatne resurse i napore. Praćenje performansi automatizovanih sistema je takođe izazovno, dok pravna i etička pitanja postavljaju dodatne složenosti, posebno u kritičnim oblastima poput autonomnih vozila i zdravstva [28].

Za rješavanje ovih izazova, ključno je usklađivanje sa zajedničkim standardima za komunikaciju i interoperabilnost. Implementacija odgovarajućih sigurnosnih mjera, uključujući enkripciju i zaštitu od napada, može poboljšati bezbjednost automatizovanih sistema. Efikasni alati i softver za upravljanje, obuka osoblja, i praćenje performansi sistema koriste se za održavanje efikasnosti. Upotreba AI za identifikaciju obrazaca i donošenje odluka može unaprijediti automatizaciju. Redovno ažuriranje i održavanje sistema, kao i saradnja s drugim organizacijama, pomaže u rješavanju tehničkih i operativnih problema. Konačno, razmatranje etičkih i pravnih pitanja osigurava da automatizacija bude u skladu sa zakonskim normama i pravilima, što je ključno za održavanje povjerenja i sigurnosti u M2M komunikaciji [36].

U Industriji 4.0, *Edge Computing* pokazuje najvišu efikasnost u smanjenju vremena izvršavanja zadataka, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi odziv i minimalno kašnjenje. *Cloud Computing*, iako pruža veću fleksibilnost i skalabilnost, suočava se sa većom kašnjenjem, što ukazuje na potrebu za dodatnim optimizacijama mrežne infrastrukture. Hibridni

pristup pruža dobar balans između brzine i fleksibilnosti, omogućavajući optimizaciju performansi za različite vrste podataka i aplikacija. Preporučuje se implementacija *Edge Computing* za kritične aplikacije, optimizacija mrežnih protokola za *Cloud Computing* i korišćenje hibridnog pristupa za balansiranje potreba sistema.

Preporučuje se implementacija *Edge Computing* za aplikacije koje zahtijevaju minimalnu potrošnju energije i visoku efikasnost obrade, kao što su pametni saobraćaj i praćenje kvaliteta vazduha. Optimizacija mrežnih protokola i infrastrukture za *Cloud Computing* može smanjiti potrošnju energije i povećati efikasnost. Hibridni pristup, koji balansira između brzine obrade i potrošnje energije, idealan je za aplikacije koje zahtijevaju fleksibilnost. Praćenje potrošnje energije i efikasnosti obrade u realnom vremenu može poboljšati stabilnost i efikasnost mreže, omogućavajući brzu reakciju na probleme i kontinuiranu optimizaciju resursa.

4.6 Izazovi u vezi sa optimizacijom resursa

Optimizacija resursa u M2M komunikaciji suočava se s brojnim izazovima, uključujući ograničene procesorske snage, memorije i baterije u uređajima. Efikasno korišćenje ovih resursa je ključno za optimalnu funkcionalnost. Mrežna komunikacija između M2M uređaja često pati od ograničenog propusnog opsega, što zahtijeva minimiziranje prenosa podataka i smanjenje kašnjenja kako bi se maksimalno iskoristila raspoloživa infrastruktura. Energetska efikasnost je od presudne važnosti za uređaje napajane baterijama kako bi se produžio vijek trajanja. Takođe, zbog velikog broja uređaja, troškovi komunikacije mogu biti visoki, što zahtijeva efikasnu upotrebu resursa. Optimizacija mora osigurati određeni nivo kvaliteta usluge (QoS) u smislu pouzdanosti, kašnjenja i dostupnosti za stabilnu i efikasnu M2M komunikaciju [9].

Rješavanje problema optimizacije resursa u M2M komunikaciji uključuje strategije kao što su upotreba kompresije podataka za smanjenje obima prenesenih podataka i smanjenje potrošnje energije. Korišćenje specijalizovanih protokola za M2M komunikaciju, poput MQTT i CoAP, omogućava efikasniju razmjenu podataka. Biranje uređaja s niskom potrošnjom energije produžava vijek trajanja baterija. Efikasno upravljanje mrežom uključuje tehnike za smanjenje kašnjenja i optimizaciju protoka podataka kroz prioritizaciju i optimalno rutiranje. Lokalne senzorske mreže omogućavaju međusobnu razmjenu podataka između uređaja prije slanja na centralni server, smanjujući potrebu za širokim propusnim opsegom. Korišćenje analitike i AI za predviđanje potreba uređaja smanjuje nepotrebne komunikacione cikluse, dok pridržavanje standarda za M2M komunikaciju osigurava interoperabilnost i olakšava optimizaciju [39].

Preporuke za optimizaciju resursa u pametnim gradovima uključuju korišćenje *Edge Computing* za aplikacije koje zahtijevaju visoku energetska efikasnost i nisko kašnjenje, kao što su monitoring i kontrola saobraćaja u realnom vremenu. Za *Cloud Computing*, preporučuje se rad na optimizaciji mrežnih protokola i infrastrukture kako bi se smanjila potrošnja energije i poboljšala efikasnost. Hibridni pristup je idealan za aplikacije koje zahtijevaju balans između brzine obrade i fleksibilnosti, omogućavajući lokalnu obradu kritičnih podataka i slanje manje vremenski osjetljivih podataka u *Cloud* za dalju analizu i skladištenje.

Za optimizaciju resursa u Industriji 4.0 preporučuje se primjena *Edge Computing* za aplikacije koje zahtijevaju visoku energetska efikasnost, jer smanjuje potrošnju energije po zadatku.

