

UNIVERZITET “MB”
POSLOVNI I PRAVNI FAKULTET – BEOGRAD
DAS: NAPREDNE INFORMACIONE TEHNOLOGIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**Optimizacija laganih rekurentnih mreža za predviđanje rada solarnih
energetskih sistema u TinyML-u**

Mentor:
Prof. Dr Bata Vasić

Kandidat:
Mr. Gradimirka Popović

Beograd, 2026.

Sadržaj

SAŽETAK	6
SUMMARY	7
1. UVOD	8
2. PAMETNI SOLARNI ENERGETSKI SISTEM SA IoT PRAĆENJEM	9
2.1. Pojam i karakterizacija pametnih solarnih energetske sistema	9
2.2. Trenutno stanje razvoja pametnih solarnih energetske sistema	10
2.3. Metodologija dizajna pametnih solarnih energetske sistema	11
2.4. Pojam, karakterizacija i projektovanje solarnog panela	12
2.5. Dizajn i implementacija pametnih solarnih energetske sistema	13
2.5.1. Solarni panel kao konvertorski element.....	14
2.5.2. Modul za Wi-Fi ESP8266.....	14
2.5.3. LCD platforma za prikazivanje podataka	15
2.5.4. Senzor za detekciju napona.....	15
2.5.5. Senzor za detekciju jačine električne struje	15
2.5.6. Arduino UNO.....	16
2.5.7. Napajanje solarnih panela	16
2.6. Implementacija pametnih solarnih energetske sistema	16
2.6.1. Hardverska postavka pametnih solarnih energetske sistema.....	16
2.6.2. Konfiguracija programa	17
2.7. Kvantitativna analiza proizvodnje u solarnim sistemima	18
2.7.1. Grafički prikaz rezultata proizvodnje u solarnim sistemima	20
2.8. Pametni solarni energetski sistem sa IoT praćenjem: Sumarna razmatranja i buduća istraživanja	22
3. SOLARNE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE: KOMPLETAN PREGLED TEHNOLOGIJA SOLARNIH SISTEMA	23
3.1. Konceptualizacija tehnologije solarnih sistema	23
3.1.1. Solarna energija: pojam i karakterizacija.....	24
3.2. Solarne tehnologije u proizvodnji električne energije	27
3.2.1. Tehnologija solarne fotonaponske energije	27
3.2.2. Princip rada fotonaponskih ćelija.....	27

3.2.3.	Klasifikacija fotonaponskih ćelija.....	28
3.2.3.1.	Prva generacija fotonaponskih ćelija	29
3.2.3.2.	Druga generacija fotonaponskih ćelija.....	30
3.2.3.3.	Treća generacija fotonaponskih ćelija.....	31
3.2.3.4.	Četvrta generacija fotonaponskih ćelija.....	39
3.2.4.	Tehnologija koncentrisane solarne energije (CSP).....	41
3.2.4.1.	Princip rada koncentrisanih solarnih energetske ćelija.....	41
3.2.4.2.	Različite CSP tehnologije	42
3.3.	Uticaji solarnih energetskih sistema na životnu sredinu.....	46
3.3.1.	Fotonaponske ćelije	47
3.3.2.	Koncentrisani solarni energetski sistem (CSP).....	48
3.4.	Ekonomski aspekti.....	50
3.4.1.	Fotonaponski solarni energetski sistem	50
3.4.2.	Koncentrisani solarni energetski sistem (CSP).....	51
4.	OPTIMALNI DIZAJN I ALOKACIJA SOLARNE ENERGIJE ZA KRITIČNA DISTRIBUIRANA OPTEREĆENJA SEMAFORA KORIŠĆENJEM ITERATIVNE TOPSIS METODE.....	55
4.1.	Pozadina i motivacija.....	55
4.1.1.	Pregled literature	56
4.2.	Formulacija problema	59
4.2.1.	Dizajn solarnog sistema	59
4.2.2.	Strategija upravljanja energijom u nestanku struje	60
4.2.3.	Metodologije za odabir predloženih raskrsnica za primenu solarnog sistema	61
4.2.4.	Metoda zasnovana na strategiji Zelenog talasa (Green wave).....	62
4.2.5.	Metoda multi-objektivne optimizacije.....	62
5.	OPTIMIZACIJA LAKIH REKURENTNIH MREŽA ZA PREDVIĐANJE PROIZVODNJE SOLARNE ENERGIJE.....	65
5.1.	Trenutano stanje hibridnih solarnih energetskih sistema.....	65
5.2.	Teoretske osnove istraživanja metode optimizacije lakih rekurentnih mreža za predviđanje proizvodnje solarne energije.....	67
5.2.1.	Pravni okvir za proizvodnju i distribuciju solarne energije	69
5.2.2.	Rekurentne neuronske mreže	71
5.2.3.	Mreže dugotrajne memorije – LSTM mreže	71
5.2.4.	Zatvorene rekurentne jedinice.....	72
5.3.	Metodologija optimizacije lakih rekurentnih mreža	73
5.3.1.	Optimizator pretrage promenljivog susedstva	73

5.3.2.	Modifikovani VNS Algoritam.....	74
5.3.3.	ESP32 platforma za upotrebu TinyML-a.....	76
5.3.4.	Predloženi okvir optimizacije	77
5.4.	Ekperimentalna postavka	78
5.5.	Ishodi simulacije.....	80
5.5.1.	RNN Simulacije	81
5.5.1.1.	RNN Elm Crescent Simulacije	81
5.5.1.2.	RNN Forest Road (Šumski put) Simulacije.....	86
5.5.2.	LSTM Simulacije.....	92
5.5.2.1.	LSTM Elm Crescent Simulacije	92
5.5.2.2.	LSTM Forest Road Simulacije	96
5.5.3.	GRU Simulacije	101
5.5.3.1.	GRU Elm Crescent Simulacije	101
5.5.3.2.	GRU Forest Road Simulacije.....	107
5.5.4.	Optimizacija: Statistička validacija.....	112
5.5.5.	Simulacije primene sistema	115
5.6.	Sumarna razmatranja i buduća istraživanja u oblasti predikcije proizvodnje solarne električne energije.....	116
6.	MODIFIKOVANI METAHEURISTIČKI OPTIMIZACIONI PRISTUP ZA PREDVIDANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA PUNJIVIH LITIJUM-JONSKIH BATERIJA..	119
6.1.	Uvodna razmatranja predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	119
6.2.	Trenutno stanje u procesima predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija.....	120
6.2.1.	Mreže zasnovane na LSTM arhitekturi.....	122
6.3.	Metodologija predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	123
6.3.1.	Osnovni algoritam optimizacije rojem čestica (PSO).....	123
6.3.2.	Modifikovani adaptivni pristup za životni ciklus punjivih litijum jonskih baterija	124
6.4.	Predloženi optimizacioni okvir	125
6.5.	Postavka simulacije životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	125
6.6.	Rezultati simulacije životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	126
6.6.1.	Ukupni rezultati optimizacije životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	127
6.6.2.	Statistička validacija životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	127

6.6.3.	Performanse predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija	128
6.7.	Modifikovani metaheuristički optimizacioni pristup za predviđanje životnog ciklusa punjivih litijum-jonskih baterija: Sumarna razmatranja i buduća istraživanja	128
7.	ZAKLJUČAK	130
8.	LITERATURA	131

SAŽETAK

Ova doktorska disertacija fokusira se na optimizaciju laganih rekurentnih neuronskih mreža za predviđanje rada solarnih energetske sistema u TinyML okruženju. Cilj rada je razvoj efikasnih modela koji bi omogućili precizno i pouzdano predviđanje proizvodnje solarne energije uz minimalne računarske zahteve, pogodne za implementaciju na mikro kontrolerima. Analizira se primena naprednih metaheurističkih algoritama, uključujući modifikovane verzije PSO, genetske algoritme i druge heurističke pristupe za optimalno podešavanje hiperparametara ovih modela. Posebna pažnja posvećena je razvoju i oceni modela LSTM, GRU i RNN arhitektura, usklađenih sa ograničenjima TinyML platformi poput ESP32. U radu su prikazani rezultati eksperimenata koji pokazuju superiornost modela optimizovanih pomoću prilagođenih metaheuristika, sa značajno smanjenim greškama i višim koeficijentima determinacije. Implementacija modela je izvršena na realnim skupovima podataka o proizvodnji solarne energije, dobijenim iz regiona Zapadnog Balkana, uz analizu tačnosti i robusnosti modela. Statistička validacija rezultata potvrđuje značajnost dobijenih poboljšanja u poređenju sa konvencionalnim metodama. Razmatra se i izazov prenaučivosti, kao i mogućnost daljeg smanjenja složenosti modela putem hiperparametarske optimizacije. U radu je detaljno opisana metodologija adaptivnog prilagođavanja parametara metaheuristika, uključujući ostrvski model i strategije diversifikacije. Razvijen je okvir za in situ primenu i implementaciju modela na embedded platformama, što omogućava autonomno i brzo predviđanje proizvodnje. Ovaj rad doprinosi razvoju naprednih, energetski efikasnih modela za predviđanje solarne energije u kontekstu održivog razvoja i energetske tranzicije na Zapadnom Balkanu. Takođe, ističe se važnost integracije ovih modela u pametne mreže i IoT sisteme za unapređenje upravljanja obnovljivim izvorima. Predloženi pristup omogućava efikasno korišćenje ograničenih resursa, čime se doprinosi širenju primene TinyML u oblasti obnovljivih izvora energije. Rad pruža osnovu za dalje naučno-istraživačke radove u oblasti optimizacije i implementacije naprednih neuronskih mreža na malim uređajima. U okviru rada razmatraju se i pravni i ekonomski aspekti primene ovih tehnologija u okviru regionalnih i evropskih strategija za održivu energiju. Na kraju, disertacija ukazuje na potencijal daljih istraživanja u pravcima proširenja modela za veće skupove podataka i unapređenja metodologija adaptivnog učenja u realnom vremenu. Ovim radom je omogućena realizacija autonomnih solarnih sistema sa naprednim predviđanjem, što predstavlja značajan doprinos u oblasti elektroenergetike i automatizacije.

SUMMARY

This doctoral dissertation focuses on the optimization of lightweight recurrent neural networks for the prediction of photovoltaic system performance within a TinyML framework. The primary objective is to develop computationally efficient models capable of accurate and reliable energy generation forecasting, suitable for deployment on microcontrollers with constrained processing resources. The study investigates the application of advanced metaheuristic algorithms, including modified versions of Particle Swarm Optimization, genetic algorithms, and other heuristics, to achieve optimal hyperparameter tuning of these architectures. Particular emphasis is placed on the design and evaluation of LSTM, GRU, and RNN models, tailored to the limitations of TinyML platforms such as ESP32. Experimental results demonstrate the superior performance of models optimized via customized metaheuristic strategies, evidencing significant reductions in prediction errors and improvements in coefficient of determination. The implementation of these models is conducted on real-world datasets representing solar energy production, obtained from the Balkan region, with thorough analysis of accuracy and robustness. Statistical validation confirms the statistical significance of the observed improvements over conventional methods. The research addresses challenges related to overfitting and model complexity, proposing adaptive hyperparameter adjustment strategies to further reduce computational demands. A comprehensive methodology for adaptive parameter tuning of metaheuristics, incorporating island models and diversification strategies, is elaborated. An in situ deployment framework is developed, enabling autonomous, real-time energy forecasting directly on embedded systems. This work contributes to the advancement of energy-efficient, high-accuracy models for solar energy prediction, supporting sustainable development initiatives and energy transition policies in the Balkan region. Additionally, the integration of these predictive models within smart grid and IoT systems aims to enhance renewable energy management and optimize grid operation. The proposed approach facilitates effective utilization of limited computational resources, promoting widespread adoption of TinyML in renewable energy applications. The dissertation provides a foundational basis for further scientific inquiries into the optimization and implementation of advanced neural architectures on resource-constrained devices, emphasizing the importance of aligning technological development with regional and European sustainability strategies. Ultimately, this research enables the realization of autonomous solar systems with precise energy forecasting capabilities, representing a significant contribution to the fields of electrical engineering and automation.

1. UVOD

Savremeno društvo se suočava sa kontinuiranim rastom potrošnje električne energije, koji je direktno povezan sa razvojem tehnologije, urbanizacijom i povećanjem broja električnih uređaja u svakodnevnom životu. Istovremeno, dominantno oslanjanje na fosilna goriva dovodi do ozbiljnih ekoloških problema, uključujući emisiju gasova staklene bašte, klimatske promene i degradaciju životne sredine. Zbog toga se obnovljivi izvori energije nameću kao neophodno i dugoročno rešenje za obezbeđivanje održivog energetskeg sistema.

Solarna energija zauzima posebno mesto među obnovljivim izvorima zbog svoje rasprostranjenosti, neiscrpnosti i ekološke prihvatljivosti. Fotonaponski sistemi omogućavaju direktnu konverziju sunčevog zračenja u električnu energiju bez štetnih emisija, što ih čini pogodnim za primenu u stambenim, komercijalnim i industrijskim objektima, kao i u udaljenim i ruralnim područjima. Međutim, efikasnost i pouzdanost solarnih energetskeg sistema u velikoj meri zavise od pravilnog upravljanja, kontinuiranog nadzora i pravovremenog održavanja.

Tradicionalni sistemi za praćenje solarne energije često zahtevaju manuelno očitavanje parametara i fizičko prisustvo korisnika, što povećava operativne troškove i smanjuje fleksibilnost sistema. Razvoj digitalnih tehnologija i komunikacionih mreža omogućio je prelazak na pametne energetske sisteme, u kojima se ključni parametri prate automatski i u realnom vremenu. U tom kontekstu, Internet stvari (IoT) predstavlja jednu od ključnih tehnologija za unapređenje solarnih energetskeg sistema.

IoT omogućava povezivanje senzora, mikrokontrolera i komunikacionih modula sa platformama u oblaku, čime se obezbeđuje kontinuirano prikupljanje, obrada i analiza podataka. U solarnim energetskeg sistemima, primena IoT tehnologije omogućava precizno praćenje napona, struje, snage, temperature i drugih relevantnih parametara, kao i daljinski pristup informacijama putem veb ili mobilnih aplikacija. Na ovaj način korisnicima se pruža detaljan uvid u performanse sistema, što doprinosi optimizaciji proizvodnje energije, smanjenju gubitaka i produženju životnog veka opreme.

Cilj ovog rada je projektovanje i implementacija pametnog sistema za praćenje solarne energije zasnovanog na Internetu stvari, koji omogućava merenje i vizualizaciju električnih i ambijentalnih parametara u realnom vremenu. Predloženi sistem koristi senzore napona i struje, mikrokontroler, Wi-Fi modul i IoT platformu za skladištenje i analizu podataka. Rad obuhvata pregled relevantne literature, opis metodologije dizajna sistema, detalje hardverske i softverske implementacije, kao i analizu eksperimentalnih rezultata, sa ciljem da se pokaže efikasnost i primenljivost IoT-baziranih rešenja u savremenim solarnim energetskeg sistemima.

2. PAMETNI SOLARNI ENERGETSKI SISTEM SA IoT PRAĆENJEM

2.1. Pojam i karakterizacija pametnih solarnih energetskih sistema

Solarne elektrane postaju pouzdan i dobar izvor električne energije. One pomažu u dovođenju električne energije u ruralna područja koja još uvek nemaju struju. Bolji alati za praćenje i kontrolu mogu nam pomoći da brže širimo ove solarne elektrane. Izbor načina povezivanja ovih elektrana na elektroenergetsku mrežu je važan [1]. Povezivanje solarnih elektrana na postojeću elektroenergetsku mrežu može pomoći u modernizaciji starih mreža u pametnije mreže. Ove pametnije mreže mogu pratiti, kontrolisati i poboljšati način na koji se električna energija koristi. Jedan od suštinskih tehnoloških napredaka koji poboljšava naše tradicionalne sisteme na veoma efikasan i efektivan način je IoT (Internet stvari). IoT omogućava da se važne karakteristike poput struje, napona i proizvodnje energije automatski kontrolišu i prate u sistemima solarne energije [2]. Ranije su ljudska intervencija i manuelni rad bili neophodni za održavanje ispravnog rada solarnih sistema. Međutim, IoT povezanost omogućava ovim sistemima da automatski prate i prilagođavaju svoje parametre, pružajući korisnicima podatke u realnom vremenu za poboljšanu dugovečnost i performanse sistema. Senzori sistema prate vitalne ekološke podatke, životni vek baterije i podatke o proizvodnji električne energije. Kada ove podatke analiziraju Arduino ploče i podele ih putem interneta, korisnici mogu daljinski pregledati performanse sistema putem mobilne aplikacije ili kontrolne table zasnovane na oblaku (cloudu) [3]. IoT tehnologija koristi procesore (CPU), detektore i hardver za komunikaciju, kao i prikupljanje i prenos podataka, omogućavajući daljinski pristup i kontrolu opreme sa bilo koje lokacije.

"Jedna od suštinskih tehnologija je Mreža informacija (IoT), koja omogućava pametniji život povezivanjem uređaja sa oblakom (cloud). Uređaji Interneta stvari olakšavaju razmenu podataka između povezanih mašina preko mreža. U modernom svetu, električna energija je neophodna jer napaja kućne aparate, transport, frižidere, osvetljenje i grejanje [4]. Uprkos povećanoj potrošnji energije, energetski resursi se smanjuju. Da bi se ovo rešilo, električna energija se proizvodi iz obnovljivih i reciklabilnih resursa. Fosilna goriva, prirodni gas i ugalj su primeri neobnovljivih izvora; s druge strane, obnovljivi resursi uključuju sunce, vetar i plimu. Solarna energija, neiscrpan izvor energije, rešava problem nestašice struje. Fotonaponski efekat je način na koji solarni paneli pretvaraju sunčevu svetlost u električnu energiju. Merimo struju i

napon pomoću senzora. Vrednosti struje i napona prikazuju se na LCD-u. Senzori su povezani sa uređajem Interneta stvari. Putem mreže, parametri se prikazuju na ekranu i prate sa bilo koje lokacije. Korisniji obnovljivi izvor energije je solarna energija. Da bi se dobio maksimalan energetska učinak, solarni paneli moraju biti konstantno posmatrani [5]. Internet stvari može daljinski pratiti i kontrolisati performanse panela u solarnim energetskim instalacijama. Podaci o naponu, temperaturi, struji i proizvodnji energije su među raznim karakteristikama koje prikupljaju fotonaponski sistemi za praćenje koji poseduju mogućnosti Interneta stvari—pružajući praktične uvide za maksimiziranje produktivnosti i garantovanje pravovremenog održavanja. Ovaj pristup čini solarne elektrane pouzdanijim i održivijim omogućavanjem poboljšane kontrole [6]. Poboľšanjem ukupnih performansi sistema, predviđanjem potreba za održavanjem i optimizacijom upotrebe energije, ovi podaci pružaju pouzdan i proširiv pristup upravljanju proizvodnjom solarne energije.

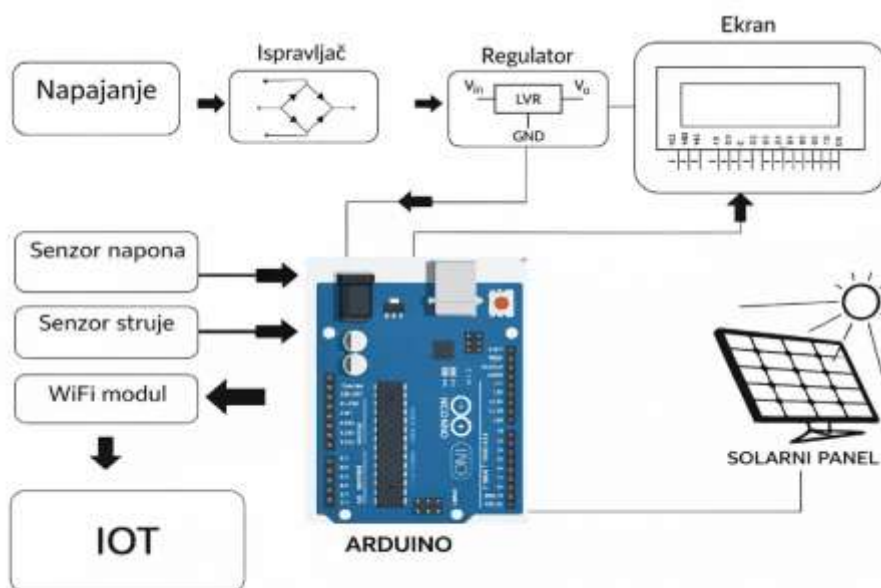
2.2. Trenutno stanje razvoja pametnih solarnih energetskih sistema

IoT aplikacije se sve više koriste u raznim industrijama, uključujući solarnu fotonaponsku (PV). Ove aplikacije imaju za cilj prikupljanje podataka u realnom vremenu radi optimizacije performansi i efikasnosti sistema. Istraživači poput SRR Diwakar Purusothaman i dr. fokusiraju se na agente distribuiranih energetskih resursa (DG), koji olakšavaju komunikaciju između ovih agenata. Alpe Gorgon i njegove kolege razvili su trenutnu infrastrukturu za praćenje sistema obnovljive energije, mereći očitavanja napona i struje iz svakog obnovljivog izvora. Podaci se obrađuju pomoću mikrokontrolera 18F4450 i prenose putem USB-a na PC radi vizualizacije i skladištenja u realnom vremenu. Goto i Yoshihiro razvili su sistem za daljinsko praćenje i upravljanje za preko 20.000 elektrana u 8.000 telekomunikacionih objekata. Sistem integriše funkcije upravljanja i daljinskog motrenja u jednu platformu, poboljšavajući informacije i komunikaciju. Koristi kodirani dualni interfejs za efikasne operacije. Softver za praćenje automatski određuje dnevne, nedeljne i mesečne izveštaje na osnovu snimljenih podataka [7]. Jiju i njegov tim razvili su online sistem za praćenje i kontrolu distribuiranih obnovljivih izvora energije (RES) zasnovan na Androidu, koji koristi kodirani dualni interfejs za automatsko određivanje dnevnih, nedeljnih i mesečnih izveštaja za svako merenje, pružajući praktičan alat za kontrolu i poboljšanje funkcionalnosti RES Sistema [8]. Istraživači iz Malavija razvili su bežični sistem za daljinsko praćenje instalacija obnovljive energije, nudeći pristupačno rešenje za praćenje proizvodnje i performansi energije. Ovaj Sistem za praćenje obnovljive energije (REMS) je novi koncept za

otvoreni kod (open-source), jeftin sistem za prenos i prikupljanje podataka koji koristi Raspberry Pi, Internet stvari i višekorisničko daljinsko praćenje u oblaku kako bi se iskoristile decentralizovane RE (obnovljive) elektrane [9].

2.3. Metodologija dizajna pametnih solarnih energetske sistema

Slika 2.1. ilustruje blok dijagram sistema za praćenje solarne energije zasnovanog na IoT-u. Sensori napona i struje detektuju električnu energiju koju proizvodi solarni panel nakon što apsorbira sunčevu svetlost. Arduino ploča je primarni kontroler i prima podatke od ovih senzora. Da bi se omogućilo daljinsko praćenje i kontrola, Arduino analizira podatke i razmenjuje ih sa Wi-Fi modulom pre nego što ih pošalje na server Interneta stvari.



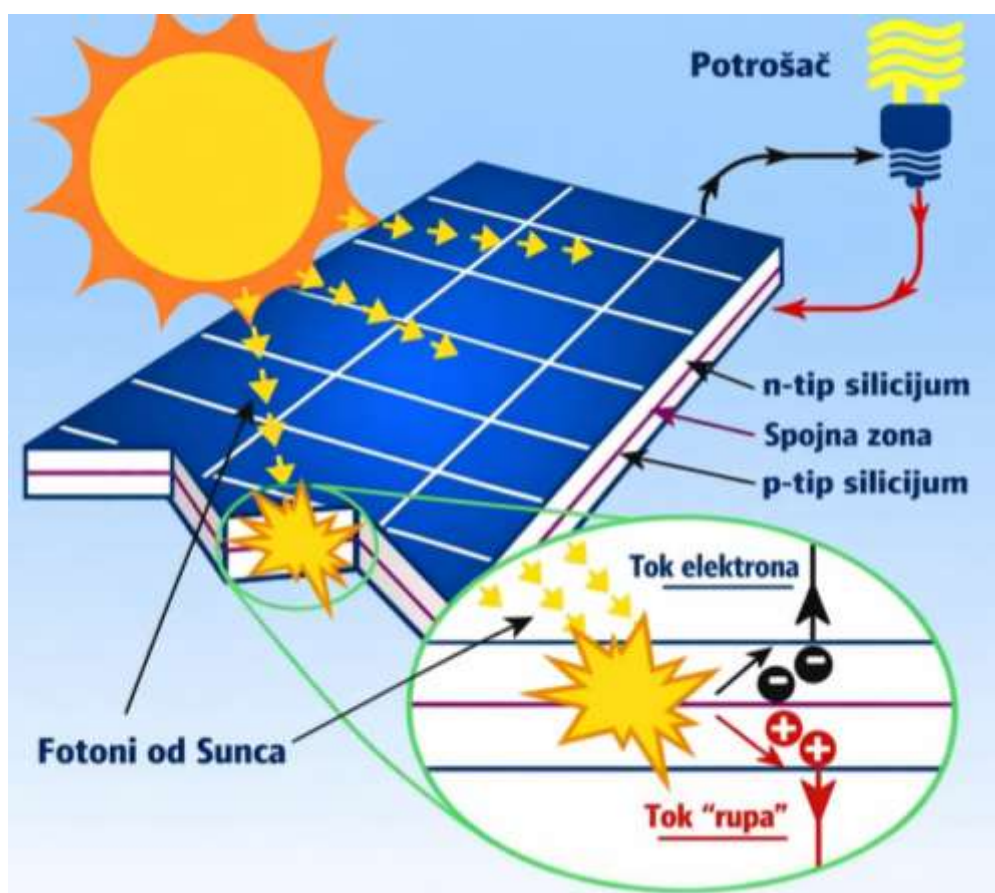
Slika 2.1. Šematski dijagram sistema za praćenje solarne energije sa IoT podrškom.

Sistem takođe uključuje napajanje sa regulatorom napona za održavanje stabilnog napona i ispravljač za pretvaranje naizmjenične struje (AC) u jednosmernu (DC). Očitavanja temperature, napona i struje prikazuju se u realnom vremenu na LCD-u [10]. Da bi se zaštitio i produžio vek trajanja baterije, senzor temperature prati njen nivo toplote i uključuje ventilator ako ona poraste iznad 40°C. Ova konfiguracija pruža efikasno i automatizovano upravljanje solarnom energijom, čineći izvodljivim daljinski pristup zasnovan na internetu. IoT tehnologija se koristi za prikupljanje podataka iz različitih izvora radi praćenja performansi sistema, kao što su solarni invertori. Ovi podaci se prenose na sisteme za daljinsko praćenje zasnovane na oblaku, omogućavajući korisnicima pristup putem aplikacija

za pametne telefone i uređaja pametne kuće. Arduino mikrokontroler očitava senzor, a merenja napona se prikupljaju pomoću razdelnika napona. Arduino ploča i ESP32 modul povezani su putem USB kabela, a podaci senzora se prikazuju na web stranici pomoću ESP8266. Ovaj sistem olakšava izbor i integraciju solarne energije u velike energetske projekte.

2.4. Pojam, karakterizacija i projektovanje solarnog panela

Solarni fotonaponski (PV) nizovi su sistemi obnovljive energije koji pretvaraju sunčevu svetlost u električnu energiju. Ovi nizovi se sastoje od nekoliko međusobno povezanih solarnih panela ili modula, od kojih svaki sadrži brojne solarne ćelije. Kada sunčeva svetlost pogodi ove ćelije, one stvaraju jednosmernu struju (DC) putem fotonaponskog efekta (Slika 2.2).



Slika 2.2. Fotonaponska ćelija

Pojedinačni paneli mogu biti raspoređeni u serijske ili paralelne konfiguracije kako bi

formirali niz, koji se može postaviti na krovove, otvoreno zemljište ili inkorporirati u dizajn zgrada.

Solarni PV nizovi služe kao održiv i ekološki prihvatljiv izvor električne energije, generišući čistu energiju bez emisija ili zagađenja. Široko se koriste u stambenim, komercijalnim i industrijskim okruženjima, kao i na velikim solarnim farmama. Da bi se poboljšala proizvodnja energije, PV nizovi često koriste tehnologije kao što je praćenje tačke maksimalne snage (MPPT) i uključuju invertore za pretvaranje jednosmerne struje (DC) u naizmeničnu struju (AC), koja je pogodna za domove i preduzeća.

Solarni fotonaponski (PV) nizovi igraju ključnu ulogu u smanjenju emisije gasova staklene bašte i rešavanju klimatskih promena iskorišćavanjem obilne sunčeve energije za stvaranje električne energije.

Njihova efikasnost i ekonomska isplativost učinile su ih favorizovanom opcijom za proizvodnju obnovljive energije širom sveta.

2.5. Dizajn i implementacija pametnih solarnih energetske sistema

Predloženi sistem za praćenje solarne energije zasnovan na IoT-u koristi senzore napona i struje za kontinuirano praćenje električnih performansi solarnih panela. Senzor napona prati izlazni napon, dok senzor struje meri struju koja teče kroz panele. Ovi podaci se prenose na ESP8266 modul, koji kombinuje Wi-Fi povezanost sa funkcionalnošću mikrokontrolera [10].

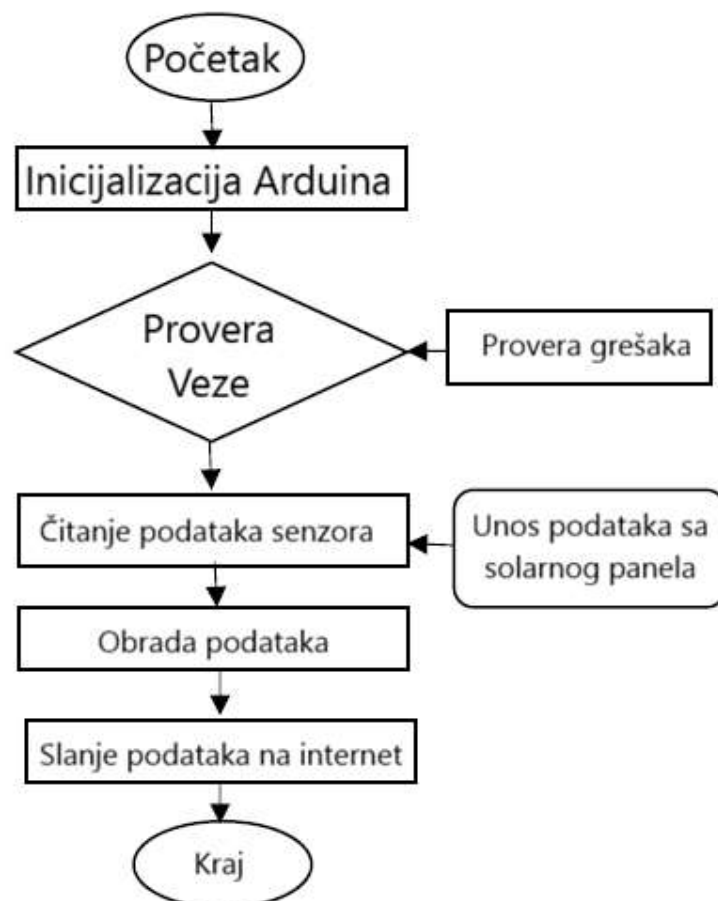
Programiran pomoću Arduino IDE, ESP8266 u početku radi kao mikrokontroler za čitanje izlaza senzora putem serijskih portova. Zatim šalje ove informacije na server u oblaku koristeći MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protokol, omogućavajući efikasan prenos podataka i daljinski pristup.