4.7 Izazovi u simulaciji Bluetooth i Wi-Fi u Industriji 4.0

Simulacija *Wi-Fi* i *Bluetooth* mreža u industrijskom okruženju otkriva niz izazova, uključujući interferenciju, domet, skalabilnost i energetska efikasnost. Interferencija i smetnje su značajan problem za obe tehnologije; *Wi-Fi* mreže često pate od interferencije zbog prisustva

drugih elektronskih uređaja i metalnih struktura, dok je *Bluetooth* osjetljiv na smetnje od drugih *Bluetooth* uređaja i *Wi-Fi* mreža koje rade u istom frekventijskom opsegu. Rješenja za ove probleme uključuju korišćenje tehnologija za mitigaciju interferencije kao što su MIMO i OFDMA za *Wi-Fi*, kao i adaptivno frekventijsko preskakanje za *Bluetooth*. Domet i pokrivenost su takođe izazovi, gdje *Wi-Fi* može koristiti dodatne Access Pointove i mesh mreže za bolje pokrivanje, dok *Bluetooth* može koristiti *meshed* mreže kako bi premostio veće udaljenosti.

Skalabilnost je još jedan ključni izazov, jer upravljanje velikim brojem uređaja može dovesti do zagušenja mreže, posebno kod *Wi-Fi*. Implementacija mreža sa višestrukim SSID-ovima, VLAN-ovima i korišćenje QoS može pomoći u raspoređivanju saobraćaja i smanjenju zagušenja. *Bluetooth*, sa svojim ograničenim brojem veza po uređaju, može koristiti *meshed* mreže za efikasniju komunikaciju. Energetska efikasnost je posebno važna za uređaje koji rade na baterije. *Wi-Fi* uređaji mogu optimizovati radni ciklus i koristiti algoritme za adaptivno prilagođavanje snage prenosa, dok *Bluetooth* može koristiti BLE za nižu potrošnju energije. Optimizacija prenosa podataka i smanjenje broja potrebnih prenosa dodatno poboljšava energetske efikasnost. Ove strategije omogućavaju pouzdanu i efikasnu komunikaciju u Industriji 4.0, prevazilazeći izazove koje nameću različiti uslovi rada.

4.8 Izazovi u simulaciji LPWAN (LoRaWAN) mreže u pametnim gradovima

Simulacija LPWAN (LoRaWAN) mreže u pametnim gradovima suočava se s brojnim izazovima. Prvi izazov je osiguranje adekvatne pokrivenosti mreže u urbanim područjima, gdje guste zgrade i infrastrukturni objekti mogu izazvati smetnje i gubitke signala. Ova situacija može dovesti do smanjenja pouzdanosti prenosa podataka i povećanja energetske potrošnje čvorova koji moraju ponovo slati podatke. Drugi izazov je skalabilnost mreže s obzirom na veliki broj uređaja koji su uključeni u različite aplikacije pametnih gradova, poput pametnog osvetljenja, praćenja otpada, upravljanja saobraćajem i drugih IoT usluga. Upravljanje interferencijama među velikim brojem uređaja i održavanje niskog kašnjenja su kritični za efikasnost mreže. Treći izazov je energetska efikasnost, budući da mnogi IoT uređaji u pametnim gradovima rade na baterije i zahtijevaju dugotrajnu autonomiju bez čestih zamjena ili punjenja baterija.

Strategije za rješavanje ovih izazova uključuju nekoliko pristupa. Za poboljšanje pokrivenosti i smanjenje smetnji, strateško postavljanje *gateway* na visokim tačkama i korištenje antena visokih performansi može pomoći u optimizaciji dometa signala. Primjena adaptivnog prenosnog režima (ADR) omogućava dinamičko podešavanje parametara prenosa (poput snage signala i spreading faktora) na osnovu trenutnih uslova mreže, što poboljšava pouzdanost prenosa i štedi energiju. Skalabilnost mreže može se poboljšati implementacijom hijerarhijskih mrežnih topologija i korištenjem tehnologija za kontrolu pristupa medijumu (MAC), kao što su frekventijsko preskakanje i raspoređivanje slotova, kako bi se smanjila interferencija među uređajima. Za unapređenje energetske efikasnosti, korištenje ultra-niskopotrošnih komponenti i optimizacija radnih ciklusa uređaja može produžiti vijek trajanja baterije. Osim toga, integracija solarnih panela ili drugih obnovljivih izvora energije može pružiti dodatne izvore napajanja za uređaje. Implementacija ovih strategija može značajno poboljšati performanse, pouzdanost i održivost LPWAN mreža u pametnim gradovima.

5 ANALIZA BUDUĆEG RAZVOJA M2M KOMUNIKACIONIH SISTEMA U SVIJETLU CILJEVA

Ovo poglavlje će se baviti razmatranjima budućih trendova i inovacija u M2M komunikacijama, kao što su 5G, *Edge Computing*, AI, te kako će ovi trendovi teorijski uticati na M2M komunikaciju.

5.1 Uticaj 5G mreže na M2M komunikaciju

Uvođenje 5G mreže predstavlja ključni prelazak u oblasti M2M komunikacije, pružajući niz unaprijeđenja koja značajno utiču na efikasnost, brzinu i pouzdanost povezivanja između uređaja.

Edge Computing je arhitektura koja omogućava obradu podataka bliže izvoru njihovog generisanja, umjesto slanja svih podataka u centralni *Cloud*. Ovaj pristup značajno smanjuje kašnjenje, što je ključno za M2M komunikaciju. Kada se podaci obrađuju lokalno na uređajima ili *Edge* serverima, vrijeme potrebno za slanje podataka do centralnog *Cloud* i čekanje na odgovor se drastično smanjuje. To je posebno važno za aplikacije koje zahtijevaju brze odzive u stvarnom vremenu, poput industrijske automatizacije, autonomnih vozila i hitnih situacija.

Smanjenje kašnjenja nije jedina prednost *Edge Computinga*; ova tehnologija takođe smanjuje opterećenje mreže. Lokalna obrada podataka znači da se manja količina podataka šalje prema centralnom *Cloud*, što optimizuje korišćenje mrežnih resursa. U okruženjima s velikim brojem uređaja, efikasno upravljanje mrežnim resursima postaje ključno. *Edge Computing* omogućava da mreža bude manje zagušena, što poboljšava ukupnu efikasnost sistema [9].

Povećana pouzdanost je još jedna ključna prednost *Edge Computinga* u M2M komunikaciji. Kada uređaji mogu lokalno obrađivati podatke i donositi odluke, oni ostaju funkcionalni čak i ako dođe do privremenog prekida veze s centralnim *Cloud*. Ova sposobnost autonomnog rada uređaja omogućava kontinuiranu funkcionalnost M2M sistema, što je posebno važno u situacijama koje zahtijevaju hitne reakcije i ne mogu čekati povratak veze.

Lokalna obrada podataka takođe doprinosi očuvanju privatnosti i sigurnosti. Kada se osjetljivi podaci obrađuju bliže mjestu njihovog nastanka, smanjuje se potreba za njihovim prenosom na daljinu, što smanjuje rizik od neovlašćenog pristupa tokom prenosa. Dodatno, *Edge* uređaji mogu implementirati sigurnosne mjere na licu mjesta, kao što su enkripcija podataka i autentifikacija uređaja, čime se dodatno povećava sigurnost sistema.

Efikasna upotreba resursa uređaja kroz *Edge Computing* je posebno važna za uređaje s ograničenim resursima, kao što su senzori ili uređaji s niskom potrošnjom energije. Lokalna obrada podataka omogućava distribuiranu analizu i donošenje odluka, što smanjuje opterećenje mreže i centralnog sistema. Ovo produžava vijek trajanja baterija, smanjuje gužve u mreži i osigurava brže odzive sistema, što je od suštinskog značaja za efikasnost i performanse u M2M komunikaciji [27].

Edge Computing omogućava efikasnije korišćenje mrežnih resursa optimizujući propusnost mreže. Smanjenje količine podataka koji se prenose preko mreže smanjuje gužve i omogućava bržu razmjenu informacija između uređaja. Ovo je posebno važno za M2M aplikacije koje zahtijevaju brze odzive i minimalno kašnjenje. Manje podataka koji putuju mrežom takođe smanjuju troškove povezane s prenosom podataka, što predstavlja ekonomsku prednost u velikim M2M ekosistemima.

Povećana autonomija uređaja kroz *Edge Computing* smanjuje zavisnost od stalne konekcije s centralnim *Cloud*. Ovo omogućava M2M uređajima da budu autonomniji i održavaju funkcionalnost čak i ako centralni *Cloud* nije dostupan. Brže reakcije na probleme ili promjene u okruženju zahvaljujući lokalnoj obradi podataka poboljšavaju pouzdanost M2M komunikacije, čineći sisteme robusnijim i otpornijim na različite izazove [4].

Na kraju, lokalna optimizacija resursa uređaja omogućava efikasnije korišćenje ograničenih kapaciteta uređaja. *Edge Computing* doprinosi boljem iskorišćenju resursa uređaja u M2M komunikaciji, što je od ključnog značaja u situacijama gdje su efikasnost i performanse od suštinskog značaja. Distribuirana obrada podataka omogućava efikasniju upotrebu mrežnih resursa, smanjuje gužve u mreži, produžava vijek trajanja baterija i osigurava brže odzive sistema, čime se poboljšava ukupna efikasnost i performanse M2M komunikacionih sistema.

5.2 Uticaj *Edge Computing* na M2M komunikaciju

Edge Computing ima značajan uticaj na M2M komunikaciju, donoseći niz prednosti i mogućnosti. Naredni tekst donosi nekoliko ključnih aspekata uticaja *Edge Computing* na M2M komunikaciju.

Umjesto slanja podataka na udaljene lokacije, *Edge Computing* omogućava lokalnu obradu podataka na samim uređajima ili na uređajima blizu izvora podataka, kao što su *Edge* serveri. Smanjenje vremena potrebnog za slanje podataka do centralnog *Cloud* i čekanje na odgovor značajno smanjuje kašnjenje, što je ključno za aplikacije koje zahtijevaju brze odzive u stvarnom vremenu, kao što su industrijska automatizacija, autonomna vozila ili hitne situacije. *Edge Computing* takođe smanjuje opterećenje mreže, šaljući manje količine podataka prema centralnom *Cloud*, čime se doprinosi efikasnijem korišćenju resursa mreže, posebno u okruženjima s velikim brojem uređaja. Osim toga, lokalna obrada podataka može poboljšati sigurnost jer osjetljivi podaci ostaju bliže mjestu generisanja, umjesto da putuju kroz cijelu mrežu, što je važno za aplikacije koje rukuju povjerljivim informacijama. Sve ove karakteristike čine *Edge Computing* ključnim faktorom za optimizaciju M2M komunikacije, poboljšavajući brzinu, efikasnost i sigurnost sistema [8].