Pored toga, LCD panel prikazuje očitavanja snage, napona i struje u realnom vremenu, pružajući trenutnu povratnu informaciju o performansama sistema.

Ova integracija senzorske tehnologije i povezanosti sa oblakom poboljšava upravljanje energijom u solarnim instalacijama, što dovodi do poboljšane efikasnosti i smanjenih troškova održavanja. Dijagram toka praćenja solarne energije zasnovanog na IoT-u prikazan je na Slici 2.3.

Glavni cilj ovog projekta je instaliranje opreme za solarno praćenje i korišćenje Interneta stvari (IoT) za distribuciju podataka [8].

Primarna odgovornost je praćenje energetske upotrebe sistema merenjem napona i struje, korišćenjem ESP8266 za napredno očitavanje, i korišćenjem monitora mašine za solarnu energiju za pružanje preporuka o snazi i energiji.



Slika 2.3. Dijagram toka za sistem praćenja solarne energije.

2.5.1. Solarni panel kao konvertorski element

Fotonaponska ćelija, takođe poznata kao solarna ćelija, je uređaj koji koristi fotonaponski efekat za transformaciju sunčeve svetlosti u električnu energiju. U mnogim različitim primenama, često se koristi solarni panel od 12V. Uređaji koji se nazivaju solarni paneli apsorbuju sunčevo zračenje i transformišu ga u električnu energiju. Koriste se u raznim kontekstima, kao što su solarne farme koje isporučuju električnu energiju rezidencijama i preduzećima.

2.5.2. Modul za Wi-Fi ESP8266

Bežični modul ESP8266 koristi se u IoT aplikacijama jer pruža bežičnu povezanost i

povezane uređaje bez potrebnog hardvera. Ovaj modul je ekološki prihvatljiv i podržava različite komunikacione protokole. Zahteva manje troškova i jednostavnu integraciju sa servisima u oblaku.

2.5.3.LCD platforma za prikazivanje podataka

Jedna vrsta ekrana koja može prikazivati tekst je ekran sa tečnim kristalima (Liquid Crystal Display). Zbog svoje manje potrošnje energije, često se nalazi u uređajima kao što su telefoni, televizori, kalkulatori, itd. LCD pruža pomoć u realnom vremenu prikazivanjem napona, struje i temperature. 16x2 karakterni LCD-ovi imaju dva reda teksta, omogućavajući lokalno praćenje performansi baterije i solarnog panela bez daljinskog pristupa podacima, i jednostavan interfejs između Arduino Uno mikrokontrolera i LCD-a. Sistem pruža prezentaciju podataka u realnom vremenu za efikasne procene i informisano donošenje odluka, pružajući trenutnu povratnu informaciju o indikatorima performansi solarnog panela kao što su napon, struja i temperatura.

2.5.4.Senzor za detekciju napona

Napon sadržan u objektu meri se i prati pomoću senzora napona. AC ili DC status napona određuju osetljivi detektori napona. Za praćenje i analizu napona, Arduino Uno je povezan sa senzorom napona. Senzori napona imaju prednost jer zahtevaju dugotrajno prikupljanje podataka i obezbeđuju prediktivno održavanje.

2.5.5.Senzor za detekciju jačine električne struje

Senzor za detkciju jačine električne struje vrši merenje jačine električne struje koji se koristi je ACS 712A (20A) senzor. On se koristi se za merenje električne struje u kolu i njeno konvertovanje u signal koji se može pratiti u celom sistemu za proizvodnju električne energije.

2.5.6.Arduino UNO

Postavka Arduino Uno je dizajnirana da spoji veliku funkcionalnost sa jednostavnošću i lakom upotrebom. Koristi se kao čvorište za povezivanje panela Interneta stvari i solarne energije. Napaja se iz izvora jednosmerne struje od 5 volti. Arduino Uno kontroliše senzore koji mere napon, struju i temperaturu sa solarnog panela. Wi-Fi modul šalje ove podatke na IoT platformu za daljinsko praćenje.

2.5.7.Napajanje solarnih panela

Sastoji se od ispravljačkog kola, koje menja naizmeničnu struju (AC) izvora napajanja u jednosmernu struju (DC). Nudi stabilan napon aparatu koji radi na postavljenom izvoru napajanja. Izlaz dobijen iz regulisanog izvora napajanja može biti jednosmeran ili naizmeničan, ali je uvek blizak DC-u. Jedan izraz za kontrolisano DC napajanje je linearno električno napajanje. U ovome postoji više blokova, uključujući ispravljač, regulator, DC filter i transformator za smanjenje napona (step-down).

2.6. Implementacija pametnih solarnih energetske sistema

2.6.1.Hardverska postavka pametnih solarnih energetske sistema

Nekoliko delova čini sistem za praćenje solarne energije zasnovan na Internetu stvari koji radi zajedno kako bi se maksimizirala snaga. Solarni panel konvertuje energiju sunčevog zračenja u DC energiju, koja se čuva u bateriji i korisnik je može kasnije koristiti. Tamo gde struja prolazi kroz solarni panel, bateriju i opterećenja, meri se strujnim senzorom. Nasuprot tome, napon koji proizvode solarni paneli meri se senzorima napona. Arduino Uno deluje kao centralna procesorska jedinica, čitajući vrednosti sa analognih pinova i izračunavajući snagu na osnovu očitavanja. Sa Arduino Uno povezanim na internet, ESP8266 Wi-Fi modul može prenositi podatke na server u oblaku.

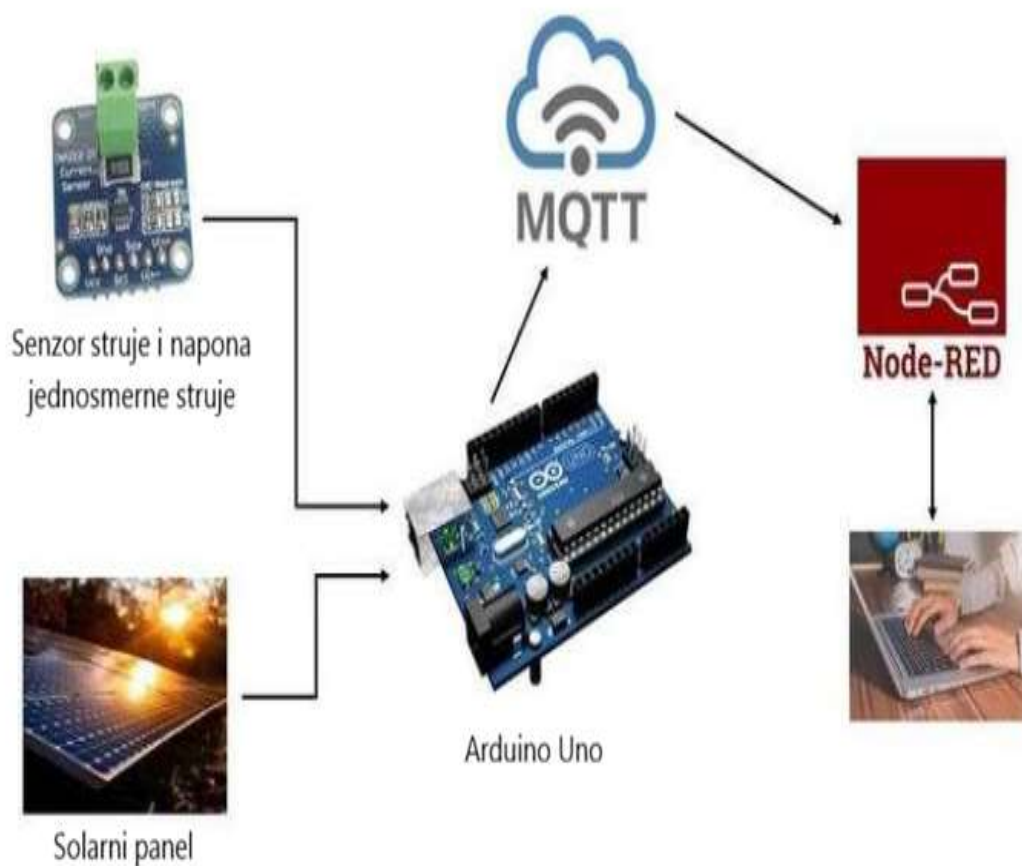
Tabela 2.1. Hardverske specifikacije

S. No	Components	Specifications
1	Solar panel	12 Watts
2	Voltage Sensor	Voltage divider (30V)
3	Current Sensor	ACS712 (20 Amps)
4	Processor	ESP8266 module

Glavne komponente sistema za praćenje solarne energije zasnovanog na Internetu stvari navedene su u Tabeli 2.1: Hardverske specifikacije zajedno sa njihovim istaknutim karakteristikama. Sistem se napaja solarnim panelom od 12 vati koji apsorbuje sunčevu svetlost i transformiše je u električnu energiju. Kako bi se osiguralo da izlazni napon iz solarnog panela ostane u sigurnim granicama, senzor napona koristi naponski razdelnik deklarisan za 30V [4]. Da bi se pratila potrošnja energije, sistemsku struju prati senzor struje, ACS712 koji može meriti do 20 ampera. Procesor sistema, modul ESP8266, obrađuje podatke i omogućava bežičnu komunikaciju za daljinsko praćenje. Dok jednosmerni (DC) motor služi kao probno opterećenje da pokaže kako se solarna energija može koristiti. LCD prikazuje vrednosti poput napona, struje, temperature, vlažnosti i energije. Pruža trenutnu povratnu informaciju korisnicima.

2.6.2. Konfiguracija programa

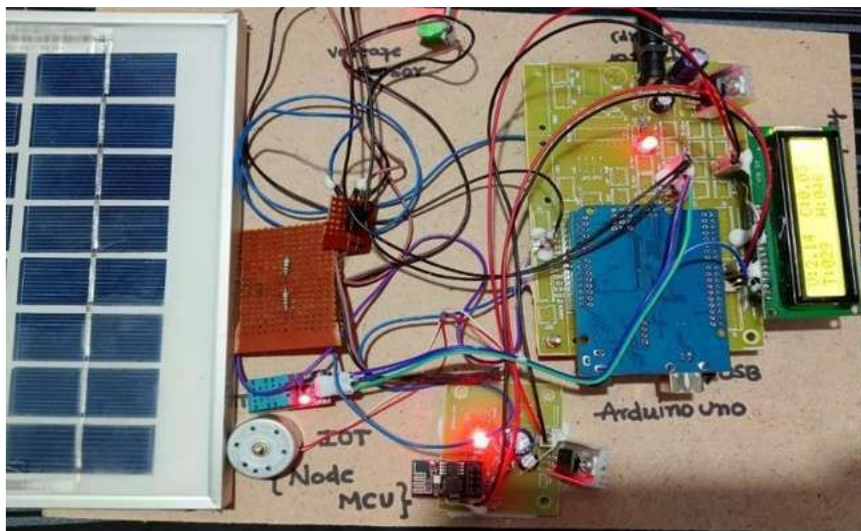
Slika 2.4. prikazuje strukturnu šemu sistema. Ovaj sistem otprema kod na ploču koristeći besplatan softver otvorenog koda Arduino Software (IDE). Modul je povezan sa senzorom i kolom za detekciju napona i struje. Potrebno je da se kreira softversko rešenje u C programskom jeziku u cilju detektovanja nivoa primljene solarne energije, na osnovu čega se izračunava proizvedena količina električne energije i novo snage. Tabele snage, napona i jačine električne struje prikazuju se na stranici za praćenje, koja je web stranica koja se koristi za evaluaciju i monitoring solarnog sistema za proizvodnju električne energije [2]. Podaci o solarnom panelu u realnom vremenu prikazuju se na navedenoj web stranici. Za mobilne korisnike, razvijena je aplikacija koja pruža podatke u realnom vremenu sa solarnih panela koristeći Blink aplikaciju. Ovo omogućava kreiranje kontrolne tabele unutar aplikacije koja prikazuje vrednosti.



Slika 2.4. Strukturna šema sistema.

2.7. Kvantitativna analiza proizvodnje u solarnim sistemima

Rezultati na Slici 2.5. ilustruju funkcionisanje sistema za praćenje solarne energije opisanog u predloženom radu. Ovaj sistem je razvijen korišćenjem Arduino IDE-a, koji olakšava kreiranje veb stranice za daljinsko praćenje. Ključni parametri kao što su temperatura, napon, vlažnost i struja se izbacuju i prikazuju i na LCD ekranu i na veb interfejsu. Solarni panel kontinuirano prati izloženost sunčevoj svetlosti, pružajući ključne podatke o performansama.



Slika 2.5. Digitalni prikaz predloženog sistema.

Korišćenjem IoT tehnologije, sistem prikuplja očitavanja u realnom vremenu sa solarnih panela, obrađuje ove informacije i nudi korisnicima trenutnu vidljivost u njihove metrike proizvodnje energije. Ova integracija IoT-a omogućava efikasno praćenje proizvodnje solarne energije, poboljšavajući performanse solarnih panela i maksimizirajući energetska efikasnost. Sistem za praćenje koristi ESP8266 modul za uspostavljanje veze sa oblakom (cloud), omogućavajući besprekoran prenos podataka na platforme kao što je Thing Speak. Ova postavka prikazuje napon i struju lokalno i šalje podatke u oblak za dalju analizu i vizualizaciju.

Tabela 2.2. prikazuje različite parametre solarnog panela merene pod različitim uslovima u određeno vreme i datume. Podaci sistema za praćenje solarne energije pokazuju kako varijable kao što su napon, struja, temperatura i vlažnost utiču na performanse sistema tokom vremena.

Možemo odrediti performanse sistema i uočiti eventualne probleme ispitivanjem ovih podataka. Možemo posmatrati kako faktori životne sredine utiču na performanse solarnog sistema ispitivanjem ovih tačaka podataka. Temperatura i vlažnost pružaju informacije o spoljnim faktorima koji mogu uticati na efikasnost, dok napon i struja pokazuju koliko energije sistem proizvodi.

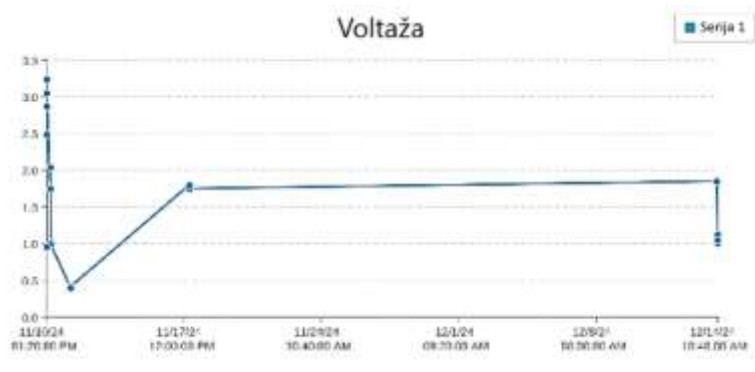
Tabela 2.2. Parametri solarnog panela u različitim uslovima

Redni broj	Datum	Vreme	Napon [V]	Jačina električne struje [A]	Temperature [°C]	Vlažnost [%]
1	12-9-2024	16:18:38	0.41	0.09	28	48
2	11-9-2024	17:02:34	1.08	0.03	29	45
3	10-9-2024	17:34:45	2.09	0.07	29	46
4	09-9-2024	17:26:35	1.79	0.12	29	47
5	08-9-2024	13:21:25	2.89	0.19	31	39
6	07-9-2024	13:18:39	2.69	0.14	34	37
7	06-9-2024	13:29:44	0.99	0.17	32	44

8	13-8-2024	13:06:21	3.15	0.15	30	43
9	12-8-2024	12:27:12	7.09	0.06	29	42
10	11-8-2024	16:45:17	1.73	0.05	29	43
11	10-8-2024	13:12:02	7.31	0.18	30	45
12	09-8-2024	13:46:48	7.29	0.08	30	45
13	08-8-2024	13:25:43	7.19	0.02	29	45
14	07-8-2024	16:48:45	2.02	-0.15	29	46

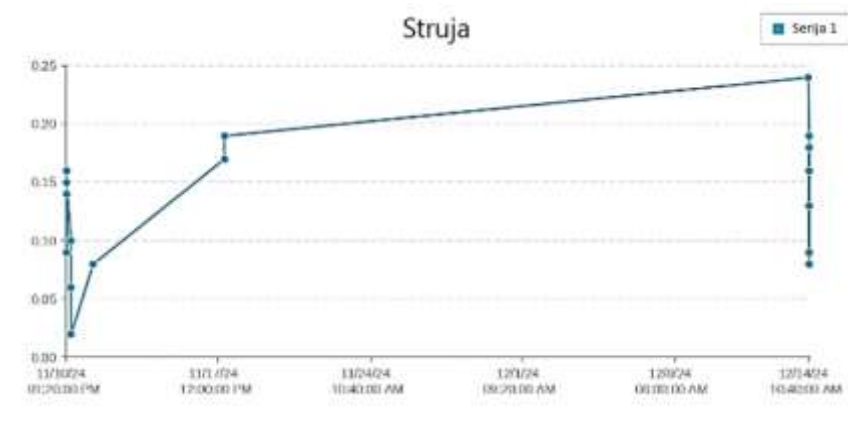
2.7.1. Grafički prikaz rezultata proizvodnje u solarnim sistemima

Slika 2.6. prikazuje promene napona na vremenskoj liniji koja se proteže od 9. avgusta 2024. u 13:00 do 16. septembra 2024. u 10:40 u Vrnjačkoj Banji. Očitavanja napona variraju između 0.0 i 3.5 (normalizovane veličine), sa podacima prikupljenim u redovnim intervalima.



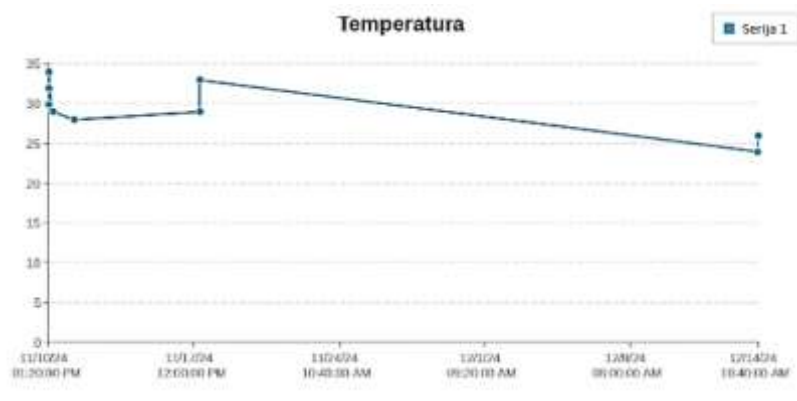
Slika 2.6. Varijacija napona tokom vremena.

Slika 2.7. prikazuje fluktuacije struje tokom istog perioda kao i prvi grafikon, pokrivajući vremenski okvir od 9. avgusta 2024. u 13:00 do 16. septembra 2024. u 10:40 pre podne u Vrnjačkoj Banji.

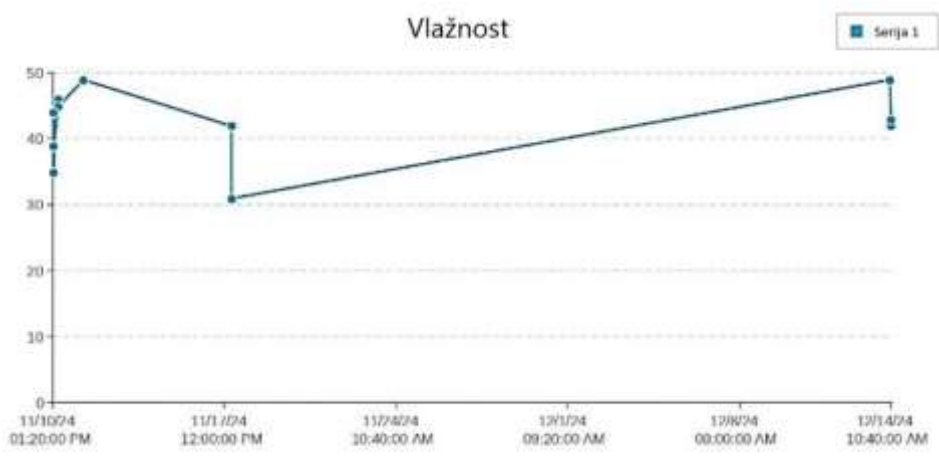


Slika 2.7. Varijacija struje tokom vremena

Slika 2.8. prikazuje podatke o temperaturi (Serija 1) tokom određenog vremenskog okvira, sa datumima koji se protežu od 9. avgusta 2024. u 13:00 do 16. septembra 2024. u 10:40. Tokom ovog trajanja, vrednosti temperature variraju između 0 i 35, ukazujući na moguće varijacije određenih datuma i vremena označenih na grafikonu.

**Slika 2.8.** Varijacija temperature tokom vremena.

Slika 2.9. ilustruje nivoe vlažnosti, izražene u procentima, zabeležene u različitim vremenskim intervalima od 9. avgusta 2024. u 13:00 do 16. septembra 2024. u 10:40. Tačke podataka ukazuju na varijacije u vlažnosti tokom posmatranog vremenskog okvira, sa vrednostima koje se obično kreću od 0% do 50%.

**Slika 2.9.** Varijacija vlažnosti tokom vremena

2.8. Pametni solarni energetski sistem sa IoT praćenjem: Sumarna razmatranja i buduća istraživanja

Sistem za praćenje solarne energije pokretan IoT-om je efikasno rešenje za upravljanje solarnom energijom. Korišćenjem senzora za prikupljanje podataka o struji i naponu, ovaj sistem poboljšava efikasnost proizvodnje solarne energije. Uključuje mikrokontrolere i Wi-Fi modul koji prati proizvodnju i potrošnju energije, čineći ga pogodnim za domove i preduzeća. Ovaj sistem za praćenje prikazuje važne informacije, kao što su koliko energije solarni paneli generišu, koliko se koristi i koliko je uskladišteno. Takođe može automatski prilagoditi energetska opterećenja radi optimizacije performansi. Korisnici mogu videti očitavanja napona, struje i nivoa svetlosti u realnom vremenu na LCD ekranu, dok IoT tehnologija omogućava kontinuirano praćenje solarnih panela. Sistem se trenutno fokusira na posmatranje podataka, ali ima za cilj da omogući daljinsku kontrolu u budućnosti. Mogao bi integrisati više podataka povezanih sa vremenskim prilikama kako bi dodatno poboljšao svoje mogućnosti za bolje predviđanje. Sveukupno, ovaj sistem pokretan IoT-om pomaže u poboljšanju upravljanja solarnom energijom, čineći ga efikasnijim i održivijim za različite primene.

3. SOLARNE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE: KOMPLETAN PREGLED TEHNOLOGIJA SOLARNIH SISTEMA

3.1. Konceptualizacija tehnologije solarnih sistema

Obnovljivi izvori energije su važni za ljude od početka civilizacije.

Vekovima i na mnogo načina, biomasa se koristila za grejanje, kuvanje, pokretanje hidroenergije i energije vetra za kretanje, a sada i za proizvodnju električne energije.

Obnovljivi izvori energije generalno zavise od energetske tokova kroz Zemljin ekosistem od insolacije sunca i geotermalne energije Zemlje [11].

Obnovljivi izvori energije često mogu zadovoljiti trenutnu svetsku potražnju za energijom, tako da je njihov potencijal ogroman.

Oni mogu poboljšati raznolikost na energetske tržištima, osigurati dugoročne održive zalihe energije i smanjiti lokalne i globalne atmosferske emisije.

Takođe mogu pružiti komercijalno atraktivne opcije za zadovoljavanje specifičnih potreba za energetske uslugama (posebno u zemljama u razvoju i ruralnim područjima), stvoriti nove mogućnosti za zapošljavanje i ponuditi mogućnosti za lokalnu proizvodnju opreme.

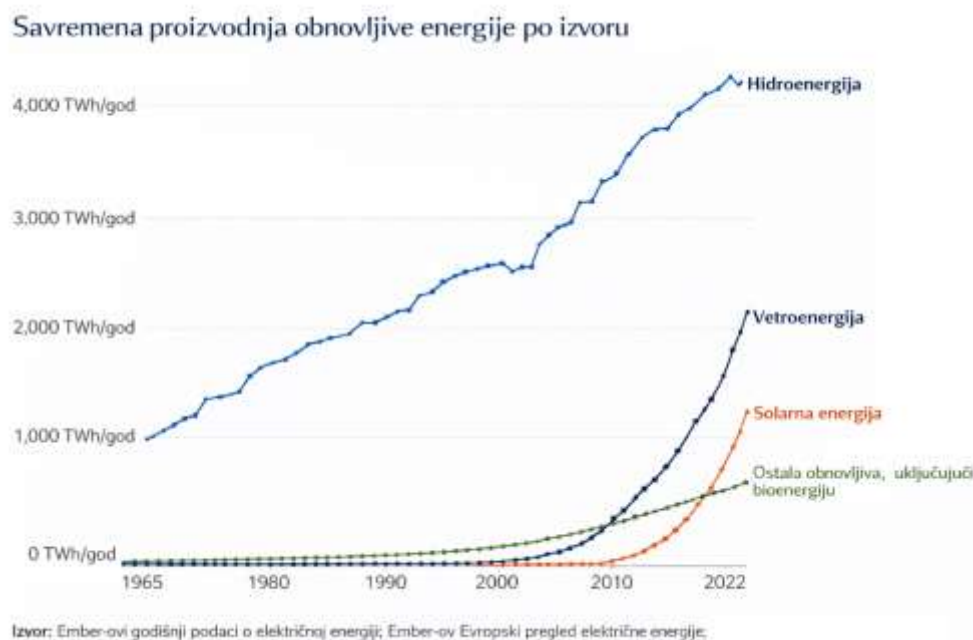
Postoji mnogo obnovljivih tehnologija. Iako su često komercijalno dostupne, većina je još uvek u ranoj fazi razvoja i nisu tehnički zrele.

One zahtevaju kontinuirane napore u istraživanju, razvoju i demonstraciji.

Pored toga, manji broj tehnologija obnovljive energije može da se takmiči sa konvencionalnim gorivima po ceni, osim u slučaju nekih tržišnih izuzetaka.

Međutim, značajna smanjenja troškova mogu se postići za većinu obnovljivih izvora, kroz korišćenja državnih subvencija, čineći ih konkurentnijim.

To će zahtevati dalji tehnološki razvoj i tržišnu primenu – i podsticanje proizvodnih kapaciteta ka masovnoj proizvodnji [11, 12].



Slika 3.1. Proizvodnja obnovljive energije u poslednjih 40 godina po izvorima[77]

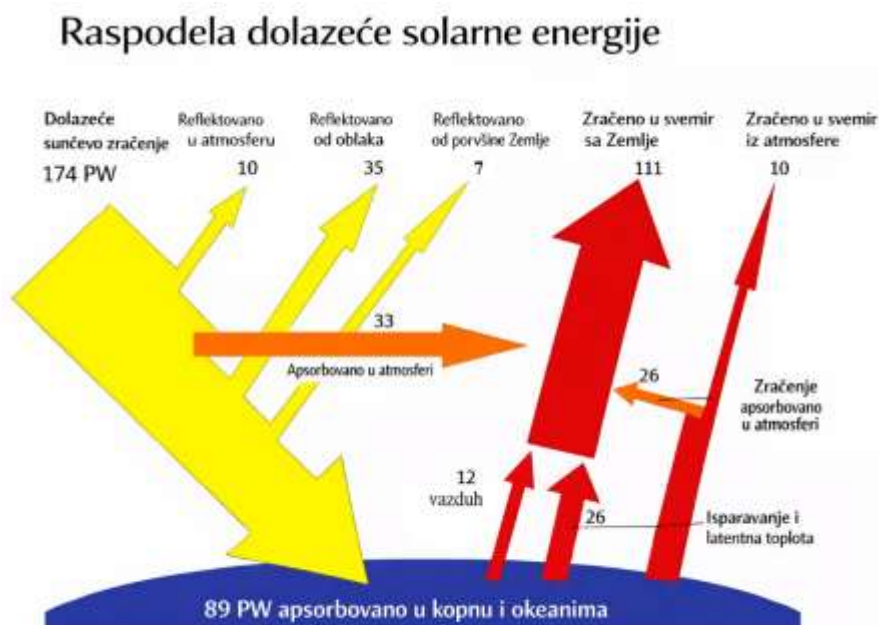
3.1.1. Solarna energija: pojam i karakterizacija

Solarna energija je najčistiji, najzastupljeniji dostupni obnovljivi izvor energije. SAD poseduju solarne resurse najboljih performansi na svetu. Današnja tehnologija nam omogućava da iskoristimo ovaj resurs na nekoliko načina, dajući javnim i komercijalnim subjektima fleksibilne načine da koriste i svetlost i toplotu sunca [13].

Solarna energija nastaje od energije zračenja Sunca koja se fokusira i prikuplja na Zemlji. Sunce stvara svoju energiju putem termonuklearnih procesa koji pretvaraju oko 650.000.000 tona vodonika u helijum svake sekunde. Proces konvertuje toplotu i elektromagnetno zračenje. Toplota ostaje u Suncu i održava termonuklearnu reakciju. Elektromagnetno zračenje (uključujući vidljive, infracrvene i ultraljubičaste) nastavlja da se prostire u svemiru u svim pravcima [14].

Samo mali deo ukupnog zračenja koji se proizvede stiže do Zemlje. Zračenje koje stigne do Zemlje je indirektan izvor gotovo svake vrste energije koja se danas koristi. Izuzeci su geotermalna energija, nuklearna fisija i fuzija. Čak i fosilna goriva duguju svoje poreklo suncu [14]; ona su nekada bila žive biljke i životinje zavisne od sunca. Količina sunčevog zračenja koja evoluirala do vrha Zemljine atmosfere je 52 PW (10^{15} W), od čega se 30% energije reflektuje u svemir. Dakle, u svemiru, dostupno je više solarne energije za prikupljanje, što je podstaklo potencijalne šeme za lansiranje fotonaponskih nizova u svemir kao satelita, pomoću kojih bi se hvatala Sunčeva energija, koja bi se zatim slala nazad na Zemlju u obliku mikrotalasa za zemaljske primene. Posmatrajući Sunce direktno iznad nas u smeru vrha atmosfere (kada je u zenitu), fluks

zračenja iznosi oko $1,4 \text{ kW/m}^2$ energije, "solarna konstanta". Budući da je ukupna količina energije (nafta, gas, uglj, nuklearna, hidro, sve) koju ljudi koriste na Zemlji iznosi snagu od 18 TW, a 174 PW je količina zračenja koja pogađa izloženu hemisferu Zemlje (oko 10.000 puta više od toga), ako bismo mogli da uhvatimo čak i malu količinu toga, neposredna energetska kriza bi bila izbegnuta [15].



Slika 3.2. Pregled dolazne solarne energije.

Sunčeva svetlost se sastoji od dve komponente - direktne komponente sunčeve svetlosti i difuzne komponente sunčeve svetlosti. Sunčevo zračenje prolazi kroz atmosferu i stiže do zemljinog tla zahvaljujući molekulima vazduha u atmosferi, vodenoj pari i prašini. Apsorpcija, refleksija i rasejanje sunčevog zračenja smanjuju intenzitet zračenja i menjaju pravac zračenja i spektralnu distribuciju zračenja. Zbog toga je stvarna solarna radijacija koja stiže do tla obično uzrokovana direktnom difuzijom dve navedene komponente (direktnim i difuznim zračenjem). Direktna komponenta sunčevog zračenja predstavlja zračenje direktno od Sunca, a pravac i smer zračenja su jedinstveno definisani.