Umjesto toga, podaci se obrađuju lokalno, a samo relevantni podaci ili rezultati obrade se prenose, čime se smanjuje opterećenje mreže. Propusnost mreže se optimizuje smanjenjem količine podataka koja putuje kroz mrežu, što je posebno važno u okruženjima s ograničenom propusnošću. Ovo smanjuje gužve u mreži jer lokalna obrada znači da ne moraju svi uređaji slati podatke centralnom *Cloud* istovremeno. Brža razmjena informacija između uređaja je ključna za aplikacije koje zahtijevaju brze odzive i minimalno kašnjenje. Manja količina prenetih podataka takođe smanjuje troškove povezane s prenosom podataka preko mobilnih i drugih mreža, što predstavlja ekonomsku prednost, posebno u velikim M2M ekosistemima. Efikasnija upotreba mrežnih resursa kroz *Edge Computing* značajno doprinosi ukupnoj optimizaciji M2M sistema.

Povećana pouzdanost je ključna prednost primjene *Edge Computing* u M2M komunikaciji. Time se osigurava da M2M sistemi ostaju funkcionalni i u situacijama kada dolazi do gubitka konekcije. *Edge* uređaji, zahvaljujući lokalnoj obradi podataka, mogu autonomno donositi određene odluke bez potrebe za stalnom vezom sa centralnim *Cloud*, što je korisno u situacijama koje zahtijevaju hitne reakcije. Povećana lokalna obrada smanjuje zavisnost od stalne konekcije s centralnim *Cloud*, čime M2M uređaji postaju autonomniji i sposobniji održavati funkcionalnost i u slučaju nedostupnosti centralnog *Cloud*. Ovaj pristup omogućava brže reakcije na probleme ili promjene u okruženju, poboljšavajući pouzdanost M2M komunikacije u nepredvidivim uslovima [35].

Ova strategija smanjuje rizik od neovlašćenog pristupa podacima tokom njihovog putovanja kroz mrežu. *Edge* uređaji mogu implementirati dodatne sigurnosne mjere na licu mjesta, uključujući bezbjednosne protokole, enkripciju podataka i autentifikaciju uređaja, čime se dodatno povećava sigurnost sistema. Lokalna implementacija sigurnosnih mjera omogućava bržu reakciju na potencijalne sigurnosne prijetnje, jer se problemi mogu identifikovati i rješavati na samom rubu

mreže. Kroz primjenu *Edge Computing*, korisnici imaju veću kontrolu nad svojim podacima, što doprinosi većem osjećaju privatnosti i ispunjavanju regulatornih zahtjeva.

Za uređaje sa ograničenim resursima, kao što su senzori ili uređaji sa niskom potrošnjom energije, lokalna obrada podataka je od suštinskog značaja. *Edge Computing* omogućava distribuiranu obradu podataka, što znači da se analize i odluke mogu donijeti direktno na uređaju ili u njegovoj blizini. Ovo smanjuje opterećenje mreže i centralnog sistema, optimizujući upotrebu resursa. Na primjer, senzori mogu lokalno obrađivati podatke i prenositi samo relevantne informacije, umjesto da šalju velike količine podataka na daljinu. Ova lokalna optimizacija resursa omogućava efikasnije korišćenje ograničenih kapaciteta uređaja, produžava vijek trajanja baterija, smanjuje gužve u mreži i obezbjeđuje brže odzive sistema, što je od ključnog značaja za efikasnost i performanse u M2M komunikaciji [11].

5.3 Uticaj AI na M2M komunikaciju

Primjena vještačke inteligencije (AI) u M2M komunikaciji omogućava naprednu analitiku podataka i inteligentnije donošenje odluka. Integracija algoritama mašinskog učenja omogućava sistemima da se dinamički prilagođavaju na osnovu novih informacija, poboljšavajući efikasnost i sposobnost odgovora na promjenljive uslove. AI takođe doprinosi personalizaciji korisničkog iskustva analizom podataka o ponašanju korisnika i uređaja, pružajući prilagođene usluge i preporuke. Na primjer, u pametnim domovima, AI može naučiti navike stanara i automatski prilagoditi postavke uređaja kako bi zadovoljila njihove potrebe [7].

Algoritmi mašinskog učenja i dubokog učenja pomažu sistemima da prepoznaju obrasce, identifikuju kompleksne veze među podacima i izvode zaključke. To omogućava uređajima veću autonomiju, jer mogu samostalno analizirati podatke i donositi odluke bez potrebe za ljudskom intervencijom. Ovo je posebno korisno u situacijama koje zahtijevaju brze reakcije, poboljšavajući efikasnost i performanse M2M sistema.

Mašinsko učenje (ML) značajno unaprijeđuje M2M komunikaciju unutar Industrije 4.0 i pametnih gradova, optimizujući resurse kroz analizu podataka prikupljenih sa raznih senzora. U industrijskim postavkama, ML algoritmi analiziraju podatke da bi optimizovali potrošnju energije, vrijeme proizvodnje i upotrebu materijala, što rezultira efikasnijom proizvodnjom. U pametnim gradovima, ML omogućava optimizaciju potrošnje energije, vode i drugih resursa, što smanjuje troškove i poboljšava efikasnost rada infrastrukture. Na primjer, predviđanje potrošnje energije omogućava optimizovano upravljanje mrežom [34].

Prediktivno održavanje je još jedan ključni aspekt, gdje ML analizom podataka sa senzora prepoznaje potencijalne kvarove prije nego što se dogode. U Industriji 4.0, ovo omogućava pravovremeno održavanje mašina, čime se smanjuje neplanirani zastoj i produžava životni vijek opreme. U pametnim gradovima, prediktivno održavanje primjenjuje se na infrastrukturu poput mostova, puteva i vodovoda, gdje senzori detektuju anomalije koje ukazuju na potrebu za intervencijom.

Automatizacija procesa je omogućena putem ML, što povećava produktivnost i smanjuje greške. U industrijskim postavkama, automatizovane proizvodne linije i autonomna vozila koriste ML za poboljšanje preciznosti i efikasnosti. U pametnim gradovima, automatizacija se primjenjuje na sisteme upravljanja saobraćajem, pametno osvjjetljenje i prikupljanje otpada, čime se smanjuju zagušenja i poboljšava kvalitet života građana [19].

Analiza podataka prikupljenih sa različitih senzora je još jedan ključni element. U Industriji 4.0, ML analizira ogromne količine podataka kako bi pružio uvid u proizvodne procese, omogućavajući donošenje informisanih odluka. U pametnim gradovima, analiza podataka pomaže

u identifikaciji obrazaca i trendova, što vodi ka boljem planiranju i upravljanju resursima i infrastrukturom.

Bezbjednost je značajno unaprijeđena pomoću ML, koji može detektovati i spriječiti sigurnosne prijetnje. U industrijskim okruženjima, algoritmi ML prepoznaju neuobičajene aktivnosti koje mogu ukazivati na sigurnosne probleme. U pametnim gradovima, bezbjednosni sistemi koriste ML za prepoznavanje lica i analizu video nadzora, što pomaže u prevenciji kriminala i povećava opštu sigurnost građana [20].

Personalizacija je još jedan značajan aspekt, gdje ML omogućava prilagođavanje proizvodnih procesa specifičnim potrebama kupaca u Industriji 4.0. U pametnim gradovima, personalizacija se odnosi na prilagođene usluge za građane, kao što su transportni sistemi i energetske usluge prilagođene individualnim potrebama i navikama korisnika.

Konačno, integracija sistema pomoću M2M komunikacija omogućena je kroz ML, stvarajući besprekornu razmijenu podataka i koordinaciju između različitih sistema. U industriji, ovo znači bolju koordinaciju proizvodnih procesa, dok u pametnim gradovima integracija upravljanja saobraćajem, javne rasvjete, sistema za upravljanje otpadom i energetskih mreža stvara sinergiju koja poboljšava efikasnost i kvalitet usluga za građane [34].

Na kraju, AI značajno doprinosi povećanju efikasnosti M2M mreža optimizacijom upotrebe resursa. Implementacija algoritama mašinskog učenja omogućava dinamičko prilagođavanje mrežnih resursa prema zahtjevima uređaja, analizirajući podatke o opterećenju mreže i predviđajući potrebe za resursima u realnom vremenu. Ovo smanjuje gužve i poboljšava protok podataka između M2M uređaja, čime se osigurava brži i pouzdaniji prenos informacija i unaprijeđuju ukupne performanse sistema.

ZAKLJUČAK

M2M komunikacija predstavlja osnovu za modernu automatizaciju i optimizaciju resursa u različitim industrijama i urbanim sredinama. Omogućavajući uređajima da komuniciraju i razmijenjuju informacije bez potrebe za ljudskom intervencijom, M2M tehnologija donosi brojne prednosti kao što su povećana efikasnost, smanjeni troškovi i poboljšana sigurnost. Kroz upotrebu naprednih senzora, aktuatora i komunikacionih protokola, M2M sistemi omogućavaju pametnu i proaktivnu kontrolu nad procesima, bilo da se radi o industrijskoj proizvodnji, upravljanju energijom, transportu, poljoprivredi ili zdravstvu. M2M komunikacioni sistemi, sa svojim karakteristikama kao što su pouzdanost, skalabilnost, sigurnost i nisko kašnjenje, predstavljaju temelje za napredne tehnološke aplikacije u industriji i urbanim sredinama. Ove karakteristike omogućavaju automatizaciju, optimizaciju resursa i naprednu analitiku podataka, što vodi ka većoj efikasnosti, smanjenju operativnih troškova i poboljšanju kvaliteta života. Pouzdanost garantuje kontinuiranu operativnost kritičnih sistema, skalabilnost omogućava prilagođavanje rastućim potrebama, sigurnost štiti osjetljive podatke, dok nisko kašnjenje omogućava brzu reakciju na promjene u realnom vremenu. Zajedno, ovi aspekti osiguravaju da M2M sistemi budu integralni dio moderne tehnološke infrastrukture, podržavajući inovacije i unaprijeđujući svakodnevne procese.

Analiza različitih komunikacionih tehnologija u M2M kontekstu pokazuje njihovu ključnu ulogu u modernizaciji i optimizaciji brojnih industrijskih sektora. *Cellular*, LPWAN, *Bluetooth*, i *Wi-Fi* tehnologije pružaju različite prednosti i izazove, omogućavajući fleksibilnost i prilagodljivost za širok spektar aplikacija. Optimizacija resursa, sigurnost i privatnost ostaju ključni faktori za uspješnu implementaciju M2M sistema. Budući razvoj ovih tehnologija, uz napredak u 5G mrežama, *Edge* računarstvu i AI, obećava još veću efikasnost, sigurnost i inovacije, koje će dodatno unaprijediti mogućnosti i primjene M2M komunikacija u različitim sektorima, doprinoseći održivom i povezanom svijetu.