Minimizacijom sume kvadrata odstupanja difuzne komponente iradijance od odgovarajuće komponente koja je dobijena na osnovu merenja iradijance izveden je empirijski korigovan izraz za difuznu konstantu C:

$$C = 0.2018 + 0.0143 * \sin \left\{ \frac{360}{365} * (n - 100) \right\} \quad (3.1)$$

Prethodni izraz za procenu difuzne komponente horizontalnog zračenja ima ograničenu tačnost i može se koristiti u slučaju vedrih dana. Kada se posmatraju merenja iradijance na horizontalnu površinu, pogodnije je koristiti empirijske relacije za procenu difuzne komponente horizontalne iradijance.

Najpoznatija i najviše korišćena empirijska relacija za procenu difuzne komponente horizontalnog zračenja data je od strane Liu-Jordan-a. Ova relacija definiše

udeo difuzne komponente u ukupnoj horizontalnoj insolaciji u funkciji indeksa vedrine:

$$\frac{\overline{I_{DH}}}{\overline{I_H}} = 1.39 - 4.027 * K_T + 5.531 * K_T^2 - 3.3108 * K_T^3 \quad (3.2)$$

Parametar K_T predstavlja indeks vedrine koji se definiše kao odnos srednje dnevne insolacije na horizontalnoj površini na Zemlji $\overline{I_H}$ i srednje dnevne ekstraterestričke insolacije na horizontalnoj površini Zemljine atmosfere $\overline{I_{0H}}$ na geografskoj širini i dužini koji odgovara mernom mestu na Zemlji.

Za određivanje difuzne komponente iradijance na solarni kolektor koji je nagnut pod određenim uglom u odnosu na horizontalnu površinu, najčešće se koristi jednostavan model za koji pretpostavlja ravnomernu raspodelu difuznog zračenja u cilindričnom koordinatnom sistemu.

U cilju određivanja difuzne komponente iradijance na kolektor, uvodi se veličina $I_{D\theta} = dI_D/d\theta$ koja definiše raspodelu ukupne difuzne iradijance I_D po incidentnom uglu θ . Za solarni kolektor postavljen horizontalno, difuzna komponenta iradijance na kolektor će biti definisana jednakošću:

$$I_{DH} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{D\theta} * \cos\theta * d\theta = 2 * I_{D\theta} \quad (3.3)$$

Za proizvoljan nagibni ugao σ kolektora u odnosu na horizontalnu površinu, difuzna komponenta iradijance na površinu kolektora prema ovom modelu je:

$$I_{DC} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{D\theta} * \cos\theta * d\theta = I_{D\theta} * (1 + \cos\sigma) = I_{DH} * \frac{1 + \cos\sigma}{2} \quad (3.4)$$

Prethodni izraz definiše jednakost $I_{DC} = I_{DH}$ u slučaju horizontalno postavljenog kolektora ($\sigma=0$) i vrednost $I_{DC} = I_{DH}/2$ u slučaju vertikalno postavljenog kolektora kada je $\sigma = \pi/2$.

Pored toga, nehorizontalna ravan takođe prima refleksiju zračenja sa tla. Direktna sunčeva svetlost, difuzna i reflektovana sunčeva svetlost predstavljaju ukupno sunčevo zračenje. Difuzna sunčeva svetlost ima veliki opseg varijacija; kada je vedro bez oblaka, iznosi 10% ukupne sunčeve svetlosti. Međutim, kada je nebo prekriveno tamnim oblacima i sunce se ne može videti, ukupna sunčeva svetlost jednaka je difuznoj sunčevoj svetlosti. Stoga, polip-kolektor sakuplja energiju obično daleko više od kolektora koji nije polip-tipa.

Reflektovana sunčeva svetlost je generalno slaba, ali kada je tlo prekriveno snegom, vertikalna refleksija sunčeve svetlosti može biti do 40% ukupne sunčeve svetlosti. Ljudi se danas oslanjaju na solarnu energiju da bi došli do čiste električne energije i umanjili efekte klimatskih promena.

Ukupne količine resursa solarne energije deset hiljada puta veće od energije koju koriste ljudi. Možemo reći da je gustina solarne energije niska, a da na nju utiču lokacija i godišnje doba, što je značajan problem u razvoju i korišćenju solarne energije [16].

3.2. Solarne tehnologije u proizvodnji električne energije

3.2.1. Tehnologija solarne fotonaponske energije

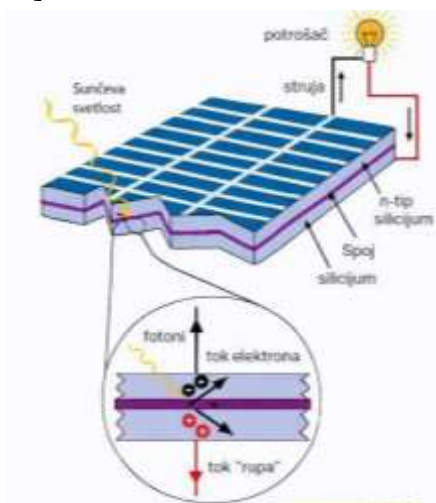
Solarna fotonaponska energija nije ništa drugo do direktno pretvaranje sunčeve svetlosti u električnu energiju koristeći koncept zasnovan na fotonaponskom efektu [17]. Termin "fotonaponski" potiče od grčke reči „φως→fos“ (svetlost) i termina "voltaic", što znači električni, u čast italijanskog fizičara Volte, po kome je SI jedinica za merenje napona [**V**] **volt** dobila ime. Fotonaponski efekat je prvi put prepoznao 1839. godine francuski fizičar A.E. Becquerel. Charles Fritts je 1883. godine premazao selen tankim slojem zlata, stvarajući tako PV uređaj koji je bio samo oko 1% efikasan. Russel Ohl patentirao je modernu poluprovodničku solarnu ćeliju sa spojem 1946. godine, koja je otkrivena dok se radilo na nizu napredaka koji će na kraju dovesti do razvoja tranzistora. Godine 1954, radnici u Bell laboratorijama slučajno su otkrili da je silicijum dopiran određenim primesama bio veoma osetljiv na svetlost, a Daryl Chapin, zajedno sa kolegama iz Bell Labsa Calvinom Fullerom i Geraldom Pearsonom, izmislio je prvi praktični uređaj za pretvaranje sunčeve svetlosti u korisnu električnu energiju, sa efikasnošću konverzije sunčeve energije od oko 6%. Prva svemirska letelica koja je koristila solarne panele bio je američki satelit Vanguard 1, lansiran u martu 1958. i opremljen solarnim ćelijama koje je napravila kompanija Hoffman Electronics. Ovi prekretnički napreci stvorili su interesovanje za proizvodnju i lansiranje geostacionarnog komunikacionog satelita, u kojem bi solarna energija obezbedila održivo napajanje. Ovaj ključni razvoj podstakao je finansiranje od strane nekoliko vlada za istraživanje poboljšanih solarnih ćelija. Danas se većina fotonaponskih modula koristi za proizvodnju električne energije povezane na mrežu [15].

Proizvodnja električne energije u PV elektranama dostiže vrhunac sredinom dana kada je sunce na najvišoj tački na nebu i može nadoknaditi najskuplju struju kada je dnevna potražnja najznačajnija. Vlasnici kuća mogu instalirati nekoliko desetina PV panela kako bi smanjili ili eliminisali svoje mesečne račune za struju, a komunalna preduzeća mogu izgraditi velike "farme" PV panela kako bi svojim kupcima obezbedila električnu energiju bez zagađenja [13].

3.2.2. Princip rada fotonaponskih ćelija

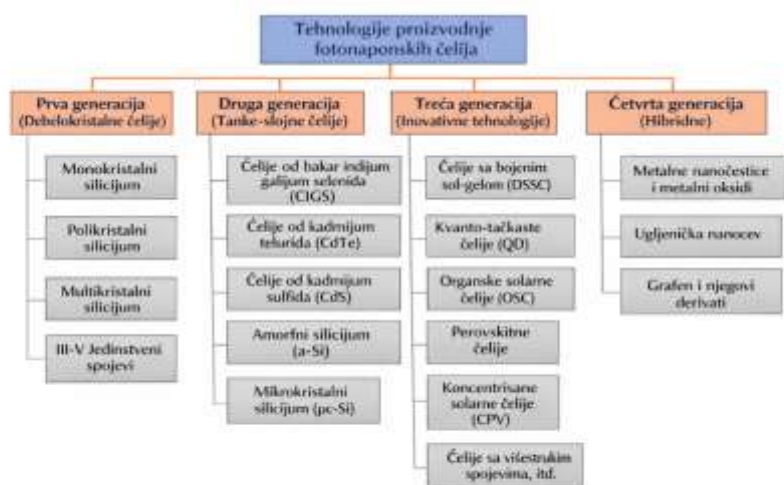
Fotonaponski sistemi (PV) napravljeni su od PV modula. Najmanja jedinica u PV modulu je solarna ćelija, koja pretvara svetlost u električnu energiju. Proizvedena

jednosmerna električna struja (DC) konstantno varira u zavisnosti od intenziteta dolazne sunčeve svetlosti. Takođe, struja zavisi od dolazne solarne energije. Sunčeva svetlost koja se apsorbuje prenosi se na elektrone atoma PV ćelije, izbacujući ih i proizvodeći električnu struju uz pomoć "ugrađenog električnog polja", koje obezbeđuje potreban napon. "Ugrađeno električno polje" stvara se pomoću dva sloja poluprovodničkog materijala: n-tip sa viškom negativnih elektrona i p-tip sa viškom pozitivnih šupljina. Najčešće korišćeni poluprovodnički materijal je silicijum. Kada silicijum n-tipa i p-tipa dođu u kontakt na p-n spoju, višak elektrona prelazi sa n-strane na p-stranu, što rezultira pozitivnim naelektrisanjem na n-strani samog spoja i nakupljanjem negativnog naelektrisanja na p-strani. [19]



Slika 3.3. Fotonaponska ćelija.

3.2.3. Klasifikacija fotonaponskih ćelija



Slika 3.4. Različiti tipovi solarnih ćelija i trenutni razvoj u ovoj oblasti [20].

Možemo uočiti četiri glavne kategorije kao generacije fotonaponske tehnologije za poslednjih nekoliko decenija od pronalaska solarnih ćelija.

1. **Prva generacija:** Ova kategorija uključuje tehnologije fotonaponskih ćelija zasnovane na monokristalnom, polikristalnom silicijumu i galijum arsenidu (GaAs).
2. **Druga generacija:** Ova generacija uključuje razvoj tehnologije fotonaponskih ćelija prve generacije, kao i razvoj tehnologije fotonaponskih ćelija tankog filma od "mikrokristalnog silicijuma ($\mu\text{-Si}$) i amorfnog silicijuma (a-Si), bakar indijum galijum selenida (CIGS) i kadmijum telurid/kadmijum sulfid (CdTe/CdS) fotonaponskih ćelija.
3. **Treća generacija:** Ova generacija se odnosi na fotonaponske tehnologije zasnovane na novijim hemijskim jedinjenjima. Pored toga, ova generacija takođe pripada tehnologijama koje koriste nanokristalne "filmove", kvantne tačke, bojom senzibilisane solarne ćelije, solarne ćelije zasnovane na organskim polimerima, itd.
4. **Četvrta generacija:** Ova generacija uključuje nisku fleksibilnost ili nisku cenu polimera tankog filma zajedno sa trajnošću "inovativnih neorganskih nanostruktura kao što su metalni oksidi i metalne nanočestice ili organski zasnovani nanomaterijali kao što su grafen, ugljenične nanocevi i derivati grafena [20].

3.2.3.1. Prva generacija fotonaponskih ćelija

PV ćelije zasnovane na silicijumu bile su prvi tip fotonaponske tehnologije koji je ušao na tržište, koristeći informacije o obradi i sirovine koje obezbeđuje industrija mikroelektronike. Solarne ćelije zasnovane na silicijumu čine preko 80% instaliranog kapaciteta u svetu i imaju 90% tržišnog udela. Zbog njihove relativno visoke efikasnosti, one su najčešće korišćene ćelije. Prva generacija fotonaponskih ćelija uključuje materijale zasnovane na debelim kristalnim slojevima sastavljenim od Silicijuma. Ova generacija je zasnovana na mono-, poli- i multikristalnom silicijumu i pojedinačnim III-V spojevima (GaAs) [21,22]. Poređenje fotonaponskih ćelija prve generacije [22,23]:

- **Solarne ćelije zasnovane na monokristalnom silicijumu (m-si):**
 - Efikasnost: $15 \div 24\%$;
 - Energetski procep: $\sim 1.1 \text{ eV}$;
 - Životni vek: 25 godina;
 - Prednosti: Stabilnost, visoke performanse, dug radni vek;
 - Ograničenja: Visoki troškovi proizvodnje, veća temperaturna osetljivost, problem apsorpcije, gubitak materijala.
- **Solarne ćelije zasnovane na polikristalnom silicijumu (psi):**
 - Efikasnost: $10 \div 18\%$;
 - Energetski procep: $\sim 1.7 \text{ eV}$;

Životni vek: 14 godina;

Prednosti: Postupak proizvodnje je jednostavan, isplativ, smanjuje otpad silicijuma, veća apsorpcija u poređenju sa m-si;

Ograničenja: Niža efikasnost, veća temperaturna osetljivost.

- ***Solarne ćelije zasnovane na GaAs:***

Efikasnost: 28 ÷ 30%;

Energetski procep: ~1.43 eV;

Životni vek: 18 godina;

Prednosti: Visoka stabilnost, niža temperaturna osetljivost, bolja apsorpcija od m-si, visoka efikasnost;

Ograničenja: Izuzetno skupe [22].

3.2.3.2. Druga generacija fotonaponskih ćelija

Fotonaponske ćelije tankog filma zasnovane na CdTe, galijum selenidu i bakru (CIGS) ili amorfnom silicijumu dizajnirane su da budu jeftinija zamena za ćelije od kristalnog silicijuma. One nude poboljšana mehanička svojstva idealna za fleksibilne primene, ali to dolazi sa rizikom smanjene efikasnosti. Dok je prva generacija solarnih ćelija bila primer mikroelektronike, evolucija tankih filmova zahtevala je nove metode rasta. Otvorila je sektor za druge oblasti, uključujući elektrohemiju [24]. Poređenje fotonaponskih ćelija druge generacije [22]:

- ***Solarne ćelije zasnovane na amorfnom silicijumu (a-si):***

Efikasnost: 5 ÷ 12%;

Energetski procep: ~1.7 eV;

Životni vek: 15 godina;

Prednosti: Manje skupe, dostupne u velikim količinama, netoksične, visok koeficijent apsorpcije;

Ograničenja: Niža efikasnost, poteškoće u odabiru dopant materijala, loš životni vek manjinskih nosilaca.

- ***Solarne ćelije zasnovane na kadmijum teluridu/kadmijum sulfidu (CdTe/CdS):***

Efikasnost: 15 ÷ 16%;

Energetski procep: ~1.45 eV;

Životni vek: 20 godina;

Prednosti: Visoka stopa apsorpcije, manje materijala potrebno za proizvodnju;

Ograničenja: Niža efikasnost, Cd je ekstremno toksičan, Te je ograničen, osetljivije na temperaturu.

- ***Solarne ćelije zasnovane na bakar indijum galijum selenidu (CIGS):***

Efikasnost: 20%;

Energetski procep: ~1.7 eV;

Životni vek: 12 godina;

Prednosti: Manje materijala potrebno za proizvodnju;

Ograničenja: Veoma visoka cena, nestabilne, osetljivije na temperaturu, veoma nepouzdanе [22].

3.2.3.3. Treća generacija fotonaponskih ćelija

Treća generacija solarnih ćelija (uključujući tandem, perovskit, senzibilisane bojom, organske i koncepte u nastajanju) predstavlja širok spektar pristupa, od jeftinih sistema niske efikasnosti (senzibilisane bojom) organske solarne ćelije) do skupih sistema visoke efikasnosti (III-V ćelije sa višestrukim spojevima) za primene koje se kreću od integracije u zgrade do svemirskih aplikacija.

Fotonaponske ćelije treće generacije ponekad se nazivaju "koncepti u nastajanju" zbog njihovog slabog prodora na tržište, iako su neke proučavane više od 25 godina [25]. Najnoviji trendovi u razvoju silicijumskih fotonaponskih ćelija su metode koje uključuju generisanje dodatnih nivoa energije u strukturi trake poluprovodnika. Najnaprednije studije tehnologije proizvodnje i poboljšanja efikasnosti sada su koncentrisane na solarne ćelije treće generacije.

Jedna od trenutnih metoda za povećanje efikasnosti PV ćelija je uvođenje dodatnih energetskih nivoa u energetski procep poluprovodnika (IBSC i IPV ćelije) i povećanje implantacije jona u proizvodnom procesu. Druge inovativne ćelije treće generacije koje su manje poznate komercijalne tehnologije "u nastajanju" uključuju [25,26]:

1. Fotonaponske ćelije od organskih materijala (OSC);
2. Perovskit (PSC) fotonaponske ćelije;
3. Bojom senzibilisane (DSSC) fotonaponske ćelije;
4. Kvantne tačke (QD) fotonaponske ćelije;
5. Fotonaponske ćelije sa višestrukim spojevima.

• *Fotonaponske ćelije od organskih i polimernih materijala (OSC)*

Organske solarne ćelije (OSC) su korisne u primenama vezanim za solarnu energiju jer imaju potencijal da se koriste u različitim perspektivama na osnovu jedinstvenih prednosti organskih poluprovodnika, uključujući njihovu sposobnost obrade u rastvoru, malu težinu, nisku cenu, fleksibilnost, polu-prozirnost i primenljivost na veliku "roll-to-roll" obradu. Organske solarne ćelije (OSC) obrađene u rastvoru koje apsorbuju blisko infracrveno (NIR) zračenje proučavane su širom sveta zbog njihovog potencijala da budu donor-akceptor jedinjenja zapreminskog heterospoja (BHJ). Pored toga, OSC koje apsorbuju NIR privukle su pažnju kao oprema visoke klase u optoelektronskim uređajima sledeće generacije, kao što su prozirne solarne ćelije i NIR fotodetektor, zbog njihovog potencijala za industrijske primene. Sa uvođenjem nefulerenskih akceptora (NFA) koji apsorbuju svetlost u NIR opsegu, vrednost OSC se povećava. Nasuprot tome, organski donorski materijali sposobni da apsorbuju svetlost u

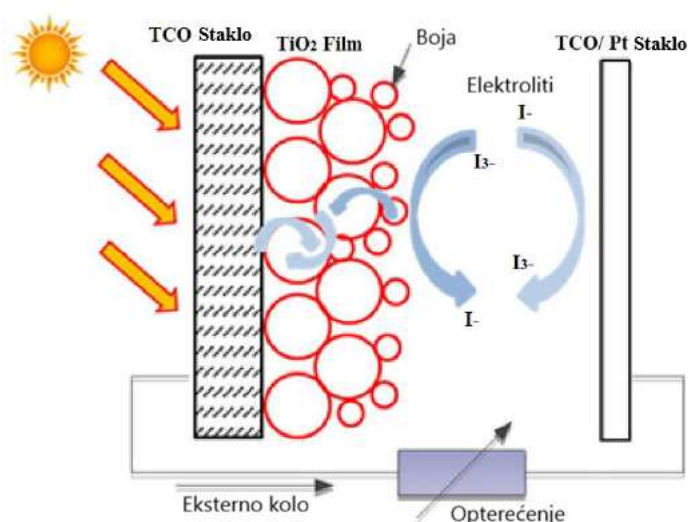
NIR opsegu još nisu aktivno proučavani u poređenju sa akceptorskim materijalima koji apsorbuju svetlost u NIR opsegu [27].

Najnaprednija BHJ struktura, kombinujući organske donorske i akceptorske materijale, pokazala je ogromnu nadu za jeftine, lagane organske solarne ćelije. Tokom protekle decenije postignut je ogroman napredak, sa efikasnošću konverzije snage koja dostiže više od 14% za uređaj sa jednim spojem i više od 17% za tandem uređaj dizajniranjem novih NIR fotoaktivnih materijala sa malom vrednošću energetskog procepa. U poređenju sa širokopoljnim organskim fotonaponskim materijalima, donori sa malim procepom i ne-fulerenski akceptorski materijali sa širokim opsegom solarne pokrivenosti proširenim na NIR region obično pokazuju čvršće superponirane elektronske orbitale, lakšu delokalizaciju valentnih elektrona, veću dielektričnu konstantu, vitalniji dipolni moment i nižu energiju vezivanja ekscitona. Ova svojstva čine fotonaponske materijale male širine energetskog procepa neophodnim u izgradnji organskih solarnih ćelijama visokih performansi, uključujući uređaje sa jednim spojem i tandem uređajem [28].

Pametna strategija u dizajnu aktivnog sloja mogla bi se sumirati kao optimizacija težinskog odnosa donora i akceptorskih materijala, korišćenje materijala sa ultra-niskim energetskim procepom kao treće komponente za poboljšanje efikasnosti korišćenja NIR svetlosti, i prilagođavanje debljine aktivnog sloja kako bi se postigao kompromis između prikupljanja fotona i akumulacije naelektrisanja. Mnogo truda je uloženo u optimizaciju prozirne gornje elektrode: dobro izbalansirana provodljivost i transmitansa u opsegu vidljive svetlosti, povećana reflektansa u NIR ili ultraljubičastom (UV) opsegu svetlosti, i bolja kompatibilnost sa aktivnim slojevima. U smislu inženjeringa uređaja, fotonski kristal, antirefleksni premaz, optička mikrošupljina i dielektrične/metalne/dielektrične (DMD) strukture postavljene su da realizuju selektivnu transmisiju i refleksiju za istovremeno poboljšanje efikasnosti konverzije snage i prosečne transmisije prozirne OSC vidljive svetlosti [29].

- **Bojom senzibilisane fotonaponske ćelije (DSSC)**

Konjugovani polimeri i organski poluprovodnici bili su uspešni u ravnim ekranima i LED diodama, pa se smatraju naprednim materijalima u trenutnoj generaciji fotonaponskih ćelija. Šematski prikaz bojom senzibilisanih organskih fotonaponskih ćelija (DSSC) prikazan je na Slici 5. Polimer/organske fotonaponske ćelije takođe se mogu podeliti na bojom senzibilisane organske fotonaponske ćelije (DSSC), fotoelektrohemijske fotonaponske ćelije i plastične (polimer) i organske fotonaponske uređaje (OPVD), koji se razlikuju u mehanizmu rada [30].



Slika 3.5. Šematski prikaz DSSC-a [31].

Bojom senzibilisane solarne ćelije (DSSC) predstavljaju jedan od najboljih nanotehnoloških materijala za prikupljanje energije u fotonaponskim tehnologijama. To je hibridna organsko-neorganska struktura gde se visoko porozan, nanokristalni sloj titanijum dioksida (TiO₂) koristi za sprovođenje elektrona u kontaktu sa rastvorom elektrolita koji sadrži organske boje koje apsorbuju svetlost blizu interfejsa. Prenos naelektrisanja se dešava na interfejsu, što rezultira transportom šupljina u elektrolitu. Efikasnost konverzije snage je oko 11%, a komercijalizacija bojom senzibilisanih fotonaponskih modula je u toku. Nova karakteristika u DSSC solarnim ćelijama je fotosenzibilizacija nano-veliĉine TiO₂ premaza u kombinaciji sa optiĉki aktivnim bojama, što povećava njihovu efikasnost za više od 10% [32].

DSSC obećavaju kao fotonaponski uređaji zbog njihove jednostavne izrade, niskih troškova materijala, transparentnosti, sposobnosti bojenja i prednosti mehaniĉke fleksibilnosti. Glavni izazovi u komercijalizaciji DSSC-a su loša efikasnost fotoelektriĉne konverzije i stabilnost ćelije. Najviša dostižna teoretska efikasnost konverzije energije procenjena je na 32% za DSSC; međutim, najviša prijavljena efikasnost do danas je samo 13%. Intenzivan rad je u toku kako bi se razumeli parametri koji upravljaju DSSC-om radi poboljšanja njegove efikasnosti. Brojni pokušaji su napravljeni da se optimizuje redoks par i apsorbanca boje, modifikuje poluprovodnik širokog energetskeg procepa kao radna elektroda i razvije kontra elektroda (CE). Pored povećanja efikasnosti DSSC-a, cena materijala je još jedno veliko pitanje koje treba rešiti u budućem radu [33].

- **Perovskit fotonaponske ćelije**

Perovskit solarne ćelije (PSC) su revolucionarni novi koncept fotonaponske ćelije koji se oslanja na metal-halidne perovskite (MHP), npr. Metil-amonijum jodid kao i formamidin olovo jodid (MAPbI₃ ili FAPbI₃, respektivno). MHP integrišu nekoliko karakteristika koje su poželjne u fotonaponskim apsorberima, uključujući direktan energetskeg procep sa visokim koeficijentom apsorpcije, dug životni vek nosilaca i dužinu

difuzije, nisku gustinu defekata i lakoću podešavanja sastava i energetskog procepa. U toku 2009. godine, MHP je prvi put opisan kao senzibilizator u ćeliji boje zasnovanoj na tečnom elektrolitu koji provodi šupljine. Godine 2012, MHP koji je demonstrirao ~10% efikasnosti PSC-a zasnovanog na provodniku šupljina u čvrstom stanju izazvao je eksploziju studija o PSC. Tokom poslednje decenije istraživanja, efikasnost jednog PSC spoja povećala se na sertifikovani nivo od 25,2% [34].

Na razvoj PSC-a snažno je uticalo poboljšanje kvaliteta materijala kroz širok spektar sintetičkih metoda dizajniranih pod fundamentalnim razumevanjem mehanizama rasta MHP. Razumevanje složenih i koreliranih procesa rasta perovskita (npr. nukleacija, rast zrna, kao i evolucija mikrostrukture) pomoglo je u razvoju širokog spektra visokoeffikasnih modova rasta (na primer, rast u jednom koraku, sekvencijalni rast, proces rastvaranja, proces pare, obrada nakon taloženja, nestoheometrijski rast, rast potpomognut aditivima i fino podešavanje dimenzija strukture). Najnoviji napori koncentrisani su na inženjering interfejsa, smanjenje gubitaka napona otvorenog kola i poboljšanje stabilnosti, posebno uvođenjem dvodimenzionalnog perovskitnog površinskog sloja. Sa napretkom u sintetičkoj kontroli, sastav perovskita postaje jednostavniji, uglavnom ka FAPbI_3 . Ovo će nesumnjivo doprineti pojednostavljenju metoda taloženja velikih razmera i osnovnom razumevanju svojstava ovih ćelija [35].

- **Fotonaponske ćelije sa kvantnim tačkama**

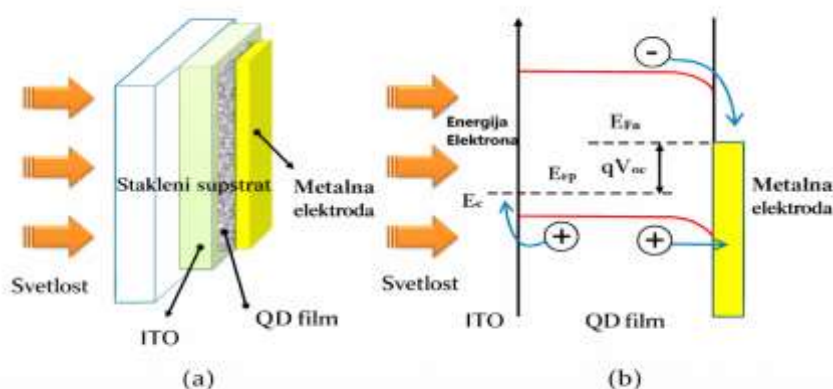
Solarne ćelije napravljene od ovih materijala nazivaju se kvantne tačke (QDs) ili nanokristalne solarne ćelije. One se proizvode epitaksijalnim rastom na kristalu supstrata. Kvantne tačke su okružene visokim potencijalnim barijerama u trodimenzionalnom obliku, a elektroni i elektronske šupljine u kvantnoj tački dobijaju diskretnu energiju jer su ograničeni u malom prostoru (Slika 3.6). Posledično, energija osnovnog stanja elektrona i elektronskih šupljina u kvantnoj tački zavisi od veličine kvantne tačke [36].

Nanokristalne ćelije imaju relativno visoke koeficijente apsorpcije. Četiri uzastopna procesa se dešavaju u solarnoj ćeliji:

1. apsorpcija svetlosti i formiranje ekscitona,
2. difuzija ekscitona,
3. razdvajanje naelektrisanja i
4. transport naelektrisanja.

Zbog slabe pokretljivosti i kratkog životnog veka ekscitona u provodnim polimerima, organska jedinjenja karakterišu male dužine difuzije ekscitona (10–20 nm). Drugim rečima, ekscitoni koji se formiraju daleko od elektrode ili sloja za transport nosilaca rekombinuju se, i efikasnost konverzije opada [37]. Razvoj tankoslojnih solarnih ćelija sa metal-halidnim perovskitima doveo je do intenzivnih istra odgovarajućim nanokristalima (NCs) ili kvantnim tačkama (QDs). Danas je rekordna efikasnost QD solarnih ćelija poboljšana na 16,6% korišćenjem mešanih koloidnih QDs sa perovskitima. Univerzalnost ovih novih nanomaterijala u pogledu lakoće izrade i sposobnosti podešavanja energetskog procepa i kontrole hemije površine omogućava razne mogućnosti za fotonaponsku tehnologiju, kao što su elastične, prozirne,

kontrolisane ćelije sa jednim spojem sa heterostrukturama i tandem solarne ćelije sa višestrukim spojevima koje bi gurale polje još dalje. Međutim, uska gustina raspodele širine energetskog procepa može potencijalno poboljšati performanse QD solarnih ćelija na više načina. Prvo, transport elektrona bi mogao biti bolji u manjim QDs, jer veće QDs funkcionišu kao rep trake ili plitka zamka, čineći transport težim. Drugo, napon otvorenog kola (V_{oc}) QD solarnih ćelija mogao bi biti ograničen najmanjim energetskim procepom (najveća veličina) QD blizu kontakata. Poboljšanje homogenosti i uniformnosti veličine QD takođe bi poboljšalo PV performanse minimiziranjem takvih gubitaka. Iako kontrolisani eksperimenti kao što su ovi još nisu prijavljeni, kontrolisanija sinteza bi mogla koristiti QD ćelijama [38].

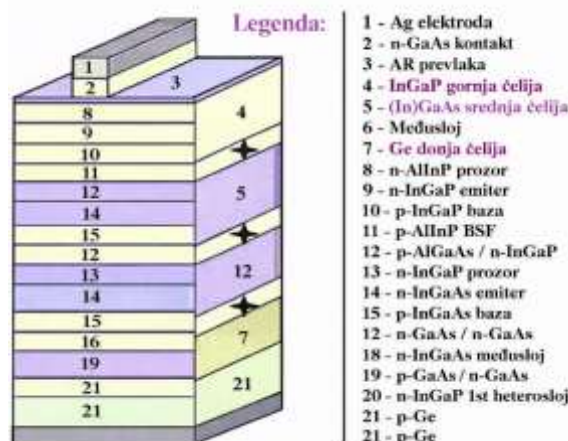


Slika 3.6. (a) Šema solarne ćelije zasnovane na kvantnim tačkama, (b) dijagram energetskih traka solarne ćelije [39].

- **Višeslojne (Multi-Junction) fotonaponske ćelije**

Višeslojne (MJ) solarne ćelije sastoje se od više p-n spojeva napravljenih od različitih poluprovodničkih materijala, pri čemu svaki spoj proizvodi električnu struju kao odgovor na svjetlost različite talasne dužine, čime se poboljšava konverzija dolazne sunčeve svjetlosti u električnu energiju i efikasnost uređaja. Korišćenje različitih materijala sa različitim energetskim procepima predloženo je kako bi se iskoristio maksimalan mogući broj fotona i poznato je kao tandem solarna ćelija. Cijela ćelija se može napraviti od istih ili različitih materijala, dajući širok spektar mogućih dizajna [40].