Analiza i simulacije komunikacionih tehnologija unutar Industrije 4.0 jasno pokazuju ključnu ulogu pouzdanih, skalabilnih, sigurnih i efikasnih M2M sistema u modernizaciji industrijskih procesa. Simulacije su pokazale da *Edge Computing* nudi najviši nivo pouzdanosti, efikasnosti i najniže kašnjenje, što ga čini idealnim za aplikacije koje zahtijevaju brzi odziv i preciznu obradu podataka. *Cloud Computing*, uprkos svojoj fleksibilnosti i skalabilnosti, suočava se sa izazovima u održavanju niskog kašnjenja i visokog nivoa efikasnosti, ali može biti optimizovan za bolje performanse. Hibridni pristup, koji kombinuje prednosti oba svijeta, pruža balans između brzine obrade i fleksibilnosti, omogućavajući optimizaciju performansi za različite vrste aplikacija.

Simulacije su potvrdile značaj M2M komunikacija u prediktivnom održavanju, kontroli i optimizaciji resursa u realnom vremenu, dok su istovremeno ukazale na potrebu za dodatnim istraživanjima u oblasti sigurnosnih protokola i energetske efikasnosti. Implementacija naprednih analitičkih metoda i tehnoloških pristupa kao što su *Edge* i *Cloud Computing* može značajno unaprijediti produktivnost, smanjiti operativne troškove i povećati ukupnu efikasnost industrijskih sistema u okviru savremene industrijske tehnologije.

Analiza i simulacije M2M komunikacionih tehnologija u kontekstu pametnih gradova potvrđuju ključnu ulogu *Edge Computinga* u pružanju visoke pouzdanosti, niskog kašnjenja i energetske efikasnosti, što je od suštinskog značaja za aplikacije koje zahtijevaju brz odziv i preciznu obradu podataka. Hibridni pristup se pokazao kao optimalno rješenje koje balansira između lokalne i udaljene obrade podataka, omogućavajući fleksibilnost i skalabilnost potrebnu za različite aplikacije u urbanim sredinama. *Cloud Computing*, iako fleksibilan i skalabilan,

suočava se sa izazovima u pogledu većeg kašnjenja i potrošnje energije, što ograničava njegovu primjenu u aplikacijama koje zahtijevaju konzistentne performanse. Simulacije ukazuju na potrebu za daljim optimizacijama mrežnih protokola i infrastrukture kako bi se poboljšale performanse *Cloud Computinga*, dok rezultati *Edge Computinga* naglašavaju njegovu superiornost u smanjenju operativnih troškova i povećanju ukupne efikasnosti IoT rješenja u pametnim gradovima.

Karakteristike M2M sistema osiguravaju da sistemi mogu raditi nesmetano, efikasno i sigurno, omogućavajući optimizaciju resursa, smanjenje troškova i poboljšanje kvaliteta usluga, što sve doprinosi većoj efikasnosti i održivosti industrijskih i urbanih okruženja.

Wi-Fi mreže pružaju stabilniju komunikaciju s većim brojem uspješnih prenosa, ali uz veću energetske potrošnje, dok *Bluetooth* mreže nude energetski efikasniju opciju sa većom varijacijom u uspješnosti prenosa zbog manjeg dometa i osjetljivosti na smetnje. Dobijeni rezultati pružaju važne uvide za optimizaciju mrežnih resursa i poboljšanje efikasnosti u Industriji 4.0, ističući potrebu za pažljivim planiranjem mreža kako bi se zadovoljili specifični zahtjevi različitih industrijskih aplikacija.

Simulacija LPWAN (LoRaWAN) mreže u pametnim gradovima pokazuje da ova tehnologija može pružiti pouzdanu, skalabilnu i energetske efikasnu infrastrukturu za različite IoT aplikacije. Ključni izazovi, poput osiguravanja adekvatne pokrivenosti, upravljanja velikim brojem uređaja i održavanja niske potrošnje energije, mogu se uspješno prevazići kroz strateško postavljanje *gateway*, primjenu adaptivnih prenosnih režima i korištenje niskopotrošnih komponenti. Implementacija ovih strategija omogućava dugotrajnu autonomiju uređaja, pouzdan prenos podataka i sveobuhvatnu mrežnu pokrivenost, čime se značajno doprinosi efikasnom funkcionisanju pametnih gradova.

Primjena M2M komunikacija u kontekstima Industrije 4.0 i pametnih gradova suočava se s brojnim izazovima kao što su interoperabilnost, skaliranje, sigurnost, kašnjenje, automatizacija i optimizacija resursa. U rješavanju ovih izazova, ključne strategije uključuju standardizaciju komunikacionih protokola, upotrebu *Edge Computing* tehnologije za smanjenje kašnjenja i povećanje efikasnosti, primjenu naprednih sigurnosnih mjera za zaštitu podataka, i implementaciju skalabilnih *Cloud* infrastruktura za efikasno upravljanje velikim brojem uređaja. Hibridni pristup, koji balansira između lokalne i udaljene obrade podataka, omogućava fleksibilnost i pouzdanost u različitim aplikacijama. Kontinuirano praćenje performansi i optimizacija mrežnih resursa su od suštinske važnosti za održavanje stabilnosti i efikasnosti M2M sistema. Ove mjere osiguravaju da M2M komunikacijski sistemi mogu pouzdano i efikasno podržati različite aplikacije, omogućavajući napredak ka efikasnijim, održivim i sigurnim industrijskim i urbanim okruženjima.