Obično su ćelije integrisane monolitno i povezane u seriju putem tunelskog spoja, a trenutno usklađivanje između ćelija se postiže podešavanjem energetskog procepa i debljine svake ćelije. Ispitana je teoretska izvodljivost korišćenja više energetskih procepa i utvrđeno je da iznosi 44% za dva energetska procepa, 54% za tri energetska procepa i 66% za beskonačan broj procepa. Slika 7 ilustruje InGaP/(In)GaAs/Ge trostruku šemu solarne ćelije i predstavlja ključne tehnologije za poboljšanje efikasnosti konverzije [41].



Slika 3.7. Šematska ilustracija ćelije sa tri spoja i pristupi za poboljšanje efikasnosti ćelije [40].

Grid-matched InGaP/(In)GaAs/Ge trostruke solarne ćelije su široko korišćene u svemirskoj fotonaponskoj tehnologiji i postigle su najveću stvarnu efikasnost od preko 36%. Takozvano bombardovanje raznovrsnim energetskim česticama neizbežno oštećuje solarne ćelije. To uzrokuje formiranje dodatnih neradijativnih rekombinacionih centara, što smanjuje dužinu difuzije manjinskih nosilaca i smanjuje efikasnost solarne ćelije. Podslojevi u višeslojnim solarnim ćelijama su serijski vezani, pri čemu podsloj sa najznačajnijom degradacijom karakteristika najznačajnije degradira efikasnost višeslojne solarne ćelije. Da bi se poboljšala otpornost na zračenje (In)GaAs pod-ćelija, mere kao što su smanjenje koncentracije dopanta, smanjenje debljine osnovnog regiona, mogu se koristiti [41].

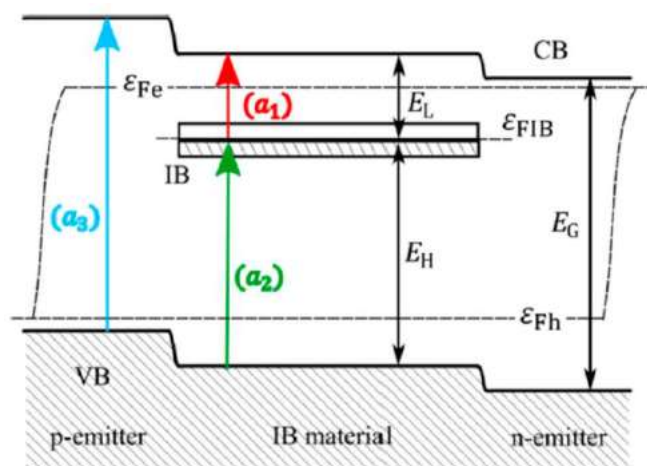
- **Fotonaponske ćelije sa dodatnim srednjim opsegom (Intermediate Band)**

Nacionalna laboratorija za obnovljivu energiju (NREL) procenjuje da višeslojne i IBSC fotonaponske ćelije imaju najveću efikasnost pod eksperimentalnim uslovima (47.1%). Glavna karakteristika ovih ćelija je upravo dodatni srednji opseg u energetskom procepu silicijuma. Trenutno su u svetskoj literaturi navedene dve vrste ovih ćelija: IBSC (Intermediate et al.) i IPV (Impurity et al.) [42].

Efekat fotonaponskih nečistoća (IPV) je jedno od rešenja koje se koristi za povećanje infracrvenog odziva PV ćelija i time povećanje efikasnosti konverzije solarne u električnu energiju. Ideja IPV efekta zasniva se na uvođenju dubokih defekata zračenja u strukturu kristala poluprovodnika. Ovi defekti osiguravaju mehanizam apsorpcije u više koraka za fotone sa energijama ispod širine energetskog procepa. Pod određenim uslovima, dodavanje IPV dopanata u strukturu solarne ćelije od silicijuma povećava spektralni odziv, struju kratkog spoja i efikasnost konverzije [43].

Glavni pravac studija sa velikim potencijalom za razvoj su solarne ćelije sa srednjim opsegom (IBSCs). One predstavljaju koncept solarne ćelije treće generacije i uključuju silicijum i druge materijale. Ideja iza koncepta solarne ćelije sa srednjim energetskim procepom (IBSC) je apsorbovanje fotona sa energijom koja odgovara širini pod-opsega u ćelijskoj strukturi. Ove fotone apsorbuje materijal sličan poluprovodniku

koji, pored provodnih i valentnih traka, ima i srednji opseg (IB) u konvencionalnom energetskom procepu poluprovodnika (Slika 8). U IBSCs, slojevi silicijuma se implantiraju veoma visokim dozama metalnih jona kako bi se stvorio dodatni nivo energije [44].

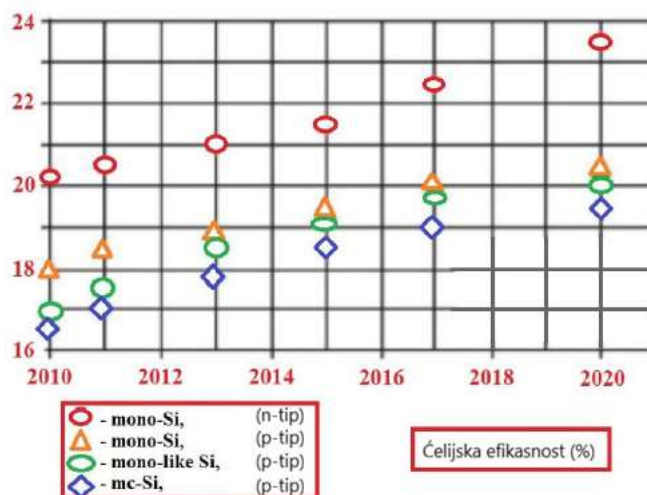


Slika 3.8. Dijagram energetskih traka solarne ćelije sa srednjim opsegom (IBSC) [44].

Na osnovu istraživanja sprovedenog o uticaju defekata unetih u strukturu silicijuma, razvijen je model. Uvođenje odabranih dubokih defekata u region hvatanja nosilaca naelektrisanja poboljšava efikasnost PV ćelije. Od posebnog interesa su defekti koji olakšavaju transport većinskih nosilaca i defekti koji sprečavaju akumulaciju manjinskih nosilaca. Ovo značajno smanjuje proces rekombinacije na mestu hvatanja nosilaca naelektrisanja. Konačno, uvođenjem defekata u strukturu silicijuma ispod solarne ćelije, istraživači kombinuju efikasnu pasivizaciju površine sa istovremenim smanjenjem optičkih gubitaka [45].

Uvođenje srednjih opsega u poluprovodnike, korišćenjem implantacije jona, može se izvesti pomoću dve metode: uvođenjem dopanata veoma visoke koncentracije u supstrat poluprovodnika ili implantacijom sloja silicijuma visokim dozama metalnih jona. Sve veća upotreba implantacije jona u procesu proizvodnje fotonaponskih ćelija može smanjiti troškove primene i povećati isplativost silicijumskih ćelija povećanjem njihove efikasnosti. Upotreba tehnologije implantacije jona obezbedila je povećanu preciznost dopiranja sloja silicijuma i generisanje dodatnih nivoa energije u energetskom procepu, kao i skraćivanje pojedinačnih faza izrade ćelije, što se na kraju prevodi u poboljšani kvalitet i niže troškove proizvodnje [46].

Tehnika implantacije jona dobija na popularnosti u solarnoj industriji, postepeno zamenjujući tehniku difuzije koja se koristila godinama. Kao što je prikazano na **Slici 3.9**, očekuje se da će se performanse ćelije poboljšati kako tehnologija evoluirala ka većim efikasnostima. Pored lokalnog i referentnog dopiranja, značajne prednosti ove tehnologije uključuju visoku preciznost kontrole količine i distribucije doza dopanata, što rezultira visokom uniformnošću, ponovljivošću i povećanom efikasnošću (iznad 19%), sa znatno užom distribucijom performansi ćelija [47].



Slika 3.9. Stabilizovane krive trenda efikasnosti ćelija [67].

U metodi implantacije jona, odabrani joni sa potrebnom nečistoćom ubacuju se u poluprovodnik ubrzavanjem jona nečistoće do visokog energetskog nivoa i implantacijom jona u poluprovodnik. Energija data jonima nečistoće definiše dubinu implantacije jona. Suprotno tehnologiji difuzije (gde se doza jona nečistoće uvodi samo na površini), u tehnici implantacije jona, kontrolisana doza jona nečistoće može se postaviti duboko u poluprovodnik [48].

Poređenje fotonaponskih ćelija treće generacije [22]:

- **Solarne ćelije zasnovane na bojom senzibilisanim fotonaponskim ćelijama:**

Efikasnost: 5 ÷ 20%;

Prednosti: Niža cena, rad pri slabom svetlu i širem uglu, rad na nižoj unutrašnjoj temperaturi, robusnost i produžen životni vek;

Ograničenja: Problemi sa temperaturnom stabilnošću, otrovne i isparljive supstance.

- **Solarne ćelije zasnovane na kvantnim tačkama:**

Efikasnost: 11 ÷ 17%;

Prednosti: Niski troškovi proizvodnje, niska potrošnja energije;

Ograničenja: Visoka toksičnost u prirodi, degradacija.

- **Solarne ćelije zasnovane na organskim i polimernim fotonaponskim ćelijama:**

Efikasnost: 9 ÷ 11%;

Prednosti: Niski troškovi obrade, manja težina, fleksibilnost, termička stabilnost;

Ograničenja: Niska efikasnost.

- **Solarne ćelije zasnovane na perovskitu:**

Efikasnost: 21%;

Prednosti: Niska cena i pojednostavljena struktura, mala težina, fleksibilnost, visoka efikasnost, niski troškovi proizvodnje;

Ograničenja: Nestabilne.

- ***Višeslojne (Multi-junction) solarne ćelije:***

Efikasnost: 36% i više;

Prednosti: Visoke performanse;

Ograničenja: Složene, skupe [22].

3.2.3.4. Četvrta generacija fotonaponskih ćelija

Fotonaponske ćelije četvrte generacije takođe su poznate kao hibridne neorganske ćelije jer kombinuju nisku cenu i fleksibilnost polimernih tankih filmova sa stabilnošću organskih nanostrukture kao što su metalne nanočestice i metalni oksidi, ugljenične nanocevi, grafen i njihovi derivati. Ovi uređaji, često nazivani "nano fotonaponska energija", mogli bi postati obećavajuća budućnost fotonaponske energije [49].

- ***Fotonaponske ćelije zasnovane na grafenu***

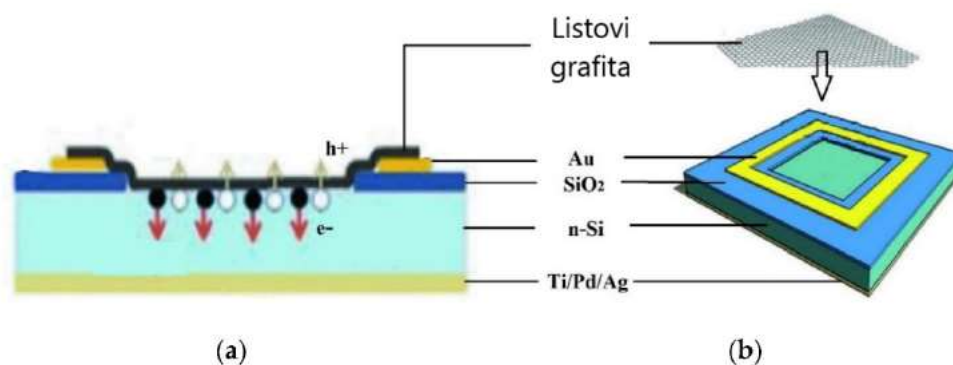
Četvrta generacija pruža odličnu pristupačnost i fleksibilnost korišćenjem tankih polimernih slojeva, metalnih nanočestica, raznih metalnih oksida, ugljeničnih nanocevi, grafena i njihovih derivata. Poseban naglasak stavljen je na grafen jer se smatra budućim nanomaterijalom. Zbog svojih jedinstvenih svojstava, kao što su visoka pokretljivost nosilaca, niska otpornost i propustljivost, i 2D rešetkasto pakovanje, materijali zasnovani na grafenu se razmatraju za upotrebu u PV uređajima umesto postojećih konvencionalnih materijala. Međutim, da bi se postigle adekvatne performanse uređaja, ključ njegove praktične primene je sintetisanje grafenskih materijala sa odgovarajućom strukturom i svojstvima [50].

Budući da su svojstva grafena fundamentalno povezana sa njegovim procesom proizvodnje, razuman izbor metoda je od suštinskog značaja za ciljane primene. Konkretno, visoko provodni grafen je pogodan za upotrebu u fleksibilnim fotonaponskim uređajima, a njegova visoka kompatibilnost sa metalnim oksidima, metalnim jedinjenjima i provodnim polimerima čini ga pogodnim za upotrebu kao selektivni element za prihvatanje naelektrisanja i materijal međusloja elektrode [51].

U protekle dve decenije, grafen je kombinovan sa konceptom fotonaponskog materijala. Pokazuje značajnu ulogu kao transparentna elektroda, materijal za transport šupljina/elektrona i interfacijalni puferski sloj u uređajima solarnih ćelija. Istraživači mogu razlikovati nekoliko tipova solarnih ćelija zasnovanih na grafenu, uključujući organske zapreminske heterospojne (BHJ) ćelije, bojom senzibilisane ćelije i perovskitne ćelije. Efikasnost konverzije energije premašila je 20.3% za perovskitne solarne ćelije zasnovane na grafenu i 10% za BHJ organske solarne ćelije. Pored izvlačenja i transporta naelektrisanja do elektroda, grafen igra još jednu jedinstvenu ulogu—štiti uređaj od degradacije usled uticaja životne sredine kroz svoju gustu pakovanu 2D rešetkastu strukturu. Osigurava dugoročnu ekološku stabilnost fotonaponskih uređaja [52].

Polumetalni grafen koji ima nulti energetski procep stvara Šotkijeve spojeve solarnih ćelija sa silicijumskim poluprovodnicima. Iako je grafen otkriven prvi put 2004.

godine, prva solarna ćelija grafen–silicijum nije okarakterisana kao n-silicijumska ćelija do 2010. Slika 10 šematski prikazuje grafen–silicijum solarnu ćeliju sa Šotkijevim spojem. Grafenski listovi (GS), uzgajani hemijskim taloženjem pare (CVD) na filmovima nikla, mokro su naneti na prethodno oblikovane Si/SiO₂ supstrate sa efektivnom površinom od 0.1–0.5 cm². Grafenski list formira premaz na izloženom n-Si supstratu, stvarajući Šotkijev spoj. Grafenski list je kontaktiran pomoću Au elektroda [53].



Slika 3.10. Grafen–silicijum Šotkijev spoj solarna ćelija. (a) Pogled poprečnog preseka, (b) šematska ilustracija konfiguracije uređaja [50].

Sinteza grafena uglavnom koristi dve metodologije, a to su metode odozdo-nagore (bottom-up) i odozgo-nadole (top-down). U pristupu odozgo-nadole, grafit je početni materijal, a cilj je interkalirati i eksfolirati ga u grafenske listove pomoću čvrste, tečne ili elektrohemijske eksfolijacije. Drugi pristup pod ovom kategorizacijom je eksfolijacija grafitnog oksida u grafen oksid (GO), nakon čega dolazi do hemijske ili termičke redukcije. Pristup odozdo-nagore je proizvodnja grafena iz molekularnih prekursora hemijskim taloženjem pare (CVD) ili epitaksijalnim rastom. Dobijena struktura grafena, morfologija i atributi, uključujući brojeve slojeva, nivo defekata, električnu i toplotnu provodljivost, rastvorljivost i hidrofilitnost ili hidrofobnost, zavise od procesa proizvodnje [53,54].

Grafen može apsorbovati 2.3% dolazne bele svetlosti iako je debljine samo jednog atoma. Grafen u silicijumskoj solarnoj ćeliji je obećavajuća platforma jer grafen snažno intereaguje sa svetlošću, ispunjavajući zahteve optičke (visoka transmitansa) i električne (niska otpornost sloja) prirode tipične transparentne provodne elektrode. Važno je napomenuti da se otpornost sloja i transmitansa grafena menjaju sa brojem slojeva. Kako se otpornost sloja smanjuje sa povećanjem broja slojeva grafena, optička transparentnost se smanjuje [55].

Grafen nudi mnogo više za PV tehnologiju zbog svoje fleksibilnosti, ekološke stabilnosti, niske električne otpornosti i fotokatalitičkih karakteristika. Mora biti pažljivo dizajniran za ciljane primene i specifične zahteve [53, 55].

Jedan problem za primenu grafena je odsustvo jednostavnijeg, pouzdanijeg načina za taloženje dobro uređenog monosloja sa jeftinim ljupticama na ciljane supstrate koji imaju različita površinska svojstva. Drugi problem je prijanjanje taloženog tankog filma

grafena, tema koja još nije dovoljno proučena. CVD može proizvesti grafen velike površine sa visokom optičkom transparentnošću i električnom provodljivošću. Kao anoda u organskim fotonaponskim uređajima, grafen ima veliko obećanje kao zamena za indijum kalaj oksid (ITO) zbog svog inherentno jeftinog procesa proizvodnje i odličnih svojstava provodljivosti i transparentnosti [56].

Primarni nedostatak grafena je njegova slaba hidrofilnost, što negativno utiče na dizajn uređaja obrađenih u rastvoru. Međutim, ta činjenica se može prevazići modifikacijom površine nekovalentnom hemijskom funkcionalizacijom. S obzirom na mehaničku čvrstoću grafena, fleksibilnost i odlična svojstva provodljivosti, može se očekivati da će se nove aplikacije u plastičnoj elektronici i optoelektronici uskoro pojaviti uključujući ovu novu klasu CVD grafenskih materijala. Otkriće utire put za jeftine grafenske slojeve da zamene ITO u fotonaponskim i elektroluminescentnim uređajima [57].

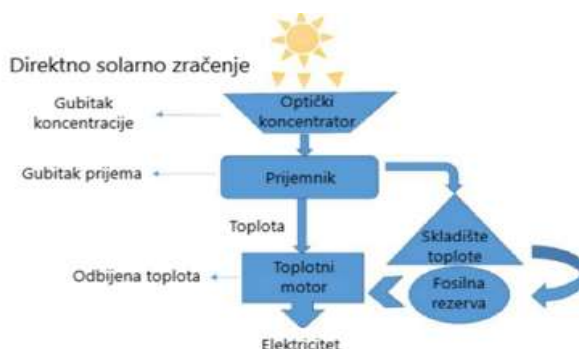
3.2.4. Tehnologija koncentrisane solarne energije (CSP)

CSP tehnologije koriste ogledala za koncentrisanje sunčeve svetlosti na prijemnik, generišući toplotnu energiju koja se može koristiti za pogon turbina ili generisanje električne energije. Koncentrisani solarno-termalni energetske sistemi se obično koriste u projektima lokalnih samouprava, sa konfiguracijama koje uključuju energetske tornjeve i linearne sisteme, koji koncentrišu sunčevu svetlost na paralelne cevne prijemnike [58]. Osnovni koncepti tehnologija koncentrisane solarne energije koji su korišćeni su: centralni prijemni toranj ili solarni energetske toranj (SPT), sistem sa paraboličnim koritom, sistem sa kolektorom paraboličnog tanjira i sistem linearnog Fresnel reflektora [59].

3.2.4.1. Princip rada koncentrisanih solarnih energetskih ćelija

U CSP tehnologiji, direktno normalno zračenje sunca (DNI) se koncentriše na HTF (Heat Transferred Fluid - Fluid za prenos toplote), koji se zatim propušta kroz seriju izmenjivača toplote da bi se proizvela pregrejana para. Ova para se pretvara u električnu energiju u konvencionalnoj parnoj turbini. Deo toplote se takođe skladišti u nekom tečnom ili čvrstom medijumu (kao što su rastopljene soli), koncentrisan [60] za upotrebu noću ili kada nema sunčeve svetlosti, čime se nastavlja rad turbine [61].

Opšti dijagram toka rada CSP-a dat je na Slici 3.11:



Slika 3.11. Opšti dijagram toka CSP postrojenja [62]

Postoje različite CSP tehnologije, ali njihov osnovni princip generisanja električne energije je isti. Struktura i fokus ovih sistema su različiti, pa rezultiraju različitim temperaturnim opsezima koji se generišu [62].

3.2.4.2. Različite CSP tehnologije

Tabela 1 predstavlja analizu nekoliko CSP sistema u poređenju. Odnosi koncentracije sistema paraboličnog tanjira, linearnih Fresnel sistema i sistema paraboličnog korita su viši od onih kod sistema solarnih tornjeva, koji pokazuju srednji odnos koncentracije između 300 i 1000. Dok se sistemi paraboličnog tanjira preporučuju za manje kapacitete generisanja između 0.01 i 0.4 MW, parabolično korito, linearni Fresnel i sistemi solarnih tornjeva su prikladni za kapacitete generisanja energije u opsegu od 10–200 MW [63].

Tabela 3.1. Različite CSP tehnologije [63]

Posmatrani parametar	SI jedinica	Parabolični reflektor	Linearni Fresnel-ov kolektor	Solarni toranj	Parabolični solarni kolektor
Opseg snage	MW	10–200	10–200	10–200	0.01–0.4
Odnos koncentracije solarnog zračenja	–	70–80	25–100	300–1000	1000–3000
Sistem praćenja sunčevog zračenja	–	Jedno-dimenzioni	Jedno-dimenzioni	Dvo-dimenzioni	Dvo-dimenzioni
Operativne temperature	°C	290–390	250–390	250–500	250–700
Ciklus proizvodnje	–	Parni i organski	Parni i organski	Parni i organski	Parni i organski Rankin-ov,

Posmatrani parametar	SI jedinica	Parabolicni reflektor	Linearni Fresnel-ov kolektor	Solarni toranj	Parabolicni solarni kolektor
električne energije		Rankin-ov ciklus	Rankin-ov ciklus	Rankin-ov i Brayton-ov ciklus	Brayton-ov i Stirling-ov ciklus
Efikasnost konverzije solarne u električnu eneregiju	%	15%	8–10%	20–35%	25–30%
Kapitalna cena	\$/kW	3972	–	> 4000	12,578
Kapitalna cena	\$/m ²	424	234	476	–
Operativni troškovi sistema	\$/kWh	0.012–0.02	Low	0.034	0.21
Potrošnja vode	m ³ /MWh	3 (wet cooling) 0.3 (dry cooling)	3 (wet cooling) 0.2 (dry cooling)	2–3 (wet cooling) 0.25 (dry cooling)	0.05–0.1 (for mirror washing only)
Korišćena površina zemljišta	km ² /MW	0.025	0.008	0.036	0.011

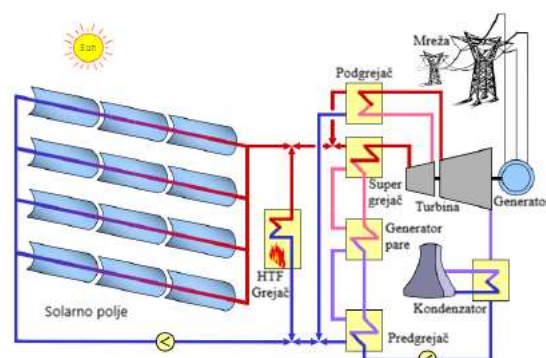
- **Parabolično korito (Parabolic Trough)**

Velika cilindrična parabolična ogledala koja se nazivaju "korito" kolektori fokusiraju sunčevu svetlost na specifičnu liniju fokusa, formirajući solarno polje elektrane sa paraboličnim koritom (Slika 12). Nekoliko kolektora je instalirano u redovima dugim oko sto metara, a ukupno solarno polje obuhvata mnogo takvih paralelnih redova [64].

Svaki kolektor prati pravac sunčeve putanje duž svojih longitudinalnih osa. Više od 80 puta više svetlosti fokusira se na metalnu apsorbersku cev u liniji fokusa pomoću ogledala. Ova cev je umetnuta u vakuumom izolovanu staklenu cev kako bi se minimizirao gubitak toplote. Selektivni premaz na površini apsorberske cevi smanjuje gubitke koji bi se ostvarili isijavanjem. Apsorberska cev je ispunjena ili specijalnim termalnim uljem ili vodom. Dostiže oko 400 °C usled intenzivne sunčeve svetlosti, što uzrokuje isparavanje vode i pretvaranje u paru koja pokreće turbinu i električni generator. (Slika 13) [64].



Slika 3.12. Princip solarnog kolektora sa paraboličnim koritom [64]



Slika 3.13. Princip solarne elektrane sa paraboličnim koritom [64]

- **Centralni prijemni toranj (Central Receiver Tower)**

Sistem centralnog prijemnog tornja (CRT) je potencijalna tehnologija za baze korišćenja energije velikih razmera zbog svoje izvanredne efikasnosti, visokog odnosa solarne koncentracije i smanjenja troškova energije, kao što se vidi na Slici 3.14. Sistem centralnog solarnog prijemnog tornja (CRT) smatra se potencijalnom tehnologijom za baze proizvodnje energije velikih razmera zbog svoje izvanredne efikasnosti sa veoma visokim odnosom koncentracije solarne energije, što se može videti na Slici 3.14.



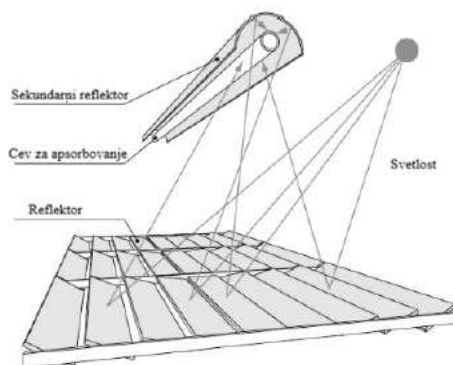
Slika 3.14. Gemasolar solarna elektrana sa poljem heliostata [59]

Heliostati (ogledala koja prate sunce), koji čine solarno polje, reflektuju dolazno sunčevo zračenje na površinu solarnog prijemnika, koji je pozicioniran na vrhu centralnog tornja. Budući da solarni prijemnik funkcioniše kao izmenjivač toplote, primljeno sunčevo zračenje podiže temperaturu fluida za prenos toplote unutar prijemnika iznad 500 °C koristeći rastopljeni so kao fluid za prenos toplote ili druge

fluide. Tradicionalna postrojenja sa parnim energetskim ciklusom koriste ovu pregrejanu paru za generisanje električne energije [59].

- **Linearni Fresnel reflektor (Linear Fresnel Reflector)**

Prvi linearni Fresnel reflektor razvio je 1961. godine u Italiji Giorgio Francia, a dalje su ga proučavale kompanije poput FMC (korporacija za prehrambene mašine i hemikalije) tokom naftne krize 1973. godine. Prati principe tehnologije paraboličnog korita, ali zamenjuje zakrivljena ogledala dugim paralelnim linijama tankih ogledala ili reflektora plitke zakrivljenosti (ili čak ravnih). Ogledala prate sunčevu svetlost, usmeravajući je na stacionarni linearni prijemnik ili apsorbersku cev na zajedničkoj fokalnoj tački nekoliko metara iznad njih. Ogledala mogu koncentrisati sunčevu energiju na približno 30 puta njen prosečan intenzitet. Na vrhu prijemnika može se pričvrstiti malo parabolično ogledalo (nazvano sekundarni reflektor) kako bi se svetlost dodatno fokusirala, kao što je prikazano na Slici 15 [65].

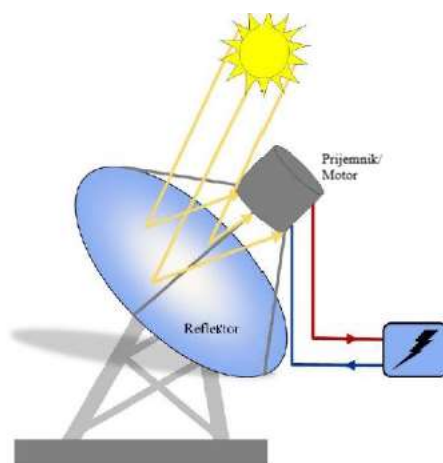


Slika 3.15. Princip rada solarnog sistema linearnog Fresnel reflektora [65]

Sistemi linearnog Fresnel reflektora su u nepovoljnom položaju jer se red prijemnika deli između više ogledala, što uzrokuje povećano senčenje i blokiranje dolaznog sunčevog zračenja [65]. Međutim, jednostavnost ogledala dovodi do niske optičke efikasnosti. To bi mogao biti razlog zašto je instalirano nekoliko velikih LFR postrojenja širom sveta [66].

- **Parabolični tanjir (Parabolic Dish)**

Sistem paraboličnog tanjira (PD) je dvoosni sistem sa fokusom u tački koji koncentriše sunčevo zračenje na fokalnu tačku tanjira, kao što je prikazano na Slici 16. Fokalna tačka/prijemnik je ispunjen fluidom za prenos toplote (HTF). Generalno, fluid ili gas se koristi kao HTF u sistemima paraboličnog tanjira. HTF sistemi se zagrevaju na 1000°C usled visokog odnosa koncentracije u PD sistemima, a zatim se usmeravaju na Stirlingove motore ili gasne turbine za pretvaranje toplotne energije fluida u električnu energiju. Ograničena veličina PD sistema i visoki kapitalni troškovi čine ih manje komercijalizovanim zbog njihove prirode van mreže (off-grid) i visokih troškova instalacije [66].



Slika 3.16. Šematski dijagram sistema paraboličnog tanjira [66]

- ***KSU Autohtoni CSP (KSU Indigenous CSP)***

Istraživači na Univerzitetu King Saud (KSU) u Kraljevini Saudijskoj Arabiji (KSA) razvili su, projektovali i izgradili inovativan i jeftin sistem koncentrisanih solarnih kolektora koji se trenutno testira u kampusu KSU u Rijadu pre komercijalizacije. Njihova tehnologija Fresnel kolektora sa fokusom u tački (Point Focus Fresnel Collector - PFFC) ima veliki potencijal kao visoko efikasno i ekonomično rešenje za različite primene. Adresira posebne potrebe u ovoj oblasti, kao što su proizvodnja električne energije bez ugljenika i energija za daljinsko hlađenje, desalinizaciju vode, procesnu toplotu i klimatizaciju bez ulja u domovima i preduzećima. PFFC koncentriše sunčeve zrake koristeći ravna, kvadratna ogledala na rotirajućoj površini. Ova površina i način na koji je svaki red ogledala konstruisan omogućavaju im da prate sunce dok se kreće nebom i koncentrišu njegovu toplotu na istu tačku tokom celog dana [67].

3.3. Uticaji solarnih energetskih sistema na životnu sredinu

Solarne ćelije nude značajne mogućnosti u procesu zaštite životne sredine. Iako njihova proizvodnja nosi početno učešće ugljeničnih izvora energije, one generišu čistu energiju tokom svog životnog veka, nadoknađujući to u roku od nekoliko godina. Međutim, korišćenje zemljišta, potencijalno značajna potrošnja vodenih resursa i zabrinutost oko materijala koji se koriste za proizvodnju solarnih panela i njihovo kasnije recikliranje zahteva pažljivu analizu. Sveukupno, doprinos solarne energije smanjenju nivoa gasova staklene bašte i zagađenju vazduha čini je ključnim igračem u borbi protiv klimatskih promena, uz stalna istraživanja koja teže ublažavanju njenog početnog uticaja na životnu sredinu.

3.3.1. Fotonaponske ćelije

Utjecaji sistema za proizvodnju PV energije na životnu sredinu od faze proizvodnje (Fthenakis et al., 2005) do instalacije i rada (Turney & Fthenakis, 2011), stavljanja van pogona i odlaganja ili reciklaže solarne PV opreme (Fthenakis et al., 2008) analizirani su u naučnim publikacijama poslednjih dvadeset godina. Kao i svaki sistem za proizvodnju energije, izgradnja PV postrojenja uključuje teške mašine, što rezultira bukom i vizuelnim smetnjama, uznemiravanjem prirodnog staništa i životne sredine (Soliño et al., 2009; Guerin, 2017a). Nekoliko uticaja se prvenstveno odnosi na ljudsko zdravlje (Aman et al., 2015), klimu (Alsema, 2012), divlje životinje (Pimentel et al., 2018), korišćenje zemljišta (Denholm & Margolis, 2008), podzemne vode i tlo (Tammaro et al., 2016). Turney i Fthenakis (2011) identifikovali su do 32 uticaja na životnu sredinu korišćenja solarne energije umesto tradicionalnih izvora energije.

Postoji nedostatak znanja o efektu PV tehnologije u smanjenju emisija GHG i najboljim praksama u dizajnu i primeni za smanjenje PV ugljeničnog otiska. Uticaj komponenti PV solarnih ćelija na generisanje i emisiju opasnih materija i mogući pristupi reciklaži su drugi vitalni aspekti koji zahtevaju dalju istragu [68].

- ***Korišćenje zemljišta (Land Use)***

Obrasci zemljišta i pravilna distribucija su od suštinskog značaja za efikasno korišćenje za PV sisteme i izbegavanje konkurencije sa drugim vitalnim aktivnostima kao što je poljoprivreda. Dias i njegov istraživački tim je 2019. godine došao do rezultata da bi prioritizacija zemljišta na poljoprivredne aktivnosti smanjila količinu prikupljene solarne energije u velikoj meri (sa 2494 na 1116 MW) [68].

- ***Zagađenje vazduha i klimatske promene (Air Pollution and Climate Change)***

PV energija je čist izvor energije čiji je uticaj na kvalitet vazduha i klimatske promene znatno niži od bilo kog drugog tradicionalnog sistema za proizvodnju energije. Stoga, može pomoći u eliminisanju brojnih ekoloških problema koji nastaju korišćenjem fosilnih goriva. PV sistemi imaju nulte emisije ugljen-dioksida, metana, sumpornih oksida i azotnih oksida (CO₂, CH₄, SO_x, NO_x, respektivno) tokom rada, sa zanemarljivim efektima na zagađenje vazduha i globalno zagrevanje [68].

- ***Emisije opasnih materija (Hazardous Materials Emissions)***

Proizvodnja PV solarnih ćelija uključuje različite vrste opasnih materija tokom ekstrakcije solarnih ćelija ili nagrizanja poluprovodnika i čišćenja površine. Nekoliko sirovina se koristi tokom proizvodnje PV ćelija, kao što su silicijum (Si), kadmijum (Cd), telur (Te), bakar (Cu), selen (Se) i galijum (Ga). Proizvodnja ovih sirovina uključuje rudarstvo [68].

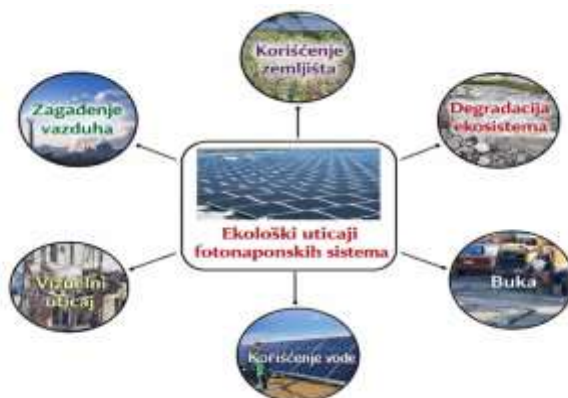
- ***Upotreba vode (Water Usage)***

Potrošnja vode je kritična uglavnom za zemlje izložene ozbiljnoj nestašici vode, kao što su Libija, Saudijska Arabija, Jordan i Singapur; stoga su održive i efikasne

tehnologije za potrošnju i tretman vode kritično potrebne. Meldrum et al. (2013) pregledali su životni ciklus upotrebe vode za proizvodnju električne energije [68].

- **Buka i vizuelni uticaji (Noise And Visual Impacts)**

Prema Svetskoj zdravstvenoj organizaciji, buka je definisana kao neželjeni i neočekivani zvuk. Stoga se smatra vrstom zagađenja zbog uticaja na ljudsko zdravlje (Passchier-Vermeer & Passchier, 2000). Opseg sluha zdravih ljudskih bića kreće se od 20 Hz do 20.000 Hz, a efekat na ljudsko zdravlje zavisi od vremena izlaganja i talasne dužine. Buka je faktor životne sredine koji uzrokuje napetost i moguće štetne efekte na ljudsko zdravlje [68].



Slika 3.17. Grafički sažetak uticaja fotonaponskih sistema na životnu sredinu [69]

3.3.2. Koncentrisani solarni energetska sistem (CSP)

Studije obično procenjuju uticaje CSP postrojenja na životnu sredinu tokom životnog ciklusa. Analiza životnog ciklusa (LCA) definiše granične uslove kako bi uključila procese, kao što su proizvodnja (ekstrakcija sirovina, transport do fabrike, procesi proizvodnje komponenti, transport do regionalnog skladišta), izgradnja (priprema zemljišta, izgradnja pomoćnih objekata, montaža postrojenja), rad i održavanje (proizvodnja rezervnih delova i njihov transport do lokacije, potrošnja goriva vozila za održavanje, potrošnja vode za čišćenje ogledala), demontaža (energija potrebna za rastavljanje komponenti postrojenja) i odlaganje (energija potrebna za transport otpada do deponija, reciklažu komponenti, spalionicu ili energija potrebna za konačno odlaganje) [69].

- **Korišćenje zemljišta**

Veličina i upotreba solarnih sistema snažno zavise od nivoa insolacije. Korišćenje zemljišta za datu lokaciju smanjuje se sa većom insolacijom, zbog čega isti sistem može zahtevati do tri puta više zemljišta za visoke geografske širine nego za lokacije bliže ekvatoru. CSP postrojenja globalno zahtevaju značajnu količinu zemljišta koje mora biti relativno ravno. Korišćenje zemljišta se kvantifikuje na osnovu kapaciteta

(površina/MW_{el}) i proizvodnje (površina/GWh/god). Rezultati zasnovani na kapacitetu pomažu u proceni korišćenja zemljišta i troškova novih projekata jer se elektrane često rangiraju prema kapacitetu. U novije vreme, više solarnih elektrana ima rezervoar toplotne energije. U ovom slučaju, potrebna površina se povećava sa kapacitetom rezervoara. Generalno, korišćenje zemljišta je veće nego za energiju vetra, geotermalne elektrane i nuklearnu energiju, ali manje nego za ugalj, biomasu i hidroenergiju [69].

- ***Upotreba i potrošnja vode***

Kao i druge elektrane, solarne termalne elektrane imaju prilično veliku potrošnju vode i uticaj na kvalitet vodenih izvora i tokova na području na kome se vrši proizvodnja električne energije. Jedan deo vode koristi se za proizvodnju pare u termodinamičkom ciklusu, a većina vode (85% do 95%) namenjena je hlađenju. Primenjena tehnologija hlađenja u velikoj meri određuje količinu vode koju je postrojenje povuklo. Većina primenjene vode za hlađenje vraća se u životnu sredinu, ali kvalitet te vode razlikuje se od one uzete iz životne sredine, što može biti izvor zabrinutosti. Voda se takođe koristi za čišćenje ogledala kako bi se održala visoka reflektivnost površine, iako je potrošnja vode za ovu svrhu obično stotine puta manja nego za hlađenje (oko 20 litara/MWh) [69].

- ***Čvrst i neopasan otpad***

Aktivnosti održavanja i odlaganje otpada tipično za proizvodnju električne energije dešavaće se tokom životnog ciklusa CSP postrojenja. Otpad iz elektrane uključuje masne krpe, prazne kontejnere, slomljen i zarđao metal i mašinske delove, otpadne električne materijale i drugi razni čvrsti otpad, uključujući tipičan otpad koji proizvode radnici. Ovaj otpad se klasifikuje i njime upravlja lokalna kompanija ovlašćena za to. Prikupljanje i odlaganje otpada sprovode se prema odgovarajućim regulatornim zahtevima kako bi se minimizirali efekti na bezbednost i zdravlje [69].

- ***Opasan otpad***

Različiti opasni otpadi mogu nastati tokom rada elektrane. Taj otpad uključuje otpadni fluid za prenos toplote (HTF) i rastvarače, otpadno ulje i filtere za ulje, krpe za čišćenje, korišćene hemikalije ili hemikalije sa istekom roka trajanja iz sistema za tretman vode, boje sa istekom roka trajanja, itd. Ovaj opasan otpad se privremeno skladišti na licu mesta u odgovarajućim rezervoarima i trajno odlaže na propisan način prema zakonskim propisima. Radnici će biti obučeni za rukovanje svim opasnim otpadom nastalim na tom mestu [69].

- ***Gasovi emitovani u atmosferu***

Nacionalna laboratorija za obnovljivu energiju SAD-a (NREL) sprovela je sveobuhvatnu procenu životnog ciklusa (LCA) obnovljivih izvora energije, uključujući CSP tehnologiju [69]. Za ovu procenu životnog ciklusa identifikovane su 42 emisije gasova staklene bašte (GHG) u trinaest jedinstvenih referenci za Fresnel, parabolično korito, energetski toranj i tehnologije paraboličnog tanjira. Iako je većina objavljenih procena emisija gasova staklene bašte u životnom ciklusu u opsegu između 14 g i 32 CO₂ ekvivalenta/kWh [69].

- **Otpadna toplota**

Svi sistemi za konverziju toplotne energije proizvode otpadnu toplotu koja može imati značajan udeo. Udeo otpadne toplote zavisi od primenjene tehnologije. Otpadna toplota u CSP postrojenju je manja nego u geotermalnim elektranama i elektranama na prirodni gas, ali je veća nego u elektranama na ugalj i naftu [69].

- **Materijali u CSP postrojenjima**

CSP postrojenja koriste mnoge radne materijale unutar svog sistema, daleko više od konvencionalnih elektrana na fosilna goriva. Primarni materijali koji se koriste su uglavnom čelik, staklo i beton, sa relativno visokom stopom reciklaže, obično preko 95%. Materijali koji se ne mogu reciklirati su prvenstveno inertni i mogu se koristiti za izgradnju puteva ili se mogu bezbedno odložiti na deponije. Međutim, nekoliko toksičnih materijala (jedinjenja) nalazi se unutar CSP sistema, najčešće sintetička organska jedinjenja kao što su bifenili i bifenil etar koji se koriste u sistemu za prenos toplote. Ova jedinjenja mogu izazvati požar i, tokom curenja u sistemu, dospeti u tlo kroz koje mogu doći do drugih delova životne sredine i treba ih tretirati kao opasan otpad. Iz tla, otrovna jedinjenja mogu apsorbovati biljke, a jedući te biljke, životinje ih takođe mogu apsorbovati. Oni pokušavaju da reše problem toksičnih materijala zamenjujući ih vodom ili rastopljenim solima [69].

3.4. Ekonomski aspekti

Ekonomski aspekti korišćenja solarnih ćelija su u uzlaznoj putanji u pogledu isplativosti i budućeg korišćenja. Iako početni troškovi instalacije mogu biti zabrinjavajući, oni stalno opadaju zahvaljujući tehnološkom napretku i ekonomiji obima. Plus, uzmite u obzir dugoročne uštede: solarne ćelije generišu besplatnu električnu energiju od sunca, smanjujući vašu zavisnost od konvencionalnih, često nestabilnih, izvora energije. Takođe ćete verovatno imati koristi od državnih podsticaja poput poreskih kredita i neto merenja, gde se višak energije koji generišete može vratiti u mrežu za kredite ili gotovinu. Sve u svemu, solarne ćelije postaju sve atraktivnija investicija, koja se isplaćuje tokom vremena dok doprinosi čistijoj planeti.

3.4.1. Fotonaponski solarni energetska sistem

Izuzetan rast u primeni fotonaponskih sistema povezanih na mrežu (PV)

poslednjih godina u velikoj meri je vođen njegovom ekonomijom koja se brzo poboljšava. Sistemski troškovi su pali skoro četiri puta na nekim tržištima tokom poslednjih pet godina. Međutim, budući uspeh tehnologije zavisice od vrednosti koju može doprineti pružanju pristupačnih, pouzdanih, sigurnih i održivih energetske usluga krajnjim korisnicima. PV ima neke dragocene karakteristike u tom pogledu. Može se primeniti u gotovo bilo kom obimu, od domaćinstva do komunalnog postrojenja, obično generiše u vreme veće potražnje i stoga veće vrednosti, i ima male štetne uticaje na životnu sredinu. Međutim, njegova donekle nepredvidiva proizvodnja izaziva određene izazove unutar industrije koja teži da osigura da ponuda mora zadovoljiti potražnju na odgovarajućim nivoima kvaliteta u svakom trenutku i na svim lokacijama širom električne mreže. Ovi izazovi postaju značajniji kako se penetracija PV-a povećava.

Skladištenje energije je inherentno vredno u elektroenergetskom sistemu. Međutim, direktno skladištenje električne energije i distribuirano skladištenje malog obima igrali su samo ograničenu ulogu u većini elektroenergetskih industrija. Međutim, oni su široko korišćeni za primene van mreže (off-grid). Rastuće penetracije PV-a u mrežama stvorice veću potrebu za skladištenjem energije i nove mogućnosti za direktno skladištenje i distribuirano direktno skladištenje, pre svega za industrijske potrebe. Ove mogućnosti uključuju bolje upravljanje obrascima potražnje krajnjih korisnika i agregiranim mrežnim tokovima, poboljšanje pouzdanosti krajnjih korisnika i kvaliteta energije, uzdeljenje balansa isplativosti komponenti sistema između PV-a i opreme za skladištenje. Ovo istraživanje istražuje ove mogućnosti, naglašavajući raznovrstan opseg potencijalnih predloga integracije PV-a i skladištenja, identifikujući kako se ove različite vrednosti mogu proceniti za određene kontekste i pružajući predloge o tržišnim aranžmanima za olakšavanje postizanja ovih ekonomskih mogućnosti [70].

3.4.2. Koncentrisani solarni energetski sistem (CSP)

CSP sistemi nude značajne ekonomske prednosti zbog svojih jedinstvenih sposobnosti i operativnih karakteristika, pre svega u pogledu efikasnost smanjenja troškova. Iako početni troškovi postavljanja CSP sistema mogu biti veći u poređenju sa tradicionalnim izvorima energije, njihove dugoročne ekonomske koristi značajno nadmašuju investiciju. Možemo očekivati niske operativni troškovi, jer CSP sistemi zahtevaju minimalne tekuće troškove nakon instalacije, sa nižim troškovima održavanja i rada od konvencionalnih elektrana.

Može se postići stabilna cene energije, jer CSP sistemi obezbeđuju stabilne i predvidive troškove električne energije jer fluktuirajuće cene goriva ne utiču na njih. CSP postrojenja imaju projektovani životni vek od 25 do 30 godina, obezbeđujući pouzdan izvor energije tokom nekoliko decenija. CSP sistemi mogu poboljšati pouzdanost i stabilnost električne mreže istovremeno omogućavajući skladištenje viška energije za

kasniju upotrebu. CSP sistemi mogu obezbediti kontinuirano snabdevanje energijom putem skladištenja toplotne energije, čak i tokom oblačnih perioda ili noću.

Mogućnost procesa dispečeringa i upravljivost CSP sistema pomažu u balansiranju mreže i integraciji drugih promenljivih izvora obnovljive energije, kao što su vetar i fotonaponska solarna energija. Implementacija CSP sistema može podstaći rast lokalne industrije, stvoriti mogućnosti za zapošljavanje i stimulisati regionalne ekonomije. Instalacija i održavanje CSP postrojenja zahtevaju kvalifikovane stručnjake da doprinesu stvaranju radnih mesta i ekonomskom razvoju. Razvoj CSP projekata podstiče rast lokalnih lanaca snabdevanja za komponente i materijale, podržavajući domaće industrije. CSP sistemi pokreću istraživanje, razvoj i inovacije, što dovodi do stvaranja novih tehnologija, patenata i ekspertize [71].

- ***Prednosti fotonaponskog solarnog energetskeg sistema***

Fotonaponske ćelije su ekološki prihvatljive i obezbeđuju čistu zelenu energiju. U vreme proizvodnje električne energije, fotonaponske ćelije ne utiču na emisije gasova staklene bašte. Ovim se jasno stavlja do znanja da nisu opasne po životnu sredinu.

- **Dostupnost:** Budući da je solarna energija neiscrpna, ona proizvodi energiju u izobilju svuda gde ima sunčeve svetlosti. Pametna energetska mreža. Solarni paneli su praktični za inteligentne energetske mreže. Distribuirana proizvodnja električne energije predstavlja očekivanu realnost proizvodnje u sledećoj generaciji.
- **Isplativost:** Solarni paneli su isplativi, a njihova cena može značajno opasti u narednim godinama. Dakle, u budućem obimu oni su ekonomski izvodljivi i održivi rast [72].

- ***Nedostaci fotonaponskog solarnog energetskeg sistema***

Kao što znamo, sva obnovljiva energija ima probleme sa prekidima osim energije vetra, jer nema sunca noću, a ponekad ni tokom dana zbog oblačnog neba ili padavina. Dakle, ovo čini solarne panele manje pouzdanim u velikim područjima. Instalacija solarnih panela zahteva više prostora. [72].

- ***Prednosti koncentrisanog solarnog energetskeg sistema***

Jedna od glavnih prednosti CSP-a je ta što može da generiše električnu energiju čak i kada sunce ne sija, zahvaljujući sistemu za skladištenje toplote. To čini CSP pouzdanijim izvorom obnovljive energije od solarnih PV sistema, koji zahtevaju sunčevu svetlost za proizvodnju električne energije. CSP takođe ima manji ekološki otisak od tradicionalnih elektrana na fosilna goriva, jer ne proizvodi emisije gasova staklene bašte niti zagađenje vazduha. Pored toga, CSP se može kombinovati sa drugim obnovljivim izvorima energije, kao što su vetar ili hidroenergija, kako bi se stvorila stabilnija i pouzdanija energetska mreža [73].

- ***Nedostaci koncentrisanog solarnog energetskeg sistema***

Dok CSP ima mnogo prednosti, takođe ima i neke nedostatke koje treba uzeti u obzir. CSP sistemi mogu biti skupi za izgradnju i održavanje, zahtevajući mnogo

zemljišta za smeštaj ogledala ili sočiva koja se koriste za fokusiranje sunčeve svetlosti. CSP sistemi takođe zahtevaju mnogo vode za proizvodnju pare, što može biti izazovno u područjima sa ograničenim vodnim resursima. Konačno, CSP sistemi mogu biti manje efikasni od solarnih PV sistema, jer se deo sunčeve svetlosti gubi dok se koncentriše na malu površinu [73].

- ***Pitanja implementacije fotonaponskog solarnog energetskeg sistema***

Viša temperatura panela smanjuje performanse solarnog PV panela. Taloženje prašine na PV panelu smanjuje proizvodnju električne energije i povećava temperaturu površine solarnog PV panela, što može smanjiti vek trajanja solarnih PV panela [74].

- ***Pitanja implementacije koncentrisanog solarnog energetskeg sistema***

CSP je jedna od nekoliko novih tehnologija za proizvodnju obnovljive električne energije. Međutim, CSP ima visoke početne kapitalne troškove i složenu primenu tehnologije, što je značajna prepreka za implementaciju CSP sistema u mnogim zemljama u razvoju [75].

- ***Budući obim fotonaponskog solarnog energetskeg sistema***

Istraživanja u fotonaponskoj tehnologiji napreduju brzo na mnogim frontovima. Neki od ovih pristupa su još uvek u ranim fazama i daleko od puštanja u proizvodnju, ali mogu postati operativni. Izrada solarne ćelije sa nekoliko slojeva je moguća jer se energetski procep može podesiti prilagođavanjem dopiranja. Svaki sloj bi imao energetski procep podešen na određenu talasnu dužinu svetlosti. Ove "višeslojne" ćelije mogu dostići 40% efikasnosti, ali ostaju skupe. Istraživanje iza solarne energije takođe napreduje. Naučnici otkrivaju nove načine za smanjenje troškova i povećanje efikasnosti solarnih panela uz kreativne, impresivne načine za generisanje energije. Sledeći su futuristički razvoji u solarnoj tehnologiji [76]:

- Bionički list (Bionic leaf);
- 3D štampana drveće na solarni pogon;
- Perovskiti;
- Solarne energija tankog filma (Thin Film Solar);
- Solarne ćelije zasnovane na ugljeniku;
- Obojeni solarni paneli;
- Polimerne solarne ćelije;
- Tehnologija solarne koncentracije.

- ***Budući Obim Koncentrisanog Solarnog Energetskeg Sistema***

Uprkos svojim nedostacima, CSP ima potencijal da igra značajnu ulogu u budućnosti obnovljive energije. Kako se tehnologija poboljšava i troškovi smanjuju, CSP sistemi postaju efikasniji i isplativiji. Pored toga, CSP može pomoći u rešavanju nekih izazova povezanih sa drugim izvorima obnovljive energije, kao što je povremena proizvodnja i skladištenje energije.

Jedan obećavajući razvoj u polju CSP-a je korišćenje rastopljene soli kao fluida za prenos toplote. Rastopljena so ima nekoliko prednosti u odnosu na druge fluide,

uključujući njenu sposobnost da radi na višim temperaturama i zadržava toplotu tokom dužih perioda. To znači da CSP sistemi koji koriste rastoplenu so mogu generisati električnu energiju tokom dužih perioda, čak i kada sunce ne sija. Pored toga, rastopljena so je isplativija i ekološki prihvatljivija od drugih fluida.

Druga oblast inovacija u CSP-u je korišćenje hibridnih sistema, koji kombinuju CSP sa drugim izvorima obnovljive energije kao što su vetar ili hidroenergija. Ovi hibridni sistemi mogu pomoći u prevazilaženju izazova povezanih sa svakom tehnologijom, stvarajući stabilniju i pouzdaniju energetska mrežu. Na primer, energija vetra može generisati električnu energiju kada sunce ne sija, dok CSP može obezbediti energiju tokom perioda slabog vetra[75].

4. OPTIMALNI DIZAJN I ALOKACIJA SOLARNE ENERGIJE ZA KRITIČNA DISTRIBUIRANA OPTEREĆENJA SEMAFORA KORIŠĆENJEM ITERATIVNE TOPSIS METODE

4.1. Pozadina i motivacija

Transportni sistemi su osnovne usluge mobilnosti koje opslužuju milione ljudi i vitalne su komponente održivih gradova i zajednica [78]. Postizanje održivosti u transportnim sistemima je ključno za rešavanje klimatskih promena i promovisanje urbane pogodnosti za život. Ključni ciljevi uključuju smanjenje emisija gasova staklene bašte i unapređenje čistijih opcija prevoza, kao što su pešačenje, biciklizam i javni prevoz [79]. Pored toga, povećanje bezbednosti i pogodnosti za život u gradovima je ključno za stvaranje okruženja u kojima se ljudi osećaju sigurno i podstiču korišćenje održivih načina prevoza [80]. Štaviše, od suštinskog je značaja poboljšati prilagodljivost i efikasnost transportnih sistema kako bi se ispunili promenljivi zahtevi i osigurala otpornost pred budućim izazovima [81]. Međutim, ovi sistemi su inherentno ranjivi na ometajuće događaje u rasponu od tehničkih kvarova do prirodnih katastrofa [82]. Posledično, otpornost transportnih sistema je kritično važna. Otpornost transportnih sistema ne samo da igra kritičnu ulogu u održavanju kontinuiteta usluga već i ublažava uticaj poremećaja na sisteme gradskog prevoza [83]. Jedan značajan aspekt poremećaja u sistemima gradskog prevoza odnosi se na nestanke struje u distributivnoj mreži, koji mogu učiniti vitalne transportne uređaje kao što su semafori neoperativnim. Dok je početni dizajn sistema za distribuciju električne energije zasnovan na standardnim vremenskim uslovima, ovaj pristup je neadekvatan tokom prirodnih katastrofa, kao što su zemljotresi, poplave i oluje, kao i napada izazvanih ljudskim faktorom, uključujući vandalizam, sabotazu i fizičke i sajber napade [84], [85]. Ovi neplanirani događaji predstavljaju izazove bez presedana za elektroenergetsku mrežu, što rezultira široko rasprostranjenim i dugotrajnim potpunim nestancima (blackouts) ili, povremeno, delimičnim nestancima. Pored toga, planirani prekidi, koji mogu nastati usled nedostatka goriva, vršnih opterećenja koja se povećavaju tokom određenih perioda godine i neophodnih manevara održavanja na linijama distributivne mreže, takođe mogu rezultirati nestancima struje i štetnim efektima, posebno za kritična opterećenja.

Nestanci struje se generalno kategorizuju kao događaji kratkog ili dugog trajanja na osnovu trajanja prekida. Dugotrajni nestanak struje je prekid u električnim uslugama koji premašuje tipično trajanje prekida na distributivnom nivou, potencijalno trajući od nekoliko

sati do dana, ili čak nedelja. Zimske oluje koje su pogodile Teksas u februaru 2021. i uragan Marija koji je pogodio Portoriko 2017. primeri su nestanaka struje koji su imali razorne posledice za stanovnike koji su ostali bez struje. Potencijalni uticaji uključuju rizike po zdravlje i bezbednost zbog prekinutog snabdevanja vodom, grejanjem ili hlađenjem; kvarenje hrane i nestašice; upotrebu generatora u zatvorenim prostorima, što predstavlja rizik od trovanja ugljen-monoksidom; i kašnjenja ili poremećaje u uslugama zdravstvene zaštite [86]. Međutim, čak i kratkotrajni nestanci struje mogu izazvati nepopravljivu štetu ako utiču na kritična opterećenja (CLs). Ipak, u distributivnoj mreži, nije uvek neophodno garantovati napajanje za puno opterećenje tokom nestanaka, sve dok je dostupno dovoljno energije da se zadovolji određeni procenat CLs [87]. Jedan od CLs u distributivnoj mreži posebno na gradskim ulicama i raskrsnicama, su semafori i njihovi signalni sistemi. Ovi sistemi su neophodni za osiguranje protoka saobraćaja i bezbednosti pešaka.

Većina poremećaja u usluzi električne energije obično je ograničena u obimu i trajanju [88]. Na primer, u Sjedinjenim Državama, okruzi doživljavaju u proseku približno 60 kratkotrajnih prekida (koji traju oko 1 sat) i oko 2 prekida koja prelaze 8 sati godišnje zbog prekida napajanja [89]. Većina nestanaka struje širom sveta je kratkotrajne ili trenutne prirode. Neki dugotrajni prekidi potiču od trajanja ovih kratkotrajnih poremećaja; stoga, smanjenje učestalosti kratkotrajnih prekida može direktno doprineti smanjenju dugotrajnih prekida. Na primer, prema [90], identifikacija najverovatnijih uzroka trenutnih prekida putem tehnika rudarenja podataka može potencijalno smanjiti verovatnoću dugotrajnih trajnih prekida za više od 18%. Posledično, osiguranje otpornosti kritičnih i osetljivih opterećenja na kratkotrajne prekid je od najveće važnosti.

4.1.1. Pregled literature

Semafori na raskrsnicama predstavljaju jedno od najvažnijih kritičnih opterećenja (CLs) u urbanim električnim mrežama, primarno karakterisani njihovim niskim nominalnim kapacitetom (obično manje od 5 A). S obzirom na to da su ova opterećenja distribuirana širom gradskih putnih mreža, osiguranje pouzdanog napajanja je od suštinskog značaja za bezbednost i pešačkog i automobilske saobraćaja. U [91], istaknuto je praktično i održivo rešenje za napajanje saobraćajnih signala korišćenjem solarne energije. Dizajn sistema promoviše energetska nezavisnost, operativnu efikasnost i prilagodljivost, čineći ga vrednim doprinosom savremenim rešenjima za upravljanje saobraćajem. U [92], skicirano je sveobuhvatno rešenje za održavanje funkcionalnosti saobraćajnih signala tokom nestanaka struje, naglašavajući važnost bezbednosti, prilagodljivosti i efikasne komunikacije u sistemima za upravljanje saobraćajem. Predloženi aparat i metoda mogu značajno poboljšati bezbednost na putevima tokom vanrednih situacija. U [93], diskutovan je sistem saobraćajnih signala na solarni pogon koji osigurava stabilan rad i smanjuje oslanjanje na mrežu. Ističe prednosti kao što su niski troškovi održavanja, bežična instalacija i značajne uštede energije, čime se rešava kritična

potreba za stabilnim napajanjem u upravljanju saobraćajem.

U studijama kao što su [94], [95] i [96], diskusije o strategijama za poboljšanje otpornosti vođene su bez ulaženja u vrste resursa koji se koriste za održavanje rada semafora tokom nestanaka struje. Strategija poboljšanja otpornosti predložena u [94] fokusira se na ojačavanje linija i strateško postavljanje distribuiranih generatora. Ovaj pristup je dizajniran da reši prekid u distributivnim linijama i semaforima unutar integrisanog sistema distribucije električne energije i gradskog transportnog sistema. Mreže za distribuciju električne energije i transport su zamršeno integrisane kroz robusne interakcije, stvarajući spregnuti sistem. Korišćenje električnih vozila, njihovih kolaborativnih odgovora ključno je za smanjenje gubitaka i povećanje urbane otpornosti tokom nekonvencionalnih događaja naglašenih u [95]. Razmatranjem interakcija između distributivnih mreža i transportnih mreža, u [96], višestruke strategije za poboljšanje otpornosti predložile su isplativiju šemu alokacije resursa za rad mreža transport-distribucija energije tokom uragana. Reference [97] i [98] ističu da se distribuirani energetske resursi (DERs) mogu adaptivno pozicionirati pre katastrofe i strateški otpremiti nakon toga kako bi se uspostavile mobilne mikromreže (MGs). Ove mobilne MGs mogu uključivati klastere električnih vozila, mobilne generatore za hitne slučajeve i mobilno skladištenje energije, a sve to ima za cilj povećanje otpornosti mreže za distribuciju električne energije. Međutim, tokom nestanaka struje, zagušenje vozila na gradskim raskrscima i rezultirajući saobraćajni kolaps predstavljaju značajne izazove za pravovremeno raspoređivanje mobilne opreme na ovim lokacijama, komplikujući pružanje hitne energije.