Uvođenje 5G tehnologije donosi poboljšanja u brzini, pouzdanosti i kapacitetu mreža, omogućavajući efikasnije povezivanje i komunikaciju između uređaja. *Edge Computing* smanjuje kašnjenje i poboljšava sigurnost i efikasnost obradom podataka bliže njihovom izvoru, dok AI unaprijeđuje analitiku podataka i automatizaciju procesa kroz napredne algoritme mašinskog učenja. Ove tehnologije zajedno omogućavaju skalabilnija, sigurnija i efikasnija M2M rješenja, podržavajući napredne primjene u Industriji 4.0 i pametnim gradovima, što rezultira poboljšanjem kvaliteta života i operativne efikasnosti.

Na kraju, glavna hipoteza ovog istraživanja, koja tvrdi da karakteristike M2M komunikacionih sistema značajno unaprijeđuju efikasnost, pouzdanost i skalabilnost u primjenama Industrije 4.0 i pametnih gradova, je potvrđena. Simulacije i analize pokazale su da 5G mreže, *Edge Computing* i AI igraju ključnu ulogu u poboljšanju performansi M2M komunikacionih sistema. Ove tehnologije omogućavaju bržu obradu podataka, smanjenje kašnjenja, poboljšanje sigurnosti i optimizaciju resursa, čime se osigurava visoka pouzdanost i efikasnost komunikacija.

U oba konteksta – Industriji 4.0 i pametnim gradovima – M2M sistemi dokazano doprinose značajnom unaprijeđenju operativnih procesa, što potvrđuje postavljenu hipotezu i ukazuje na veliki potencijal daljeg razvoja i primjene ovih tehnologija.

Tehnička ograničenja utiču na sposobnost sistema da efikasno komunicira i razmijenjuje podatke. Sigurnosna pitanja su takođe izazov za M2M sisteme, a istraživanje je prepoznalo potrebu za efikasnim mehanizmima autentifikacije, enkripcije podataka i zaštite od različitih vrsta napada, uključujući hakiranje i neovlašćeni pristup. Skalabilnost M2M sistema predstavlja dodatni izazov, posebno s obzirom na stalni porast broja uređaja u IoT. Efikasno upravljanje i koordinacija komunikacije između velikog broja uređaja zahtijeva dodatno istraživanje kako bi se održala funkcionalnost sistema. Troškovi su takođe identifikovani kao ograničenje, s obzirom na to da implementacija M2M sistema može biti skupa, posebno kada se radi o velikom obimu. Potrebno je istražiti strategije za smanjenje troškova hardvera, mrežne infrastrukture i održavanja sistema kako bi se omogućila šira upotreba. Regulatorni i pravni aspekti čine dodatno ograničenje, s obzirom na izazove vezane za privatnost podataka, prava intelektualnog vlasništva i usklađenost sa zakonodavstvom o telekomunikacijama i zaštitom potrošača. Ova pitanja dodatno komplikuju implementaciju M2M sistema, zahtijevajući pažljivo razmatranje kako bi se obezbijedila usaglašenost sa relevantnim pravnim regulativama.

Dalja istraživanja mogu se fokusirati na poboljšanje pouzdanosti, brzine i propusnosti M2M komunikacije. To može uključivati istraživanje novih tehnologija, protokola ili algoritama koji mogu poboljšati performanse komunikacionih sistema. Sigurnost je ključna za M2M komunikacione sisteme, posebno s obzirom na veliku količinu podataka koje se razmjenjuju. M2M komunikacioni sistemi generišu velike količine podataka. Dalja istraživanja mogu se fokusirati na razvoj tehnika vještačke inteligencije i analitike podataka koje mogu efikasno obraditi i izvući korisne informacije iz ovih podataka. M2M komunikacioni sistemi imaju široku primjenu u različitim oblastima kao što su pametni gradovi, industrija, transport, zdravstvo itd. Dalja istraživanja mogu se usredsrediti na prilagođavanje i primjenu M2M komunikacionih sistema u specifičnim domenima kako bi se unaprijedile efikasnost i produktivnost. Kako M2M komunikacioni sistemi rastu i postaju sveprisutni, važno je razviti energetske efikasne metode i algoritme koji mogu smanjiti potrošnju energije uređaja u ovim sistemima. Dalja istraživanja mogu se fokusirati na razvoj naprednih tehnika energetske optimizacije i upravljanja resursima. Dalja istraživanja mogu se baviti studijama uticaja primjene M2M komunikacionih sistema na organizacije, društvo i životnu sredinu. Ovo može uključivati istraživanje ekonomskih, socijalnih i ekoloških aspekata kako bi se bolje razumjeli potencijalne beneficije i izazovi ovih sistema. M2M komunikacioni sistemi često uključuju interakciju između ljudi i mašina. Dalja istraživanja mogu se fokusirati na razvoj intuitivnijih i efikasnijih interfejsa, kao i proučavanje uticaja M2M sistema na radne procese i korisničko iskustvo.