Autori su predstavili solarni rezervni sistem dizajniran da isporuči pouzdanu energiju tokom nestanaka struje, ilustrujući njegovu isplativost i superiorne performanse u poređenju sa dizel generatorima (DGs). Sa troškom 25% nižim od tradicionalnih DGs, ovo solarno rešenje pojavilo se kao praktična opcija za napajanje aplikacija kao što su semafori. Štaviše, integracija solarnih sistema ne samo da garantuje stabilno snabdevanje energijom za semafore već takođe doprinosi potrebama domaćinstava za toplom vodom, čime se povećava ukupna korisnost i atraktivnost rešenja. U [100], diskutovano je o vanmrežnim sistemima obnovljive energije, naglašavajući važnost pouzdanog snabdevanja energijom tokom prekida. Ovo ističe prednosti solarnih sistema, posebno njihovu sposobnost da održe napajanje tokom poremećaja, čineći ih pogodnim za kritične aplikacije kao što su semafori. Osiguranje stabilnog napajanja za semafore je od suštinskog značaja za bezbednost pešaka i efikasan protok vozila. Različita rešenja, uključujući solarnu energiju, sisteme besprekidnog napajanja (UPS) i namenske dalekovode su analizirana. Svaka metoda predstavlja različite prednosti i izazove, posebno u pogledu pouzdanosti, cene i uticaja na životnu sredinu. U Tabeli 1. predložene metode su ocenjene na osnovu kriterijuma kao što su troškovi implementacije, zavisnost od temperature, izvodljivost instalacije, stabilnost tokom privremenih prekida i ukupno preporučeno rangiranje. Na osnovu ove analize, najbolja metoda je korišćenje pouzdanih napojnih vodova (linija). Uzimajući u obzir problem krađe opreme, solarni i UPS sistemi moraju biti instalirani na sigurnim lokacijama (često na visini) i ponekad unutar zatvorenih i izolovanih prostora. Ovo može povećati temperature unutar opreme, potencijalno uzrokujući kvarove UPS-a tokom toplijih meseci. Štaviše, UPS i solarne metode služe kao komplementarni sistemi. Ipak, između ta dva, solarna metoda se smatra logičnijom zbog značajne zavisnosti UPS sistema od

temperature.

Implementacija sistema solarne energije predstavlja jedno od najefikasnijih rešenja za osiguranje stabilnog rada geografski distribuiranih kritičnih opterećenja. Ova studija se fokusira na optimalni dizajn takvih sistema uz interdisciplinarna razmatranja u elektrotehnici i upravljanju saobraćajem. U ovom dizajnu, ograničenja instalacije, uključujući zahteve za visinom i maksimalni broj solarnih panela na osnovu strukturne stabilnosti stubova semafora, pažljivo su rešena. Korišćenjem stvarnih podataka o instalaciji, vremenu i zračenju, performanse ovog sistema pod kratkotrajnim i dugotrajnim nestancima struje su temeljno analizirane na sezonskoj osnovi i prema trajanju prekida. Da bi se primenili realni uslovi za baterije, ova analiza uključuje nekoliko početnih stanja napunjenosti tokom prekida napajanja. Da bi se odabrale najpogodnije raskrsnice iz postojećeg skupa, ispitana su dva pristupa: metoda zasnovana na strategiji Zelenog talasa i metoda Multi-objektivne optimizacije zasnovana na TOPSIS-u.

Glavni doprinosi ove studije su sledeći:

- Razvijen je novi pristup za analizu i upravljanje energetskim performansama solarnih sistema tokom kratkotrajnih nestanaka struje. Ova strategija razmatra sezonske varijacije i mesečne fluktuacije, koristeći sveobuhvatan skup podataka koji uključuje podatke o zračenju i temperaturi. Predložena metoda nudi vredne uvide u pouzdanost i efikasnost solarnih energetskih sistema pod različitim operativnim uslovima.
- Ova studija predstavlja primarne strategije za odabir i određivanje prioriteta raskrsnica za instalacije solarnih sistema, fokusirajući se na metodu zasnovanu na strategiji Zelenog talasa i pristup Multi-objektivne optimizacije. Ove strategije su utemeljene na podacima iz stvarnog sveta iz Kazvina, Iran, osiguravajući praktičnu primenljivost i tačnost u donošenju odluka.
- U ovoj studiji, i električni i saobraćajni parametri su istovremeno razmatrani kako bi se identifikovale prioritetne raskrsnice za primenu solarnog sistema. Proces selekcije koristi iterativnu TOPSIS metodu koja odražava uticaj prethodnih izbora na naknadne odluke. Pored toga, sprovedena je analiza osetljivosti težinskih koeficijenata – kako pojedinačno tako i u parovima – kako bi se procenila robusnost prioritizacije parametara i poboljšala pouzdanost procesa selekcije.

Tabela 4.1. Pregled predloženih metoda.

Metode	Temperaturna zavisnost	Cena	Verovatnoća kvara	Održivost tokom kratkog prekida	Preporučeno rangiranje
UPS	H (Visoka)	M (Srednja)	H	L (Niska)	4
Dizel Generator	L	M	L	M	5
Solarna	M	H	H	M	2

Metode	Temperaturna zavisnost	Cena	Verovatnoća kvara	Održivost tokom kratkog prekida	Preporučeno rangiranje
Namenski vodovi	L	L	L	H	1
Mehanizam prebacivanja	L	L	L	M	3

H=High (Visoka), L=Low (Niska), i M=Medium (Srednja).

4.2. Formulacija problema

U ovom odeljku, kao što je ilustrovano na Slici 1, fokusiramo se na dizajn sistema solarne energije i njegovih različitih komponenti, uzimajući u obzir specifične uslove lokacije i efikasnost uključene opreme. Takođe ćemo se baviti upravljanjem energijom i snabdevanjem opterećenja unutar sistema tokom nestanka struje, kao i različitim operativnim stanjima drugih komponenti, kao što su baterije. Ovo uključuje efekte sunčevog zračenja i temperature na performanse sistema, što dovodi do sveobuhvatne formulacije predložene postavke.

4.2.1. Dizajn solarnog sistema

Struktura solarnog sistema uključuje solarne panele i mrežnu snagu kao izvore ulazne snage, baterije za skladištenje energije, invertor, kontroler punjenja i električno opterećenje. Električna opterećenja uključuju semafore na raskrsnicama, pametne kontrolere, nadzorne kamere i centralne jedinice. Prema intuitivnim metodama [101], [102] i [103], veličina fotonaponskih (PV) panela određuje se prosečnim energetske izlazom solarnog sistema tokom perioda dizajna, za koji se očekuje da premaši potražnju opterećenja za određeni faktor sigurnosti. Faktor sigurnosti se obično bira na osnovu iskustva dizajnera. Iako primena intuitivne metode i zaokruživanje na više može dovesti do predimenzioniranja sistema tokom specifičnih perioda (kao što su sezone sa dovoljno sunčeve svetlosti i optimalnim uglovima), ključno je uzeti u obzir sporadičnu prirodu opterećenja i povremeni nedostatak pristupa njima koji zahteva pouzdano napajanje iz solarnog sistema, čak i pod izazovnim uslovima. Sledeći odnosi su korišćeni za izračunavanje kapaciteta sistema solarne energije i baterije:

$$P_{PV} = \frac{E_L}{\eta_S \cdot \eta_{INV} \cdot PSH} \cdot S_f \quad (4.1)$$

gde E_L predstavlja dnevnu potrošnju energije opterećenja, η_S i η_{inv} označavaju efikasnost komponenti sistema, uključujući solarnu i inverter, PSH su vršni sunčani sati, a S_f je faktor sigurnosti, koji se često procenjuje iz subjektivne procene dizajnera i može dovesti do nepreciznosti. Broj solarnih panela, označen kao N_{Panel} , izračunava se odnosom izlazne snage PV-a, P_{PV} , prema nominalnoj snazi odabranih panela, P_{Panel}

$$N_{PANEL} = \frac{P_{PV}}{P_{Panel}} \quad (4.2)$$

Kapacitet baterije za skladištenje izražen je na sledeći način:

$$C_{Wh} = \frac{E_L \cdot N_J}{N_B^S \cdot V_B \cdot DOD \cdot \eta_B} \quad (4.3)$$

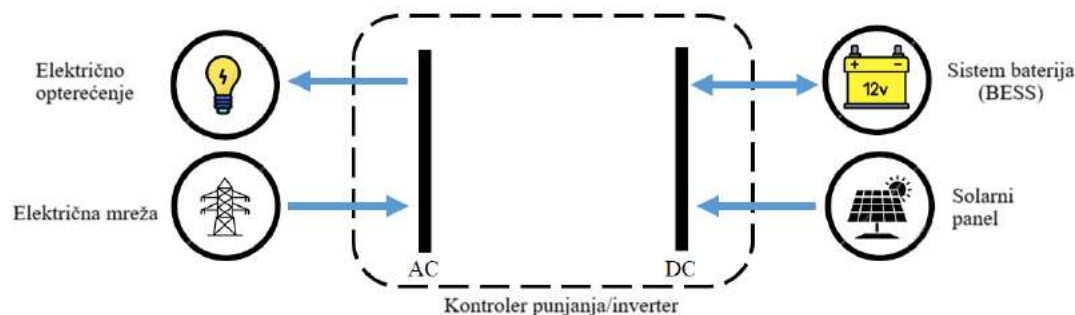
gde N_J označava broj dana autonomije (u danima), N_B^S se odnosi na broj baterija povezanih u seriju, V_B je nominalni napon terminala baterije (u voltima), DOD predstavlja maksimalnu dubinu pražnjenja (u procentima), a η_B predstavlja efikasnost baterije. Pored toga, broj potrebnih paralelnih setova baterija može se izračunati korišćenjem sledeće jednačine:

$$N_B^P = \frac{C_{Wh}}{C_B} \quad (4.5)$$

Konačno, ukupan broj baterija dobijen je množenjem broja paralelnih setova sa brojem serijski povezanih baterija.

4.2.2.Strategija upravljanja energijom u nestanku struje

U upravljanju energijom, kada su dostupni i mrežna snaga i solarna energija, prioritet se daje solarnom sistemu. Operativni dijagram toka sistema tokom nestanka struje prikazan je na Slici 4.1. Prema jednačini 4.2, sistem funkcioniše na sledeći način: Kada izlazna snaga iz solarnog sistema premašuje potražnju opterećenja, sistem primarno snabdeva energiju sa solarnih panela, pri čemu se sav višak solarne energije usmerava ka punjenju baterija. Obrnuto, ako izlazna snaga solarne energije padne ispod zahteva opterećenja, baterije počinju da isporučuju potrebnu snagu. U odsustvu solarnog sistema, baterije obezbeđuju energiju opterećenjima dok njihov napon ne dostigne prag niskog napona isključenja. U ovom trenutku baterije se isključuju, što rezultira time da opterećenje ostaje bez energije.



Slika 4.1. Šematski tok solarnog sistema.

$$P_{Load} = \begin{cases} P_{pv} - P_{ESS}^{ch}, & \text{if } (P_{PV} \geq P_{Load}) \\ P_{PV} + P_{ESS}^{dch}, & \text{if } (P_{PV} < P_{Load}) \\ P_{ESS}^{dch}, & \text{if } (V_B > 20\%) \\ Outage, & \text{if } (V_B < 20\%) \end{cases} \quad (4.6)$$

Snaga koju generiše solarni sistem zavisi od nivoa sunčevog zračenja (i intenziteta i ugla) i temperature okoline [104] i [105], što se može izračunati prema Jednačini (4.7):

$$P_{PV,t} = N_{Panel} \cdot P_{Panel} \cdot I_{r,t} \cdot (1 - 0.004 \cdot (T_{a,t} - 25)) \quad (4.7)$$

U kontekstu opisanom gore, N_{Panel} predstavlja broj panela povezanih u seriju, P_{Panel} označava izlaznu snagu solarnih panela, $I_{r,t}$ označava sunčevo zračenje, a $T_{a,t}$ je temperatura okoline. Operativni model sistema za skladištenje je izveden iz metodologija predstavljenih u Referencama [106] i [107].

4.2.3. Metodologije za odabir predloženih raskrsnica za primenu solarnog sistema

Postoje različite metode za odabir prioriternih m raskrsnica od ukupno n raskrsnica (sa $m < n$). Ovi pristupi su primarno pod uticajem ponašanja u saobraćaju i značaja raskrsnica. Urbani budžeti za sprovođenje takvih mera često su ograničeni, pri čemu su intervencije visokih troškova obično raspoređene na nekoliko godina. Alokacije zasnovane na prioritetima se stoga određuju godišnje, prema raspoloživom budžetu. Signalizovane raskrsnice i osiguranje njihovog neprekidnog rada tokom nestanka struje kritično su važni za upravljanje protokom saobraćaja i sprečavanje haosa. Opremanje m odabranih signalizovanih raskrsnica (od n) solarnim sistemima predstavlja primer ovog prioriteta. Visoki troškovi povezani sa nabavkom, instalacijom i održavanjem ovih sistema čine izbor prioriternih raskrsnica kritičnim pitanjem. Glavne metodologije za ovaj izbor su navedene u nastavku:

4.2.4. Metoda zasnovana na strategiji Zelenog talasa (Green wave)

Ovaj pristup bira raskrsnice na osnovu primarnih arterijskih koridora unutar grada. Konkretno, raskrsnice duž glavnih puteva — koje se smatraju kritičnim koridorima — treba da budu opremljene solarnim sistemima. Važnost svakog koridora određuje prioritet raskrsnica za instalaciju solarnog sistema, služeći kao dopunska mera glavnom napajanju električnom energijom. Odabir glavnih koridora vrše stručnjaci za transport i saobraćaj, zajedno sa saobraćajnom policijom. U strategiji zelenog talasa, svetlo na semaforu se menja sa vremenskim kašnjenjem (vreme pomaka) između svetlosnih faza dve uzastopne raskrsnice. Posledično, signali se prebacuju na zelene talase [108]. Zeleni talas se javlja kada serija raskrsnica omogućava kontinuiran protok saobraćaja preko nekoliko raskrsnica. Vozilo koje putuje duž zelene rute videće progresivnu kaskadu zelenih svetala i neće morati da se zaustavlja na raskrsnicama. Rute zelenog talasa takođe smanjuju opterećenje na saobraćaj i energiju [109]. Čak i regionalno planirani nestanci struje koji dovode do gubitka električne energije na raskrsnicama sa semaforima mogu poremetiti efikasnost strategije zelenog talasa. semafora, glavne rute koje implementiraju strategiju zelenog talasa, koje su odgovorne za smeštaj većeg obima vozila, imaju prioritet za instalacije sistema solarne energije.

Uzimajući u obzir predložene koridore za razmene istok-zapad, izbor najboljeg koridora istok-zapad zasniva se na dva primarna kriterijuma: prvo, trebalo bi da ima kraću dužinu, i drugo, trebalo bi da ima manje raskrsnica. Broj raskrsnica opremljenih sistemima solarne energije u svakom od tri predložena koridora jednak je broju postojećih raskrsnica duž tih ruta. Implementacija sistema solarne energije na raskrsnicama očekuje se da poboljša protok saobraćaja i značajno smanji zagušenje. Verovatnoća saobraćajnih poremećaja i kašnjenja je minimizirana održavanjem operativnog kontinuiteta saobraćajnih signala tokom prekida, čime se poboljšava ukupna urbana mobilnost i bezbednost. Ova investicija u obnovljivu energiju ne samo da podržava funkcionalnost strategije zelenog talasa već i doprinosi održivijoj i efikasnijoj mreži gradskog prevoza.

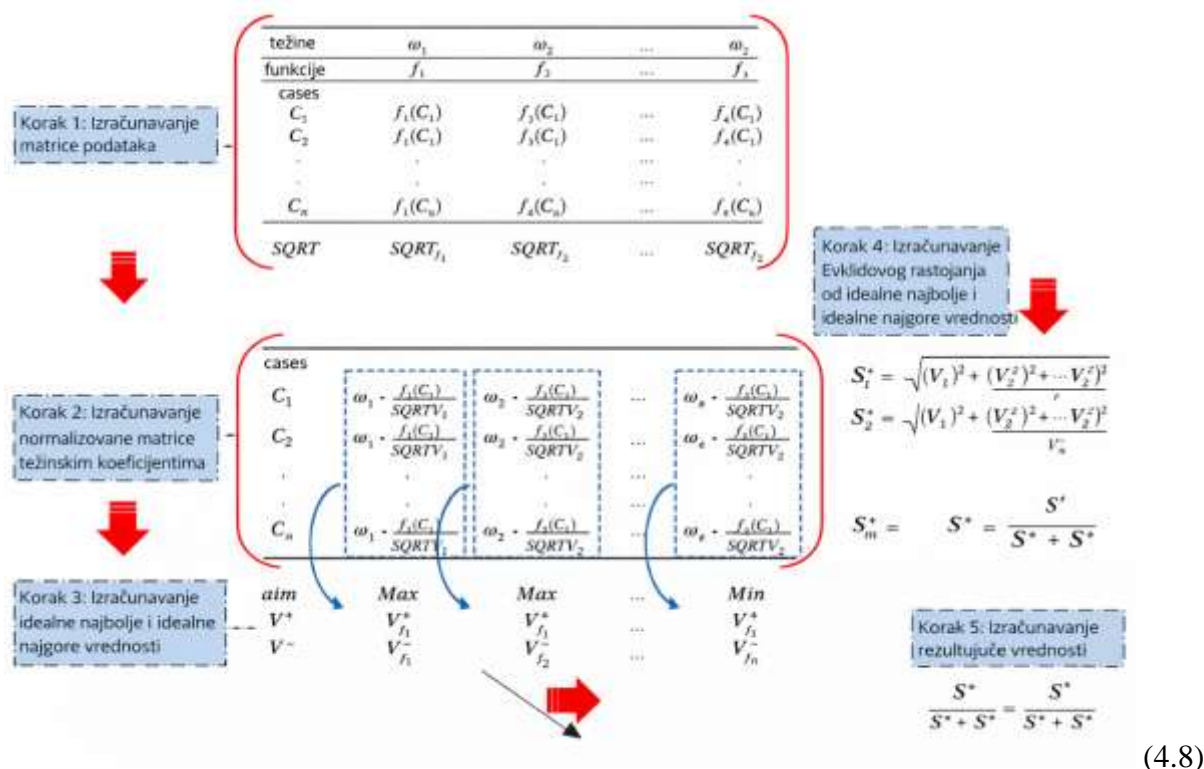
4.2.5. Metoda multi-objektivne optimizacije

Pored karakteristika vezanih za saobraćaj, kao što su važnost puta i njegova širina, ova metoda uključuje električna razmatranja, uključujući izvodljivost instaliranja solarnih sistema i mogućnost pouzdane veze sa stabilnim izvorima napajanja. U poređenju sa prvom metodom, ovaj pristup je sveobuhvatniji i pravičniji, pružajući uravnoteženiju osnovu za donošenje odluka.

Za rangiranje i evaluaciju optimalnog rešenja problema sa više ciljeva, metoda Tehnike za redosled preferencija po sličnosti sa idealnim rešenjem (TOPSIS) smatra se efikasnim

pristupom [110]. Mehanizam različitih faza TOPSIS metode, uključujući izračunavanje matrice ulaznih podataka, određivanje ponderisane normalizovane matrice, određivanje idealne najbolje i idealne najgore vrednosti, izračunavanje Euklidske distance od ovih idealnih vrednosti i izračunavanje skora performansi, ilustrovan je na Slici 4.2.

Pripadajuće formule za TOPSIS metodu su sledeće: Primarna funkcija cilja u TOPSIS metodi izračunava se za svaku alternativu prema Jednačini 4.7. Rezultantna vrednost zbira kvadrata za svaku funkciju cilja kroz različite



Slika 4.2. Selekcija raskrsnica za instalaciju solarnog sistema na osnovu strategije.

alternative se izračunava korišćenjem Jednačine 4.9. Korišćenjem gore navedenih informacija, ponderisana normalizovana matrica se izračunava u Koraku 2. Nakon toga, u Koraku 3, zavisno od cilja svake funkcije cilja (maksimizacija ili minimizacija), najbolje idealne ($V_{f_i}^+$) i najgore idealne ($V_{f_i}^-$) vrednosti određuju se prema Jednačinama 4.10. i 4.11., respektivno. U Koraku 4, pozitivna i negativna idealna rešenja (S_i^+ i S_i^-) izračunavaju se korišćenjem 4.12. i 4.13, respektivno. Konačno, u Koraku 5, koeficijent bliskosti koji predstavlja rangiranje svake alternative, izračunava se korišćenjem Jednačine 4.16.

$$OF_{TOPSIS} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot f_i \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (4.10)$$

$$SQRT_{f_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^m f_i^2(C_i)} \quad (4.11)$$

$$V_{f_i}^+ = \text{MAXA} \left[\omega_i \cdot \frac{f_i(C_1)}{SQRT_i}, \omega_i \cdot \frac{f_i(C_2)}{SQRT_{f_i}}, \dots, \omega_i \cdot \frac{f_i(C_m)}{SQRT_{f_i}} \right] \quad (4.12)$$

$$V_{f_i}^- = \text{MINA} \left[\omega_i \cdot \frac{f_i(C_1)}{SQRT_i}, \omega_i \cdot \frac{f_i(C_2)}{SQRT_{f_i}}, \dots, \omega_i \cdot \frac{f_i(C_m)}{SQRT_{f_i}} \right] \quad (4.13)$$

$$S_i^+ = \sqrt{\left(\omega_1 \cdot \frac{f_1(C_i)}{SQRT_i} - V_{f_1}^+ \right)^2 + \dots + \left(\omega_n \cdot \frac{f_n(C_i)}{SQRT_n} - V_{f_n}^+ \right)^2} \quad (4.14)$$

$$S_i^- = \sqrt{\left(\omega_1 \cdot \frac{f_1(C_i)}{SQRT_i} - V_{f_1}^- \right)^2 + \dots + \left(\omega_n \cdot \frac{f_n(C_i)}{SQRT_n} - V_{f_n}^- \right)^2} \quad (4.15)$$

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (4.16)$$

Postoje dva glavna pristupa za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije (MOO). Ovi pristupi se nazivaju konvencionalni (jednostepeni) TOPSIS i iterativni TOPSIS.

TOPSIS se izvršava jednom kako bi se odabrala prva raskrsnica, koja se zatim dodaje ograničenjima problema. TOPSIS se zatim ponovo primenjuje za odabir sledeće raskrsnice. Ovaj proces se ponavlja dok se ne odaberu sve željene raskrsnice.

U problemu kao što je odabir više raskrsnica iz skupa kandidata, izbor prve raskrsnice značajno utiče na izbor narednih raskrsnica.

5. OPTIMIZACIJA LAKIH REKURENTNIH MREŽA ZA PREDVIĐANJE PROIZVODNJE SOLARNE ENERGIJE

5.1. Trenutano stanje hibridnih solarnih energetskih sistema

Posljednjih godina, korišćenje fosilnih goriva nije u fokusu razmatranja u proizvodnji električne energije, jer ugrožava kvalitet vazduha i voda i dovodi u pitanje procese zaštite životne sredine. Ograničene rezerve fosilnih resursa sa visokim stepenom iskorišćenja, kao i njihove neodržive karakteristike u smislu ekologije, dovele su do povećanog interesovanja za obnovljive izvore [115]. Ipak, integracija obnovljivih izvora u elektroenergetske sisteme nije bez izazova [116]. Izvori kao što su vetrogeneratori, solarne ćelije, gasne elektrane ili ekološki odživi hidro-energetski izvori mogu zahtevati relativno velika početna novčana ulaganja. Osim toga, izvori poput sunca i vetra, u velikoj meri se oslanjaju na spoljašnje klimatske faktore, što ih čini nepouzdanim za određene kritične primene [117,118]. Uprkos ovim izazovima, integracija obnovljivih izvora je od suštinskog značaja za održivost i energetska nezavisnost svakog elektroenergetski nezavisnog prostornog područja. U današnjem svetu, tačno predviđanje proizvodnje solarne energije kao dominantnog oblika proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije je ključno za efikasno upravljanje mrežom i trgovinu energijom. Obnovljivi izvori su relativno čisti i decentralizovani, što može ublažiti mnoge gubitke uzrokovane neefikasnošću dalekovoda u procesu prenosa proizvedene električne energije.

Pravni okvir za proizvodnju i distribuciju električne energije nastale iz solarnih izvora u zemljama Zapadnog Balkana je sve više usklađen sa zakonodavstvom Evropske unije (EU), koje izdaje različite pravne akte kojima se reguliše razvoj energetske sektora i podržava korišćenje obnovljivih izvora energije. U strategijama i direktivama, kao što su *Bela knjiga o energetske politici* i *Zelena knjiga o energetske politici i obnovljivim izvorima energije*, EU se fokusira na sigurnost snabdevanja, zaštitu životne sredine i konkurentnost industrije. Direktiva 2018/2001/EU [119] naglašava važnost upotrebe obnovljive energije i postavlja ciljeve za 2030. godinu, uključujući smanjenje emisije CO₂ za 40%, povećanje udela obnovljive energije na 32% i povećanje udela obnovljivih izvora u transportu na 14%. Za postizanje ovih ciljeva, države članice razvijaju nacionalne akcione planove sa strategijama, zakonodavnim okvirima i podsticajima. Od uvođenja ove direktive, udeo obnovljive energije u potrošnji energije EU je porastao sa 12,5% u 2010. na 23% u 2022. godini [120].

U skladu sa strategijama EU, pravni okvir za proizvodnju i distribuciju solarne energije u zemljama Zapadnog Balkana je orijentisan na usklađivanje sa zahtevima EU. Iako postoje razlike u zakonodavstvima pojedinačnih zemalja, većina primenjuje zajedničke standarde kroz zakone kao što su *Zakon o energetici* i *Zakon o obnovljivoj energiji*, kao i kroz *nacionalne strategije razvoja energetike*. Sve zemlje Zapadnog Balkana imaju *osnovni zakon o energetici* koji obuhvata obnovljive izvore energije (OIE). Ovim zakonom se uobičajeno definišu prava i obaveze proizvođača solarne energije, obaveza distributivnih sistema da olakšaju priključenje na mrežu za proizvođače OIE, procedure za izdavanje dozvola za izgradnju i puštanje u rad solarnih elektrana, kao i podsticaj za ulaganja u OIE kroz subvencije, snabdevanje u predefinisanim tarifama, odnosno povoljnim kreditima.

Upotreba veštačke inteligencije (AI) je pokazala impresivne mogućnosti za upravljanje predviđanjem vremenskih serija [121], čak i u elektroenergetskom sektoru. Korišćenjem sposobnosti predviđanja algoritama veštačke inteligencije (AI), kako bi se uravnotežila proizvodnja i potražnja, može se postići bolje korišćenje ovog vrednog resursa. Štaviše, pružanjem preciznije i pouzdanije procene proizvodnje, može se postići bolja integracija sa postojećim sistemima distribucije električne energije, smanjujući gubitke u prenosu [122,123].

Međutim, AI algoritmi često zahtevaju velike memorijske i procesorske računarske kapacitete, te samim time zahtevaju i značajna ulaganja za obuku i izvršenje predviđanja. Modeli se obično pokreću na relativno skupim grafičkim procesorskim jedinicama (GPU) i zahtevaju podršku sistemske infrastrukture. Ovo može dovesti do relativno visokih zahteva za potrebnom snagom sistema. Optimizovani modeli bi se potencijalno mogli porediti i izvršavati na znatno jeftinijim sistemima, omogućavajući preciznim modelima da rade uz manje hardverske troškove i sa znatno nižim zahtevima za energijom. *Malo mašinsko učenje* (TinyML) je podskup mašinskog učenja (ML) koji istražuje primenu ML modela na mikrokontrolerskim jedinicama (MCU) [124]. Takva primena bi mogla značajno da smanji troškove korišćenja ML u primeni, posebno na udaljenim lokacijama gde se mogu instalirati solarne elektrane i vetro turbine. Dalja upotreba prediktivnih modela mogla bi pomoći boljoj integraciji modela predviđanja u mreže Interneta stvari (IoT) [125,126].

Ovaj rad istražuje upotrebu metaheurističkih optimizacionih algoritama za izbor optimalnih hiperparametara za tri tipa rekurentnih neuronskih mreža (RNN) [127]. Cilj je da se odaberu lagane arhitekture koje se mogu preneti na MCU za upotrebu na terenu uz održavanje odgovarajućih performansi. Pošto se zadatak podešavanja hiperparametara često smatra NP-teškim [128], predložen je modifikovani metaheuristički optimizator, a uporedna analiza je sprovedena u odnosu na nekoliko savremenih optimizatora na dva javno dostupna skupa podataka, što je rezultiralo ukupno šest eksperimenata. Modeli sa najboljim učinkom se dalje istražuju u pogledu njihovog potencijala za predviđanje kada se primene na MCU. Doprinosi ovog istraživanja mogu se sagledati na sledeći način:

- Istraživanje zakonskih okvira u cilju energetskog predviđanja na prostoru Zapadnog Balkana;
- Predlog laganog okvira za predviđanje proizvodnje solarne energije korišćenjem modela optimizovanih za MCU;
- Uvođenje modifikovanog metaheurističkog optimizatora prilagođenog potrebama optimizacije ove studije;
- Izbor lakih arhitektura predviđanja vremenskih serija sa odgovarajućom tačnošću za elektroenergetske sisteme;
- Implementacija predloženog modela na MCU za procenu praktične efikasnosti pristupa.

5.2. Teoretske osnove istraživanja metode optimizacije lakih rekurentnih mreža za predviđanje proizvodnje solarne energije

Obnovljivi izvori igraju sve važniju ulogu u održavanju elektroenergetske održivosti. Iako potpuna zamena trenutne tehnologije proizvodnje električne energije iz fosilnih izvora još uvek nije moguća, neophodno je pomeriti razvojni fokus ka poboljšanju i boljoj integraciji obnovljivih izvora u postojeće elektroenergetske mreže [129]. Korišćenje obnovljivih izvora može se sagledati kroz nekoliko oblika kao što su *geotermalna energija*, *energija vetra* i *sunčeva energija* koje su sve široko prihvaćene i koriste se [130], te se samim tim može doneti zaključak da su vetar i solarna energija najpopularniji obnovljivi izvori energije.

Problem sa proizvodnjom energije vetra i sunca je inherentno oslanjanje ove tehnologije na vremenske prilike. Promene u proizvodnji otežavaju balansiranje ponude i potražnje na tržištu električne energije, što u kritičnim slučajevima može dovesti do preopterećenja proizvedenom električnom energijom ili do hitnih potreba za uvozom energije iz drugih elektroenergetskih sistema. Iako postoje rešenja za skladištenje, ona često nisu ekonomski isplativa. Precizno predviđanje proizvodnje može pomoći u poboljšanju iskorišćenja, kao i planiranju dodatne proizvodnje iz drugih izvora. Jedan potencijalni način predviđanja proizvodnje je korišćenje tehnika predviđanja vremenskih serija [131]. Predviđanje vremenskih serija je primenjeno u nekoliko oblasti i pokazalo je izuzetno dobre rezultate. Upotreba AI algoritama može pomoći u poboljšanju tačnosti predviđanja, jer AI može da uči iz posmatranih podataka, uzimajući u obzir suptilnije odnose između karakteristika. Rekurentne neuronske mreže su posebno poznate po svojoj sposobnosti da upravljaju vremenskim serijama [132,133]. Međutim, u praksi korišćeni su i drugi pristupi, poput modela dubokog učenja [134,135]. Nekoliko istraživačkih radova navodi dugotrajne kratkoročne

mreže [136,137] i zatvorene rekurentne jedinice [138,139] kao posebno efikasne za rešavanje ovakvih zadataka.

Slično kao *in situ* proizvodnja, *in situ* predviđanje može pomoći da se ublaže neki od izazova operativnih udaljenih sistema [140]. Dok su obuka, priprema i izvršavanje modela predviđanja ML nesumnjivo veoma zahtevni u pogledu računarskih kapaciteta, možemo uočiti da kada se obučeni model uspostavi, njegovo izvršenje može biti dovoljno optimizovano za relativno skromne računarske resurse. Pokretanje prediktivnih modela na MCU-ovima, poznatih kao *TinyML*, je potencijalno veoma zahtevan pristup za predviđanje energije [12]. Daljinski proizvodni sistemi bi se mogli bolje podesiti da održavaju proizvodnju energije, balansiraju uskladištenu potrošnju energije i daju upozorenja kada je to potrebno. Radeći na ivičnim uređajima, *TinyML* minimizira zavisnost od centralizovane infrastrukture, efektivno smanjujući troškove komunikacije i poboljšavajući robusnost sistema. Pored toga, može podržati obradu podataka u realnom vremenu, smanjujući kašnjenje i omogućavajući trenutna predviđanja i donošenje odluka. Međutim, važno je imati na umu ograničen kapacitet MCU-a i dizajnerskih modela koji su dovoljno precizni, ali dovoljno jednostavni da se pokreću na ekonomski održivim i komercijalno dostupnim MCU-ovima.

Optimizacija hiperparametara igra ključnu ulogu u prilagođavanju ML modela za precizno predviđanje i izvršenje na *TinyML* platformama. Odabir hiperparametara pomaže u prilagođavanju modela predviđanja primenjenom problemu, čime se poboljšavaju ukupne performanse modela [141,142]. Optimizacija takođe može dati manje računarski zahtevne modele, uspostavljajući ravnotežu između tačnosti i efikasnosti. Ipak, optimizacija u ML okruženjima može biti izazovna. S obzirom na velike prostore za pretragu predstavljene modernim konfiguracionim šemama algoritama, podešavanje hiperparametara se može smatrati NP-teškim [143]. Istraživači su prilagodili i koristili nekoliko tehnika za rešavanje izazova NP-teške optimizacije. Popularan pristup među njima je upotreba metaheuristike. Metaheuristički optimizatori usvajaju simulirane strategije pretraživanja kako bi locirali karakteristična upotrebljiva rešenja unutar datog prostora za pretragu primenom pristupa određenog slučajnim procesima. Nekoliko optimizatora se pojavilo tokom godina, crpeći inspiraciju iz različitih izvora. Značajni algoritmi optimizacije uključuju

- optimizaciju roja čestica (PSO) [144] i
- genetske algoritme (GA) [145].

Moderniji primeri uključuju nedavno predložene

- algoritam za pretragu reptila (RSA) [146] i
- sinh-cosh optimizator (SCHO) [147].

Metaheuristički optimizatori su pokazali obećavajuće rezultate primenjene na nekoliko problema koji su se pojavili u praksi, uključujući selekciju hiperparametara. Neki značajni primeri uključuju primene u zdravstvu [147–149] i analizu osećanja [150,151]. Predviđanje obnovljive energije je takođe istraženo [152,153], kao i drugi zadaci predviđanja vremenskih serija [154,155].

Dok upotreba AI algoritama za predviđanje ima veliki potencijal u savremenom istraživanju, inkorporacija metaheurističkih optimizatora može dovesti do poboljšanja

performansi uz istovremeno smanjenje računarskih troškova izvršenja modela. Međutim, njihova kombinacija tek treba da se istraži za primenu na *TinyML* uređajima. Ovo istraživanje nastoji da odgovori na ovaj uočeni jaz u literaturi, predlažući modifikovani metaheuristički optimizator dizajniran da odabere optimalne postavke hiperparametara za predviđanje proizvodnje solarne energije korišćenjem RNN arhitekture, dajući adekvatno precizne modele uz održavanje niske složenosti računara.

Štaviše, nekoliko studija je istaklo poteškoće i izazove povezane sa posmatranom integracijom, s obzirom na trenutna ograničenja pravnog okvira u regionima Zapadnog Balkana.

5.2.1. Pravni okvir za proizvodnju i distribuciju solarne energije

Pravni okvir u zemljama Zapadnog Balkana koji se bavi uticajem solarne energije na klimatske promene kontinuirano se usklađuje sa zakonodavstvom EU. Jedna od ključnih mera je Direktiva o obnovljivoj energiji (RED II), koju zemlje u regionu sprovode kroz članstvo u Energetskoj zajednici. Energetska zajednica, međunarodna organizacija osnovana 25. oktobra 2005. godine u ATiny, ima za cilj da proširi unutrašnje energetske tržište EU na jugoistočnu Evropu, uključujući područje Republike Srbije.

Važeći Zakon o energetici u Srbiji, precizira „energetske delatnosti, reguliše uslove i način njihovog obavljanja radi obezbeđivanja kvalitetnog i bezbednog snabdevanja energijom krajnjih potrošača, podstiču proizvodnju energije iz obnovljivih izvora i visokoeffikasne kogeneracije, reguliše organizacija i upravljanje tržištem električne energije i gasa i druga pitanja od značaja za energetiku“ [156]. U 2024. godini započete su procedure za donošenje novog Zakona o energetici u Srbiji, kroz koji će se transponovati direktiva EU. Najavljeno je i da će novi zakoni o prekograničnoj razmeni električne energije i prirodnog gasa biti na javnoj raspravi. Usvajanje ovog zakona bilo bi značajno za Srbiju, jer bi formalizovao kompletan regulatorni paket Energetske zajednice.

U pogledu zaštite životne sredine, pravni okvir u zemljama Zapadnog Balkana postepeno se usklađuje sa zakonodavstvom EU koje ima za cilj očuvanje prirodnih resursa, smanjenje zagađenja i obezbeđivanje održivog razvoja. Iako postoje specifične razlike, većina zemalja Zapadnog Balkana sledi slične principe i okvire. Ključni elementi propisa o zaštiti životne sredine uključuju *Zakon o zaštiti životne sredine*, koji postavlja

- standarde za kvalitet vazduha, vode i zemljišta,
- procene uticaja na životnu sredinu i ekološke takse.

Isti reguliše:

- upravljanje vodnim resursima, kroz očuvanje, kontrolu zagađenja i planiranje rečnog sliva;
- zaštitu biodiverziteta, koja uokvirava strategije za očuvanje staništa i ugroženih

vrsta;

- upravljanje otpadom, koje promovise reciklažu i kažnjava nepropisno odlaganje;
- kontrolu zagađenja vazduha, koja postavlja standarde kvaliteta vazduha i podstiče prelazak na čistije izvore energije;
- strategije i politike energetske efikasnosti i klimatskih promena, promovisući obnovljivu energiju i prilagođavanje klimatskim promenama [157].

Dok se okvir zaštite životne sredine u regionu poboljšava, izazovi u implementaciji ostaju, uključujući nedostatak finansijskih sredstava i tehničkih kapaciteta. Međunarodni aspekti razmene solarne energije i distribucije električne energije širom Zapadnog Balkana postaju sve važniji zbog rastuće potražnje za energijom i prelaska na obnovljive izvore. Većina zemalja Zapadnog Balkana povezana je energetskim koridorima i mrežama koje omogućavaju prekograničnu razmenu energije. Međutim, kapaciteti za razmenu solarne energije su još uvek u razvoju zbog specifičnosti solarnih sistema čija proizvodnja zavisi od vremenskih uslova.

Efikasna razmena solarne energije zahteva infrastrukturu za skladištenje, kao što su sistemi baterija, koji omogućavaju da se energija proizvedena tokom sunčanih perioda skladišti za kasniju upotrebu ili izvozi u susedne zemlje tokom velike potražnje. Razmena solarne energije u regionu je značajna ne samo ekološki već i geopolitički, jer smanjuje zavisnost od fosilnih goriva i velikih izvoznika energije.

Direktiva o obnovljivoj energiji podstiče veći udeo solarne i druge čiste energije u ukupnoj proizvodnji električne energije, sa ciljem smanjenja emisije štetnih gasova. Nacionalni energetski i klimatski planovi (NECP) zemalja poput Srbije, Severne Makedonije i Albanije postavljaju ciljeve za obnovljivu energiju i smanjenje emisije CO₂. Pre izgradnje solarnih elektrana, obavezna je procena uticaja na životnu sredinu (EIA) kako bi se osiguralo da solarni projekti ne štete prirodnoj sredini.

Zemlje u regionu takođe uvode finansijske podsticaje, kao što su subvencije i *fid-in* tarife za solarne projekte, podržavajući ekološku tranziciju. Sistem *fid-in* tarife (FiT) je podsticaj za postrojenja obnovljive energije, gde operater distributivne ili prenosne mreže ugovara sa operaterom postrojenja da plati unapred određenu cenu za svaku isporučenu jedinicu električne energije u dogovorenom periodu [158].

Prema Zakonu o energetici Republike Srbije, Nacionalni energetski i klimatski plan posebno uključuje, prema članu 8. stav 2,

- nacionalne ciljeve koji se odnose na emisije gasova staklene bašte; korišćenje obnovljive energije;
- energetske efikasnosti;
- energetske sigurnosti;
- unutrašnje tržište energije;
- istraživanje, inovacije i konkurentnost u oblasti proizvodnje i distribucije čiste električne energije [159].

Pored toga, propisi su usklađeni sa standardima EU za kvalitet vazduha i kontrolu

zagađenja, podržavajući održivi prelazak na solarnu energiju i smanjujući ekološki otisak. U maju 2021. godine, Međunarodna agencija za energiju (IEA) objavila je studiju [160] koja analizira kompletan scenario dekarbonizacije do 2050. godine, predviđajući da bi do 2050. 90% globalne proizvodnje električne energije moglo doći iz vetroelektrana i solarnih fotonaponskih elektrana.

5.2.2. Rekurentne neuronske mreže

RNN [127] je specijalizovana varijanta neuronske mreže dizajnirana na takav način da omogući rukovanje sekvencijalnim podacima.

Mnogi osnovni elementi neuronske mreže održavaju se u RNN-u, pri čemu neuroni i veze ostaju praktično identični. Međutim, RNN uvodi rekurentne samo-veze za neurone, omogućavajući tako prethodnim aktivacijama neurona da utiču na buduće ishode.

S obzirom na ulaznu sekvencu I , RNN operacija za svaki vremenski korak t može se opisati na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} \hat{o}_t \\ h_t \end{bmatrix} = \phi_w(i_t, h_{t-1}) \quad (5.1)$$

gde \hat{o}_t predstavlja izlaz, a h_t označava skriveno stanje u trenutku t . Neuronsku mrežu phV karakteriše ponderisana mreža V .

Dok je jednostavan RNN proširio mogućnosti dostupne istraživačima koji rade sa sekvencijalnim podacima i neuronskim mrežama, pojavila su se nova pitanja.

Konkretno, gradijenti koji nestaju i eksplodiraju imaju tendenciju da poremete obuku mreže i mogu dovesti do suboptimalnih ukupnih performansi. Tako su razvijene modifikovane verzije ovih modela.

5.2.3. Mreže dugotrajne memorije – LSTM mreže

Jedna proširena verzija jednostavnog RNN-a je dugotrajna memorija (LSTM) [161]. LSTM mreža se proširuje na rekurentnu strukturu i integriše kompleksnu seriju kapija za kontrolu toka informacija unutar mreže, omogućavajući da se neke informacije zadrže u mreži za kasniju upotrebu. Uvodi se stanje ćelije i koristi se za očuvanje podataka. Zaboravljena kapija f_t se može koristiti za brisanje stanja.

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (5.2)$$

gde x_t označava svoje ulaze u vremenskom koraku t , h_{t-1} predstavlja prethodno skriveno stanje, a W_f i U_f se odnose na težinske koeficijente povezane sa ovim ulazima, pri čemu b_f predstavlja vektor pristrasnosti. Dolazni podaci se mogu uvesti u stanje ćelije korišćenjem ulaznog gejta (i_t), kao što je navedeno u jednačini 5.3.

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (5.3)$$

Težinski koeficijenti relevantni za ovaj korak označeni su sa W_i i U_i , pri čemu je pristrasnost sistema predstavljena sa b_i . Niz dodatnih vrednosti kandidata se izračunava kroz hiperbolički tangenti sloj, kao što je prikazano u jednačini 5.4.

$$C_t^{\sim} = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (5.4)$$

Ovde je bitno uzeti u obzir težinske koeficijente V_c i U_c , kao i termin pristrasnosti b_c . Da bi se ažuriralo stanje ćelije, koristi se proizvod \odot po elementima u kombinaciji sa gejtom za zaborav f_t , koji briše prethodno stanje ćelije C_{t-1} da bi se omogućilo da se ažurirano stanje ćelije C_t uspostavi sa trenutnim podacima. Novo izračunate vrednosti kandidata C_t^{\sim} se množe sa ulaznim gejtom i_t i zatim kombinuju sa ovim rezultatom, kao što je definisano jednačinom 5.5).

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot C_t^{\sim} \quad (5.5)$$

Početni sigmoidni izlaz, predstavljen sa o_t , prolazi kroz dalju obradu, kao što je naznačeno u jednačini 5.6, gde stanje ćelije utiče na ovu obradu.

Ovaj rezultujućí izlaz se zatim propušta kroz tanh sloj, kao što je navedeno u jednačini 5.7, što rezultira ažuriranim skrivenim stanjem. Ovde su W_o i U_o težinski koeficijenti, dok b_o predstavlja termin pristrasnosti.

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (5.6)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (5.7)$$

5.2.4. Zatvorene rekurentne jedinice

Dodatna varijacija jednostavnog RNN-a je mreža rekurentnih jedinica (GRU) [162]. Iako se ova mreža takođe oslanja na niz kapija, koristi se znatno jednostavniji sistem, koji se sastoji samo od kapija za ažuriranje i resetovanje.

Ovo čini GRU mreže manje računarski složenim od LSTM, dok su i dalje u stanju da se odupru nekim od očiglednih nedostataka osnovnog RNN-a.

U GRU mreži, kapija za ažuriranje z_t , koja kontroliše koliki je deo skrivenog stanja zamenjen novom informacijom, izračunava se u vremenskom koraku t na sledeći način:

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \quad (5.8)$$

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \quad (5.9)$$

Kandidat skrivenog stanja h_t^\sim se izračunava kao

$$h_t^\sim = \tanh(W \cdot [r_t * h_{t-1}, x_t]) \quad (5.10)$$

Konačno, skriveno stanje h_t se ažurira kombinovanjem prethodnog skrivenog stanja i stanja kandidata:

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * h_t^\sim \quad (5.11)$$

U ovom kontekstu, σ označava sigmoidnu funkciju, \odot predstavlja množenje po elementima, a \tanh označava hiperboličku tangens funkciju.

Težinski faktori W_z , W_r , W i pristrasnosti su parametri rezultati procesa učenja GRU-a.

5.3. Metodologija optimizacije lakih rekurentnih mreža

5.3.1. Optimizator pretrage promenljivog susedstva

Algoritam za pretragu promenljivog susedstva (VNS) [163] koristi sistemski pristup za prilagođavanje strukture susedstva tokom optimizacije. Ideja iza ovog pristupa je fokusiranje na istraživanje udaljenijih lokacija unutar prostora za pretragu i omogućavanje algoritmu da izbegne lokalno i fokusira se na globalni optimizam. Glavne faze strategije optimizacije su *prosejavanje*, *lokalna pretraga* i *promena susedstva*.

Tokom postupaka prosejavanja, bira se rešenje u simuliranom okruženju koje se razlikuje od trenutno najboljeg. Struktura ovog naselja se zatim pažljivo menja kako bi se efikasno istražili regioni. Ovo se može predstaviti kao

$$x' \in N_k(x) \quad (5.12)$$

gde $N_k(x)$ označava indeks susedstva u datoj iteraciji K , dok k označava trenutno rešenje, a k' je izlaz. Kada se k' odredi, sprovodi se lokalna pretraga, kao što je opisano u nastavku:

$$f(x'') \leq f(x') \quad (5.13)$$

Ako lokalna pretraga pronade poboljšano rešenje, što znači $f(k'') < f(k)$, trenutno

rešenje se ažurira na $k = k''$, a indeks susedstva se resetuje na $k = 1$. Ako nije, algoritam istražuje udaljenija naselja povećanjem k :

$$k \leftarrow k + 1 \quad (5.14)$$

Ovi postupci se ponavljaju dok se ne pronađe odgovarajuće rešenje ili dok se ne ispuni neki drugi kriterijum. VNS algoritam je prilično fleksibilan i mogu se koristiti različiti kriterijumi u zavisnosti od cilja optimizacije.

5.3.2. Modifikovani VNS Algoritam

Dok originalni VNS [163] optimizator i dalje pokazuje odlične performanse, opsežno testiranje korišćenjem funkcija benchmarkinga kongresa evolucionog računarstva (CEC) [164] nagoveštava da postoji prostor za poboljšanje. Empirijski testovi takođe sugerišu da poboljšanja populacijske raznolikosti mogu pomoći u jačanju rezultata koje postiže optimizator. Integrisanje adaptivnog pristupa moglo bi pomoći modifikovanom optimizatoru da postigne bolju ravnotežu između intenziviranja i istraživanja, što dodatno koristi postignutom rešenju.

Mehanizmi kontrole diverzifikacije su predloženi u literaturi [165] usredsređeni na L1 normu. Ova metrika omogućava razmatranje raznolikosti i na nivou agenta i na nivou populacije. Dat skup agenata p za n -dimenzionalni problem, L1 norma se može izračunati na sledeći način:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (5.15)$$

$$D_j^p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| x_{ij} - \bar{x}_j \right| \quad (5.16)$$

$$D^p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j^p \quad (5.17)$$

gde k označava srednji vektor pozicija agenata u dimenzijama prostora za pretragu, pri čemu D_p označava individualni vektor različitosti označen kao L_1 norma, a D^p označava ocenu raznolikosti cele populacije. Pošto je veća raznolikost poželjna u ranim fazama, raznovrsnost se dinamički prilagođava tokom optimizacije. L_1 norma upravlja ovom raznovrsnošću preko dinamičkog parametra praga, D_t . Ako se utvrdi da je raznolikost populacije neadekvatna, agensi sa najlošijim učinkom se uklanjaju iz populacije. Raznovrsnost se prati korišćenjem D_t , sa početnom vrednošću diverziteta D_{t0} izračunatom na sledeći način:

$$D_{t0} = \sum_{j=1}^{NP} \frac{(ub_j - lb_j)}{2 \cdot NP} \quad (5.18)$$

Kako algoritam napreduje i rešenja se približavaju optimalnom regionu, vrednost D_t treba da se smanji od početne vrednosti $D_t = D_{t0}$ prema sledećem pravilu:

$$D_{t+1} = D_t - D_t \cdot \frac{t}{T} \quad (5.19)$$

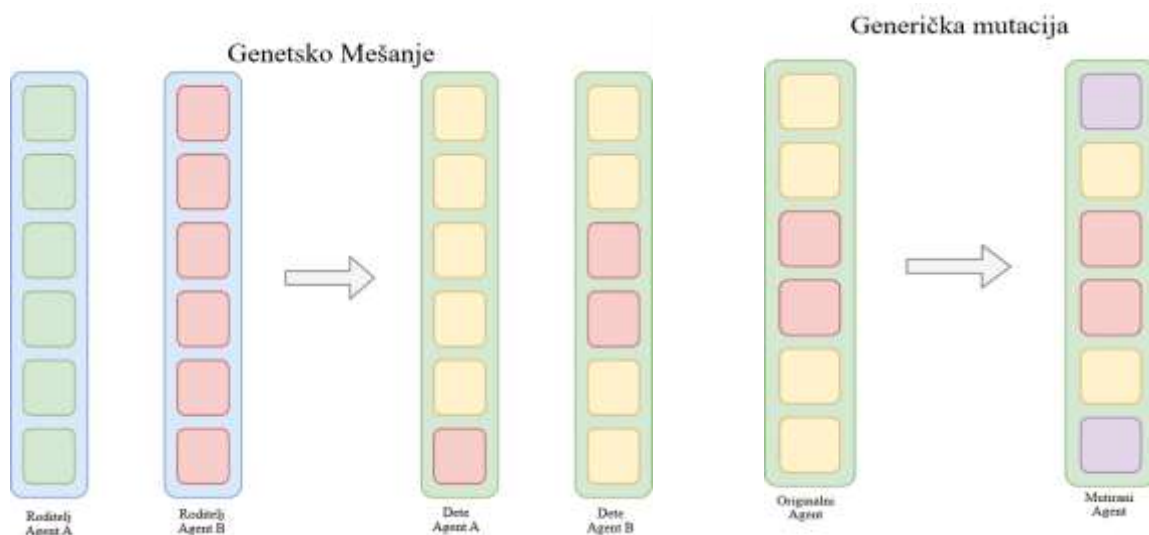
gde t i $t+1$ predstavljaju trenutnu i -tu sledeću iteraciju, a T je ukupan broj iteracija po pokretanju. U kasnijim fazama, kako se D_t postepeno smanjuje, ovaj mehanizam se više neće pokretati, bez obzira na vrednost DP .

U svakoj iteraciji optimizacije, broj agenata sa najgorim performansama se uklanja iz populacije, a nova rešenja se generišu korišćenjem tehnika inspirisanih GA [31]. Ako je $D_t < DP$, onda se zamenski agensi proizvode rekombinovanjem 2 nasumična agensa u populaciji. Ako uslov nije ispunjen, dva agensa sa najboljim učinkom se rekombinuju. Nasumičnom promenom parametara kreiranog agenta, mutacija dodatno menja dobijena rešenja. Mehanizmi ukrštanja i mutacije prikazani su na slici 5.1.

Ukrštanje i mutacija se kontrolišu parametrima ukrštanja i verovatnoće mutacije CP i MP , za koje se pokazalo da daju najbolje rezultate kada su podešeni na $PC=0,1$ i $MP=0,1$. Ažurirana metaheuristika uključuje dodatni adaptivni parametar. U cilju ohrabivanja istraživanja u ranim fazama optimizacije, koristi se podesivi ps parametar. Kasnije faze koriste originalni FA-ov parametar [166], koji poseduje izuzetno moćan plan intenziviranja tempa u cilju podsticanja eksploatacije. Sledeća jednačina predstavlja procese pretraživanja za FA:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + e\beta^{-r_{ij}}(x_j(t) - x_i(t)) + \alpha\varepsilon_i(t) \quad (5.20)$$

gde, od iteracije t , r_{ij} označava lokaciju agenta j , dok $K_{si}(t)$ predstavlja poziciju „svitaca“. U zavisnosti od njihove udaljenosti jedan od drugog, parametar β reguliše privlačenje



Slika 5.1. Genetički crossover i mehanizmi mutacija.

između i i j . Parametar γ predstavlja koeficijent apsorpcije svetlosti, α upravlja slučajnošću, a $\varepsilon_i(t)$ predstavlja stohastički vektor.

Da bi se uravnotežilo istraživanje i eksploatacija i omogućilo učešće oba algoritma, parametar ps se prvo postavlja na 1,5 i menja se u svakoj iteraciji u skladu sa

$$\psi_{t+1} = \psi_t - t/T \quad (5.21)$$

gde je t trenutna iteracija optimizacije, a T je ukupna. FA pretraga će se koristiti ako nasumično generisana vrednost u opsegu $[0, 1]$ na početku svake iteracije premašuje ψ , a ako ne, koriste se tehnike VNS pretrage. Predloženi optimizator se zove prilagodljivi VNS orijentisan na raznolikost (DOAVNS) sa uključenim prilagođavanjima koja se uzimaju u obzir. *Algoritam 1.* koji će sada biti dat obezbeđuje proceduralni pseudokod za ovaj optimizator.

Algorithm 1 Proposed DOAVNS optimizer code.

```

Initialize solutions for a population  $P$  Set initial states for  $NRS = 2, \psi = 1.5$  while  $T > t$  do
for Agent  $a$  in  $P$  do
  Evaluate agent Assign fitness
end for
Determine  $DP$ 
Remove worst  $NRS$  agents form population
if  $DP < Dt$  then for  $NRS$  do
  Apply crossover between agents and random agents Apply mutation to the generated agents
end for else
for  $NRS$  do
  Apply crossover between the best agent and a random agent Apply mutation to the generated agents
end for end if
Select random value  $R$  between  $[0, 1]$ 
if  $R > \psi$  then
  Leverage FA search for updates
else
  Leverage VNS search for updates
end if end while
return Best attained solution

```

5.3.3.ESP32 platforma za upotrebu TinyML-a

ESP32 [167] je popularna platforma koja se koristi za IoT uređaje. Sistem-na-čipu nudi

mnoge prednosti sa pristupačnim i malim otiskom. Uređaj podržava više Bluetooth protokola, kao i Vi-Fi funkcionalnost. U obliku modula, dostupno je nekoliko standardnih interfejsa, uključujući UART, I2C, GPIO, DAC i ADC, kao i podršku za SD karticu i motor PWM. Ovo čini ESP32 veoma raznovrsnom platformom za upotrebu u IoT mrežama [168], posebno kada se uzme u obzir niska minimalna struja od samo 500 mA. Modul se oslanja na dva Xtensa 32-bitna LKS6 mikroprocesora male snage i podržava 446 KB ROM-, a kao i 520 KB SRAM- a na čipu. ESP32 može da podrži operativni sistem u realnom vremenu (RTOS). Koprocesor male snage može se koristiti ako računarski resursi nisu potrebni, kao na primer u slučaju perifernih uređaja za nadgledanje, što omogućava dalje smanjenje snage.

Postoji nekoliko okvira za prenos ML modela za upotrebu na ESP32, uz podršku Arduino zajednice [169]. Jedan takav okvir omogućava da se modeli *Tensor Flow Lite* kompajliraju, učitavaju i pokreću na ESP32. Model sa najboljim performansama optimizovan metaheurističkim optimizatorima u ovom radu je podvrgnut kompilaciji i prilagođen za upotrebu na ESP32 čipu. *Arduino IDE* se koristi za programiranje, *TensorFlow Lite* se koristi za kompilaciju modela, a *Python* programski paket se koristi za obavljanje zadataka obuke modela i optimizacije. *TinyML* nudi značajne prednosti u pogledu troškova hardvera i potrošnje energije. Mikrokontroleri kompatibilni sa *TinyML*-om kao što su STM32 i Arduino Nano 33 BLE Sense koštaju otprilike 5–20 USD po jedinici, u poređenju sa tradicionalnim IoT-om ili rubnim uređajima kao što su *Raspberry Pi* ili *industrijski računari*, koji se kreću od 30 do 150 USD. Ovo rezultira uštedom u hardverskom domenu do 80%. Pored toga, *TinyML* uređaji obično troše samo 1–10 mWh energije, znatno manje od 1–5 Wh koje troše standardni uređaji za *edge* računare, što dovodi do preko 90% smanjenja potrošnje energije i dovodi do nižih operativnih troškova i smanjenih potreba za održavanjem baterije.

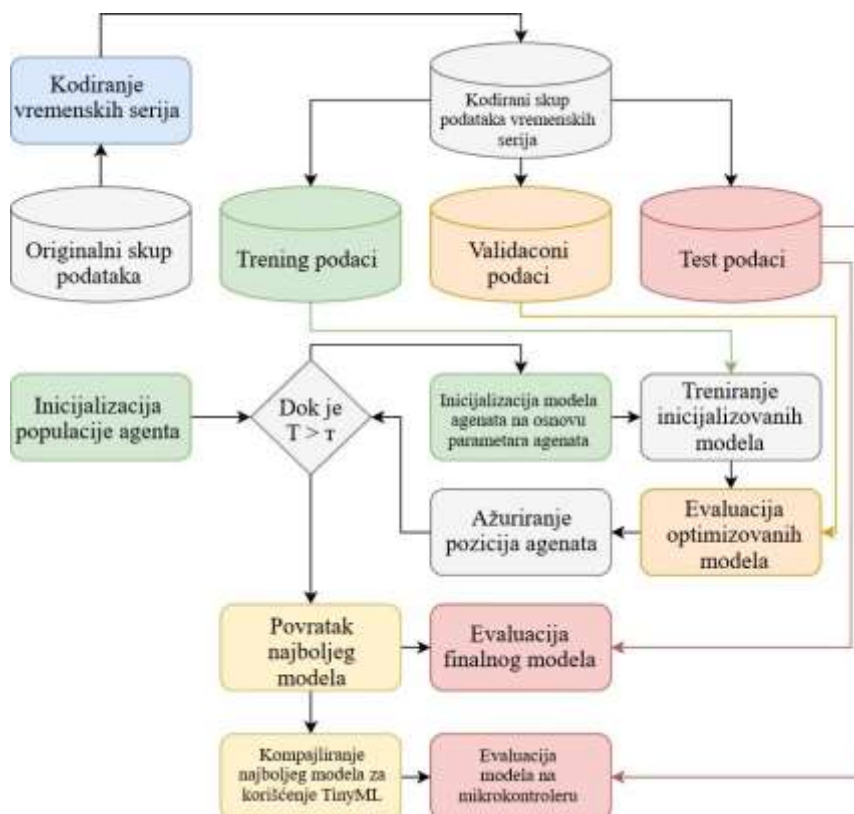
Primena i održavanje su takođe ekonomičniji sa *TinyML*-om. Ovi uređaji zahtevaju minimalnu infrastrukturu i jednostavniji su za upravljanje, što rezultira procenjenim smanjenjem troškova implementacije i održavanja za 50% u poređenju sa standardnim ivičnim rešenjima. Štaviše, obradom podataka na uređaju, *TinyML* drastično smanjuje obim podataka koji se šalju u oblak, značajno smanjujući propusni opseg i troškove skladištenja. Ovo može dovesti do uštede propusnog opsega do 70%, što je posebno korisno u udaljenim okruženjima ili okruženjima sa velikim brojem podataka koji se obrađuju.

5.3.4. Predloženi okvir optimizacije

Okvir predložen u ovom radu uključuje optimizaciju u tri faze. Ovo obuhvata pripremu podataka i kodovanje vremenske serije podataka. Skup uzoraka se koristi za kreiranje vremenske serije, a podaci su razdvojeni na delove obuke, testiranja i validacije. Generišu se populacije agenata, a na osnovu parametara rešenja generišu se modeli. Generisani modeli se

obučavaju koristeći deo za obuku skupa podataka i vrednuju na skupu za validaciju. Kada se ispuni kriterijum prekida, konačni model se procenjuje korišćenjem obustavljenog dela obuke. Najbolje obučeni model se zatim kompajlira za upotrebu na MCU-u, a performanse se simuliraju korišćenjem UART ulaza. Drugim rečima, kada se završi optimizacija modela (obično korišćenjem skupljeg hardvera kao što su GPU ili TPU), ovi optimizovani modeli se mogu efikasno primeniti na ugrađenim uređajima, radeći uz minimalnu potrošnju energije. Dijagram toka koji objašnjava predloženi okvir je predstavljen na slici 5.2.

Slika 5.2. Predloženi dijagram toka okvira.



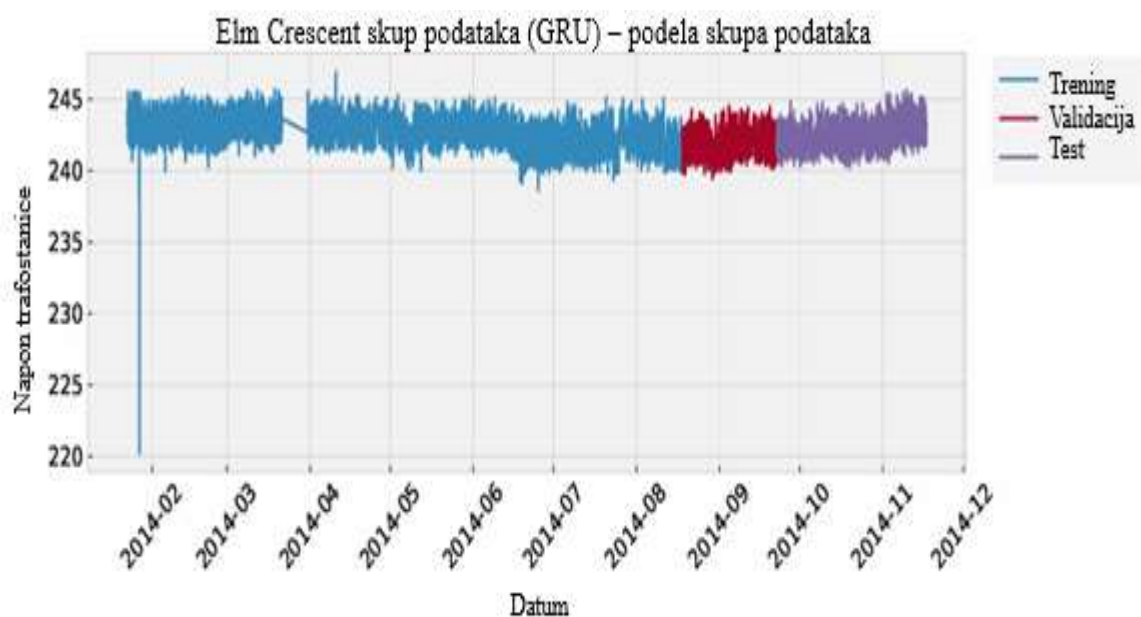
5.4. Eksperimentalna postavka

Da bi se procenila efikasnost predložene metode, korišćen je javno dostupan skup podataka iz stvarnog sveta, koji se može naći na Kaggle-u (<https://www.kaggle.com/datasets/pithonafroz/solar-panel-energi-generation-podaci>, pristupljeno 25. oktobra 2024.).