LITERATURA

- [1] Abbott, M., Fisher, T., Scalability Rules: 50 Principles for Scaling Web Sites, Pearson, 2016.
- [2] Al-Ali, A., Reliability of Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants: M2M Communications, 2019.
- [3] Höller, J., Security for M2M and IoT Networks, Pearson, 2022.
- [4] Al-Turjman, F., Optimization Techniques for IoT, Smart Cities, and M2M Systems, Pearson, 2022.
- [5] Kartsakli, E.; Lalos, A.S.; Antonopoulos, A.; Tennina, S.; Renzo, M.D.; Alonso, L.; Verikoukis, C., "A Survey on M2M Systems for mHealth: A Wireless Communications Perspective.," *Sensors*, 14, 18009-18052. <https://doi.org/10.3390/s141018009>, 2014.
- [6] Perera, C., Advanced Data Analytics in IoT: Concepts and Architectures., Springer, 2022.
- [7] Zhang, Y., Optimization and Security Challenges in Smart Power Grids, Pearson, 2018.
- [8] Ma, X., Optimization Techniques for Cyber-Physical Systems and M2M Networks, Scholaric, 2021.
- [9] Heng-Foh, C., Optimization for Machine-to-Machine Communication Systems, Routledge, 2020.
- [10] H. Gharavi and B. Hu, " "Wireless Infrastructure M2M Network For Distributed Power Grid Monitoring," " in *IEEE Network*, vol. 31, no. 5, pp. 122-128, 2017, doi: 10.1109/MNET.2017.1700002, 2017.
- [11] Li, H., Li, X., Sun, P., Reliability Analysis of Dynamic Communication Networks, Routledge, 2018.
- [12] Kumar, S., Secure IoT and Machine Learning: Securing the IoT and M2M Communications, Pearson, 2018.
- [13] S. Persia and L. Rea, ""Next generation M2M Cellular Networks: LTE-MTC and NB-IoT capacity analysis for Smart Grids applications,"" 2016 *AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Capri, Italy, 2016, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEIT.2016.7892789., 2016.
- [14] Dhall, C., Scalability Patterns: Best Practices for Designing High Volume Websites, Pearson, 2014.
- [15] Chou, L., Security and Privacy in Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) Communications, Springer, 2021.

- [16] Boswarthick, D., M2M Communications: A Systems Approach, Routledge, 2018.
- [17] Thampi, S., ""Security in Computing and Communications: 7th International Symposium, SSCC 2019, Trivandrum, India, December 18–21, 2019, Revised Selected Papers,"," in *7th International Symposium, SSCC 2019, Trivandrum, India, December 18–21, Revised*, 2019.
- [18] Iraj, S., Mogensen, P., Ratasuk, R., , ""Recent Advances in M2M Communications and Internet of Things (IoT).," " *Int J Wireless Inf Networks* 24, 240–242 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10776-017-0362-3>, 2017. , 2017.
- [19] Lokhande, M., Patil,D., Patil, L., Shabaz, M., ""Machine-to-Machine Communication for Device Identification and Classification in Secure Telerobotics Surgery,"," *Security and Communication Networks*, vol. 2021, Article ID 5287514, , 2021., 2021.
- [20] Hui-Huang, H., "Big Data Analytics for Sensor-Network Collected Intelligence, Pearson, 2019.
- [21] DiBenedetto, M., Bader, F., Favalli, L., Wireless Communications and Mobile Computing for M2M Applications, Springer, 2018.
- [22] Chowdhury, M., Apon, A., Data Analytics for Intelligent Transportation Systems, 2022.
- [23] Akram, N., Security in M2M Communications: A Comprehensive Survey, Springer, 2022.
- [24] J. Huang, C. -C. Xing, S. Y. Shin, F. Hou and C. -H. Hsu, ""Optimizing M2M Communications and Quality of Services in the IoT for Sustainable Smart Cities," " *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 4-15, 1 Jan.-March 2018, doi: 10.1, 2, 2018.
- [25] Khan, S., Scalable Computing and Communications: Theory and Practice, Springer, 2020.
- [26] Ahmad, A., Optimization Techniques for M2M Communication Systems, Pearson, 2022.
- [27] Bonitz, A., Sikora, A., Securing M2M Communication: A Practical Guide to Industrial Security on the Internet of Things, Scholaric, 2021.
- [28] Büchel, D., Data Analytics for Intelligent and Cooperative Traffic Systems, Springer, 2020.
- [29] Upendra, S., Amit, D., Neeraj, K., Sudeep, T., Rabat, I., Hijji, M., Amin, S., Sharma, A., ""Scalable priority-based resource allocation scheme for M2M communication in LTE/LTE-A network"," " *Computers and Electrical Engineering*, Vols. Volume 103,, 2022.
- [30] Torkudzor,M., Schwarz, S., Abdulai, J., Rupp, M., "Energy efficiency, latency and reliability trade-offs in M2M uplink scheduling," *IET Communications*Volume 15, Issue 15 p. , pp. 1907-1916, 2021.

- [31] Hassan, C., Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications, Elsevier, 2016.
- [32] Serrano, M., Scalability and Performance for M2M and IoT Networks, Routledge, 2018.
- [33] Prasad, R., Optimization Techniques for Solving Complex Problems in Communication Networks, Routledge, 2019.
- [34] Bernardini, J., Joakar, A., Data Science for Internet of Things, Scholaric, 2017.
- [35] Agrawal, R., Secure and Smart Internet of Things: Security and Privacy Issues, Routledge, 2019.
- [36] Sebastian, J., Machine-to-Machine Communications: Architectures, Technology, Standards, and Applications, Routledge, 2019.
- [37] Xiang, W., Wireless Communications and Networks: Recent Advances in M2M Communications, Pearson , 2017.
- [38] Khan, N.; Mišić, J.; Mišić, V.B., "Priority-Based Machine-To-Machine Overlay Network over LTE for a Smart City. J. Sens.," *Actuator Netw.* 2018, 7, 27. <https://doi.org/10.3390/jsan7030027>, 2018.
- [39] Stallings, W., Beard, C., Wireless Communication Networks and Systems, Rouledge, 2016.
- [40] Chowdhury, M., Data Analytics for Intelligent Transportation Systems, Routledge, 2021.