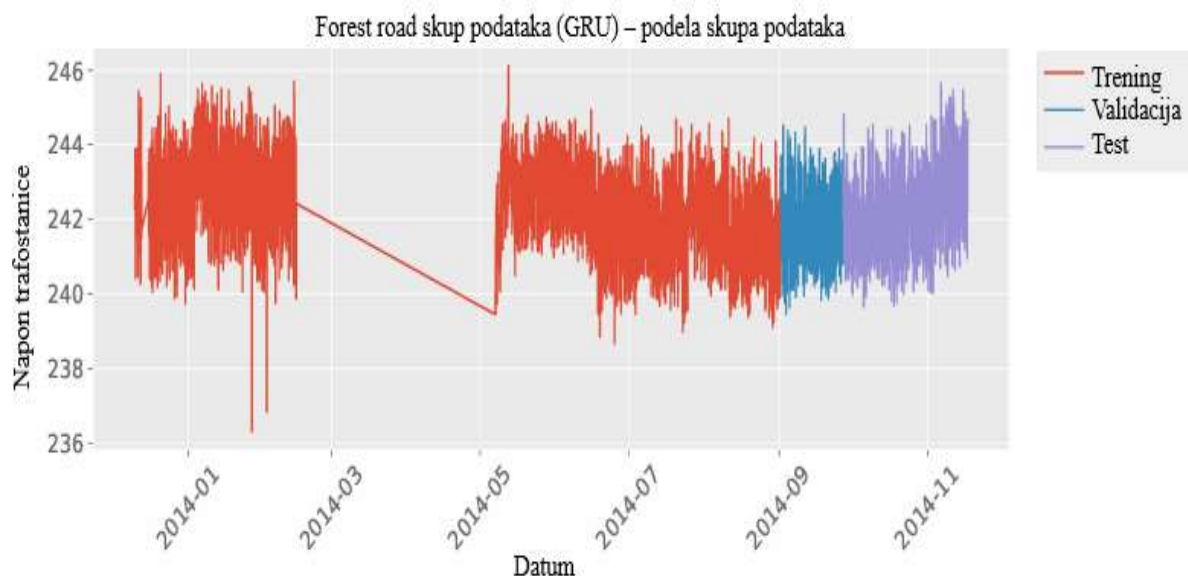
Simulacije su se koncentrisale na segmente *Elm Crescent* i *Forest Road* skupa podataka. Podaci su sekvencijalno podeljeni na skupove za obuku, validaciju i testiranje u odnosu 70:10:20. Simulacije su izvedene sa zaostatkom od 12 koraka i ciljevima od

jednog koraka unapred.

Podele skupova podataka su ilustrovane na slici 3. za *Elm Crescent* i na slici 5.4. za deo skupa podataka *Forest Road*.



Slika 5.3. Vizuelizacija skupa podataka Elm Crescent.



Slika 5.4. Vizuelizacija skupa podataka šumskog puta (Forest Road).

Sprovedena je komparativna simulacija i analiza između predloženog algoritma i osnovnog VNS-a [163].

Procena je takođe uključila druge algoritme, kao što su GA [145], PSO [144], RSA [146] i SCHO [147].

Svaki optimizator je implementiran posebno za simulacije korišćenjem konfiguracija parametara navedenih u originalnim radovima i istraživanjima za svaki algoritam.

Izvedeno je sedam iteracija za svaki optimizator, koristeći populaciju od pet pojedinaca,

a simulacije su vođene nezavisno 30 puta zbog visokih troškova računara povezanih sa optimizacijom.

Optimizatori su bili odgovorni za odabir hiperparametara za modele RNN, LSTM i GRU koristeći empirijski određene opsege, kao što je detaljno prikazano u tabeli 1.

Tabela 5.1. Opsezi parametara za RNN, LSTM i GRU mreže.

Limit	Learning Rate	Dropout	Number of Epochs	Layers	Neurons in Layer
Lower	0.0001	0.05	300	1	12
Upper	0.0100	0.20	600	4	36

Performanse modela se procenjuju korišćenjem standardnih metrika regresije [170].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2} \quad (5.22)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |b_i - \hat{b}_i| \quad (5.23)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2 \quad (5.24)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2} \quad (5.25)$$

Dodatna metrika poznata kao *Indeks saglasnosti* (IoA) [171] je takođe praćena tokom optimizacije kako bi se pružio sveobuhvatniji pogled na performanse modela:

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left((b_i - \hat{b}_i) + |b_i - \bar{b}| \right)^2} \quad (5.26)$$

U datim formulama, b_i i \hat{b}_i predstavljaju stvarne i predviđene vrednosti za i -ti uzorak, \bar{b} predstavlja srednju vrednost, a n je veličina uzorka.

Za izvedene simulacije, MSE se koristi kao funkcija cilja, dok R^2 služi kao indikatorska funkcija.

5.5. Ishodi simulacije

Rezultati simulacije postignuti u sprovedenim eksperimentima prikazani su u tri

dela.

Prvo, predstavljeni su rezultati simulacije RNN-a na skupovima podataka *Elm Crescent* i *Forest Road*.

U svim tabelama koje sadrže rezultate simulacije, najbolji rezultat u svakoj posmatranoj kategoriji je istaknut podebljanim slovima.

Zatim su rezultati LSTM simulacije predstavljeni istim redosledom. Na kraju su predstavljene simulacije sa GRU.

Modeli sa najboljim učinkom u svakom skupu simulacija se zatim upoređuju zasebno u smislu detaljnih metrika.

Rezultati se podvrgavaju statističkoj validaciji. Konačno, prikazane su simulacije za model postavljen na ESP32.

Tabela 5.2. Ishodi funkcije cilja RNN simulacija Elm Crescent.

Method	Best	Worst	Mean	Median	Std	Var
RNN-DOAVNS	0.000943	0.000986	0.000963	0.000973	1.71×10^{-5}	2.93×10^{-10}
RNN-VNS	0.000950	0.000979	0.000964	0.000971	1.05×10^{-5}	1.10×10^{-10}
RNN-GA	0.000949	0.000971	0.000960	0.000959	1.05×10^{-5}	1.09×10^{-10}
RNN-PSO	0.000961	0.000983	0.000972	0.000972	7.40×10^{-6}	5.47×10^{-11}
RNN-RSA	0.000960	0.000983	0.000970	0.000967	7.63×10^{-6}	5.83×10^{-11}
RNN-SCHO	0.000944	0.001017	0.000979	0.000987	2.56×10^{-5}	6.57×10^{-10}

5.5.1.RNN Simulacije

5.5.1.1. RNN Elm Crescent Simulacije

Poređenja u smislu funkcije cilja za rezultate simulacije *Elm Crescent RNN* prikazana su u tabeli 5.2.

Uvedeni optimizator je postigao model sa najboljim performansama, sa rezultatom funkcije cilja od 0,000943.

GA pokazuje impresivne performanse, postižući najbolje rezultate u najgorim i srednjim okolnostima, dok PSO pokazuje najvišu stopu stabilnosti uprkos tome što se ne podudara sa povoljnim performansama drugih optimizatora.

Dalja poređenja stabilnosti su data u smislu dijagrama distribucije rezultata cilja

i indikatora za funkciju cilja na slici 5.5. i funkciju indikatora na slici 5.6.

Iako modifikovani optimizator pokazuje nižu stopu stabilnosti u poređenju sa osnovnim optimizatorom, ovo bi trebalo da bude donekle očekuje se prilikom povećanja diversifikacije algoritama.

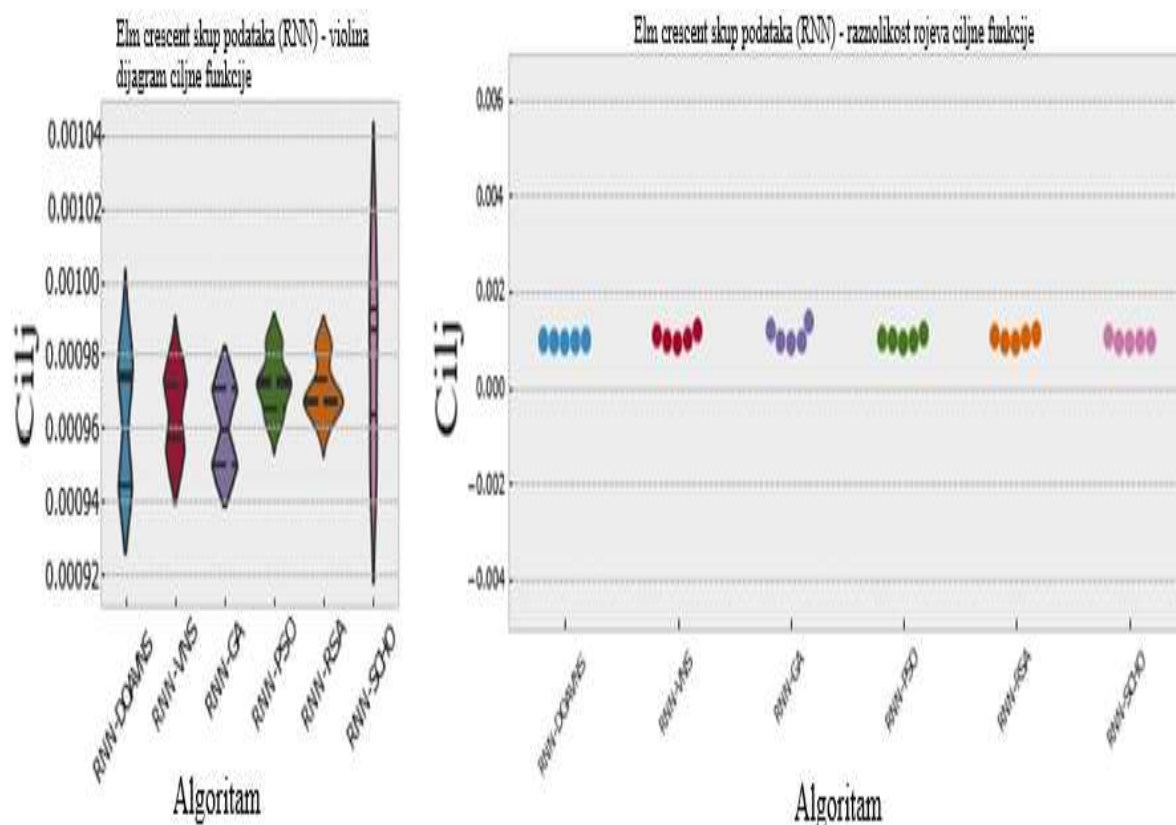
Štaviše, ovaj pad stabilnosti je omogućio optimizatoru da istražuje više obećavajuće regione prostora za pretragu, na kraju postižući izbor parametara sa najboljim učinkom za ovaj test slučaj.

Dalja poređenja u pogledu detaljnih metrika su data u tabeli 5.3. Model optimizovan uvedenim DOAVNS optimizatorom pokazuje definitivnu prednost u odnosu na druge modele, postižući najbolje rezultate u svim prethodno navedenim metrikama.

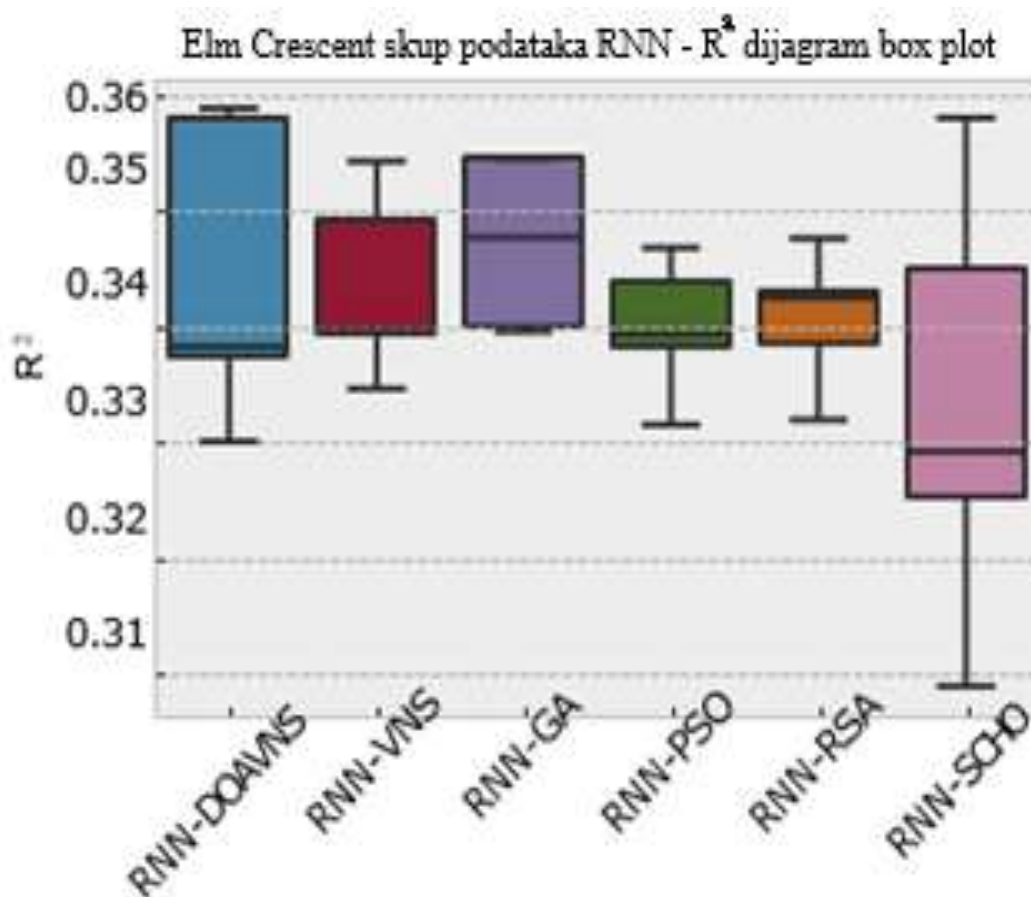
Dalji uvid u performanse optimizatora i njegovu sposobnost da spreči preranu stagnaciju, kao i da izbegne zarobljavanje u lokalnim optimima, prikazani su u smislu dijagrama konvergencije.

Za svaki od algoritama uključenih u uporednu analizu, dijagrami konvergencije u smislu funkcija cilja i indikatora dati su na slikama 5.7 i 5.8.

Povećanje diversifikacije pomaže uvedenom optimizatoru da konvergira ka optimalu, dok se drugi algoritmi bore sa lokalnim najboljim rešenjima.



Slika 5.5. Dijagrami distribucije funkcije cilja Elm Crescent RNN simulacija.

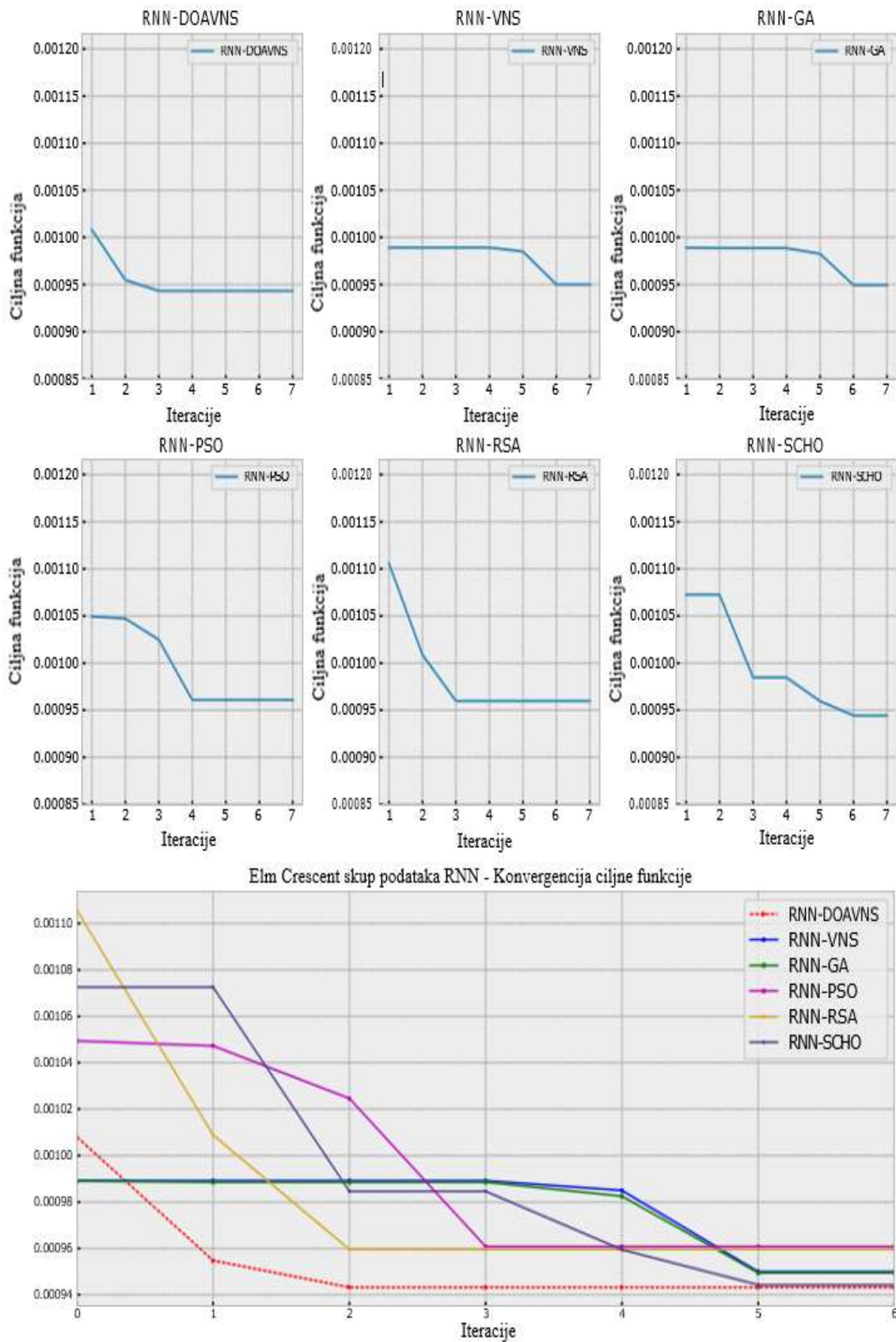


Slika 5.6. Diagrami distribucije funkcije indikatora simulacija Elm Crescent RNN.

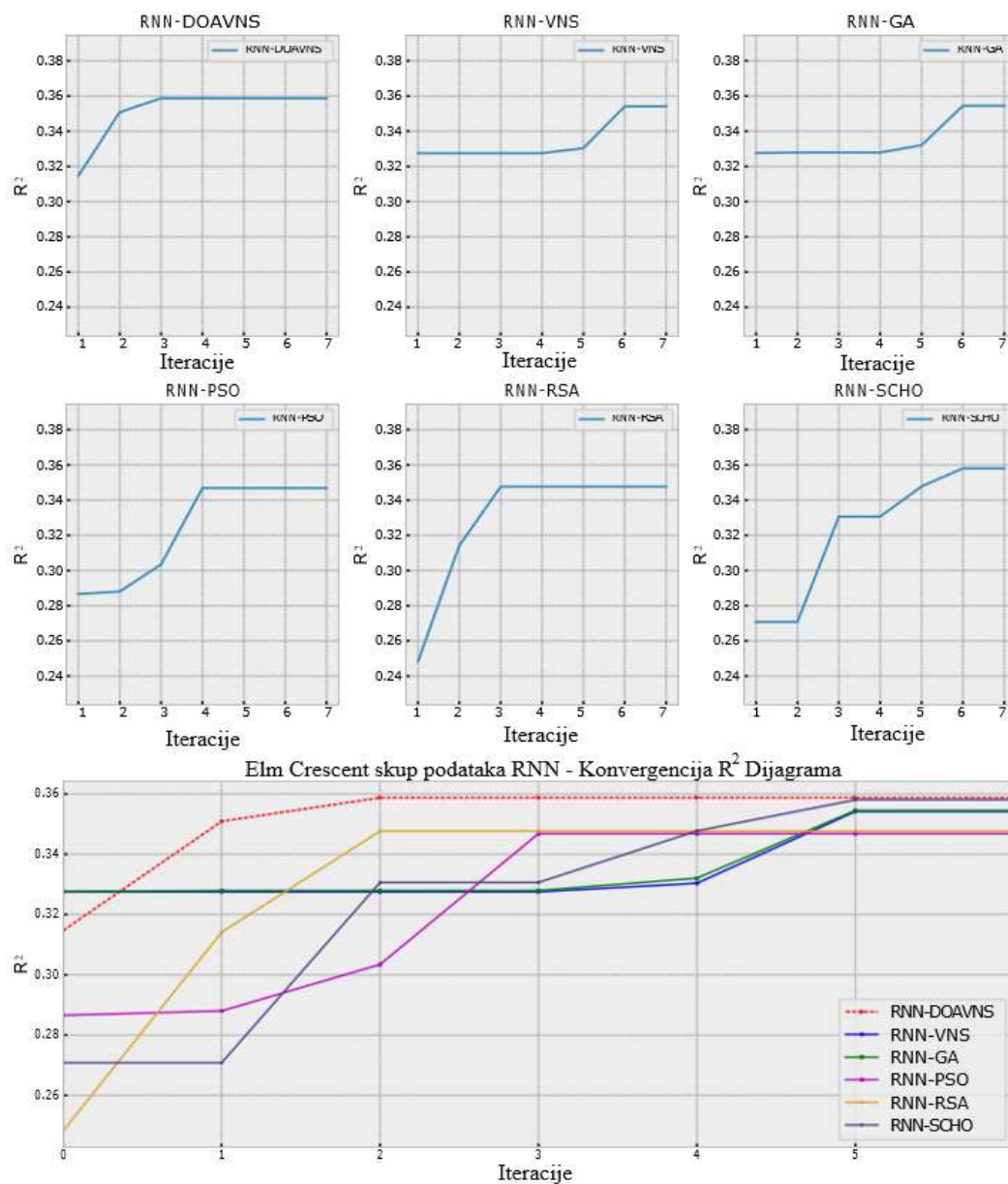
Izbor parametara napravljen od strane svakog algoritma za odgovarajući model sa najboljim učinkom dat je u tabeli 5.4. da bi se olakšala ponovljivost simulacije. Predviđanja modela sa najboljim performansama su data na slici 9, dok je dijagram greške tokom vremena predstavljen na slici 5.10.

Tabela 5.3. Detaljne metrike Elm Crescent RNN simulacija za optimizovane modele sa najboljim učinkom.

Method	R^2	MAE	MSE	RMSE	IoA
RNN-DOAVNS	0.358764	0.024683	0.000943	0.030712	0.732794
RNN-VNS	0.354170	0.024840	0.000950	0.030822	0.715560
RNN-GA	0.354504	0.024788	0.000949	0.030814	0.711936
RNN-PSO	0.346816	0.024590	0.000961	0.030997	0.742532
RNN-RSA	0.347640	0.024842	0.000960	0.030977	0.734755
RNN-SCHO	0.358032	0.024725	0.000944	0.030729	0.728545



Slika 5.7. Dijagrami konvergencije funkcije cilja Elm Crescent RNN simulacija.

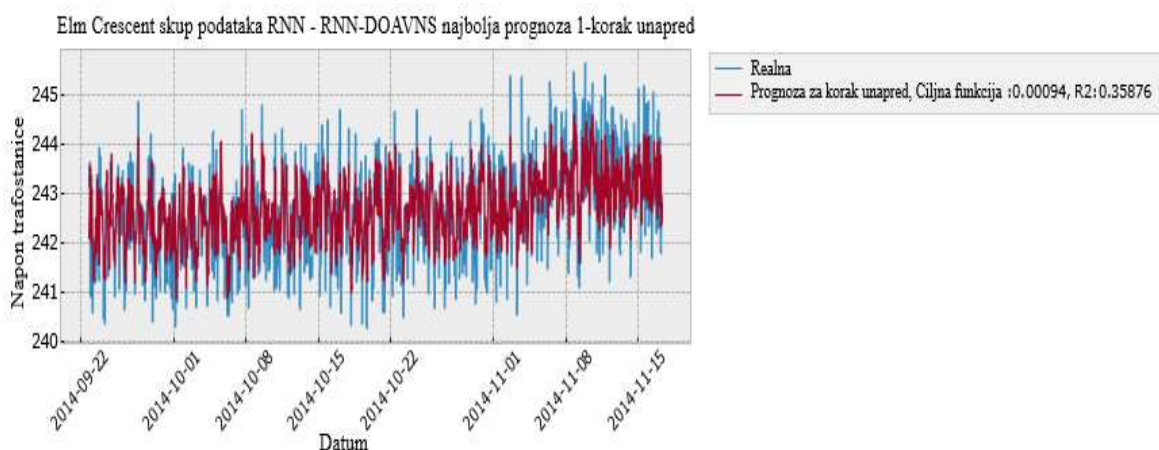


Slika 5.8. Diagrami konvergencije funkcije indikatora simulacija Elm Crescent RNN.

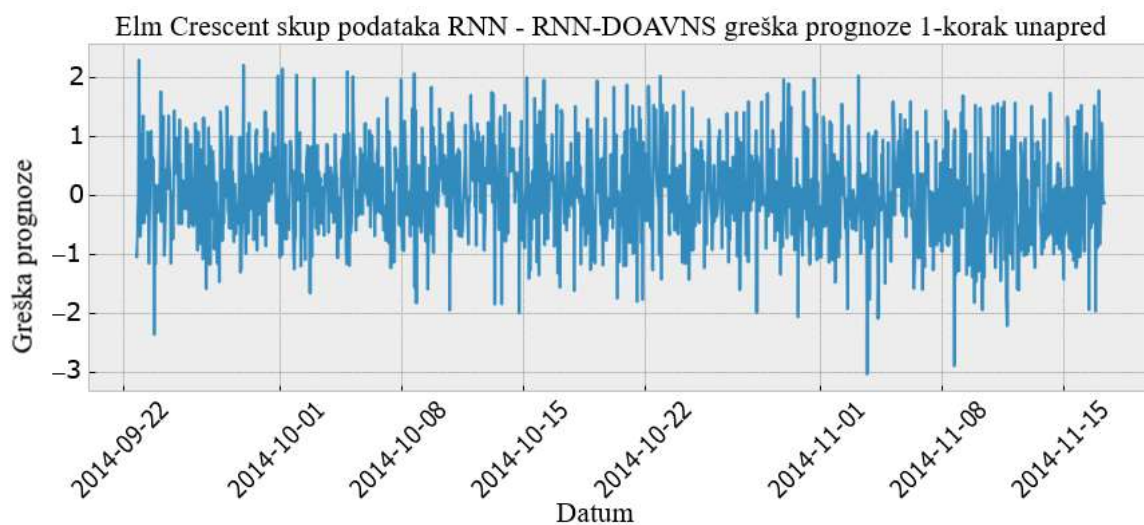
Tabela 5.4. Izbor parametara modela RNN sa najboljim učinkom za simulacije Elm Crescent.

Method	Learning Rate	Dropout	Training Epochs	RNN Layers	L1 Neurons	L2 Neurons	L3 Neurons	L4 Neurons
RNN-DOAVNS	9.70×10^{-3}	0.186	427	1	36	N/a	N/a	N/a
RNN-VNS	7.44×10^{-3}	0.139	551	1	23	N/a	N/a	N/a
RNN-GA	7.08×10^{-3}	0.05	586	1	18	N/a	N/a	N/a
RNN-PSO	6.52×10^{-3}	0.2	600	1	36	N/a	N/a	N/a

	10^{-3}							
RNN-RSA	$9.23 \times$	0.113	600	1	20	N/a	N/a	N/a
	10^{-3}							
RNN-SCHO	$9.66 \times$	0.2	536	1	36	N/a	N/a	N/a
	10^{-3}							



Slika 5.9. Prognoze najboljeg DOVNS modela iz Elm Crescent RNN simulacija.



Slika 5.10. Greška simulacije RNN-a Elm Crescent tokom vremena.

5.5.1.2. RNN Forest Road (Šumski put) Simulacije

Poređenja u smislu funkcije cilja za rezultate simulacije šumskog puta RNN prikazana su u tabeli 5. Uvedeni optimizator je postigao model sa najboljim učinkom, sa rezultatom funkcije cilja od 0,000943.

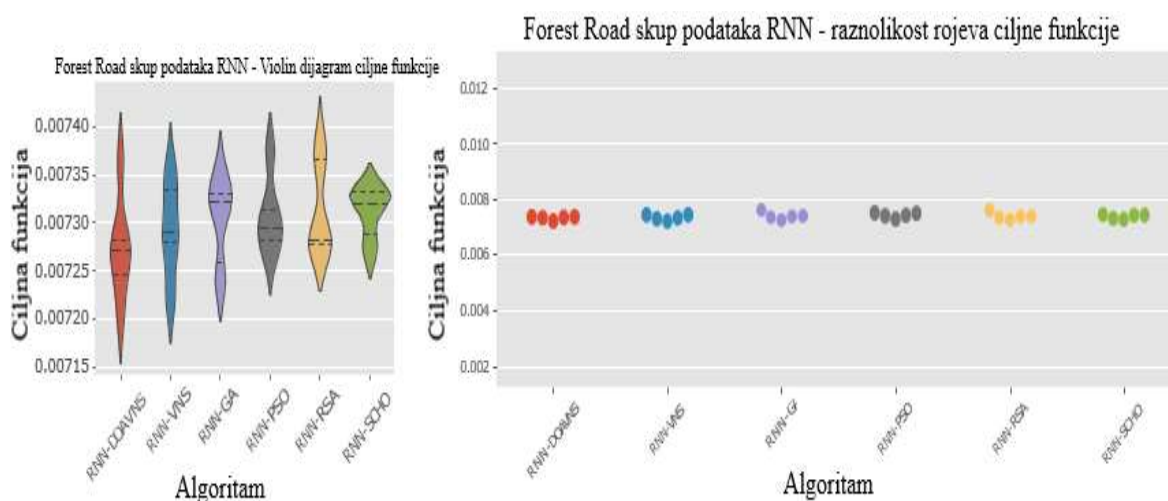
Uvedeni optimizator pokazuje superiorne performanse u srednjim rezultatima, sa

odgovarajućim rezultatima od 0,007275 i 0,007275. SCHO algoritam je postigao najbolje rezultate u pogledu simulacija najgoreg slučaja. Najveću stopu stabilnosti pokazuje SCHO.

Dalja poređenja stabilnosti su data u smislu dijagrama distribucije rezultata cilja i indikatora za funkciju cilja na slici 5.11. i funkciju indikatora na slici 5.12. Modifikovani algoritam pokazuje blago smanjenu stabilnost u ovom skupu simulacija, fokusirajući se na region koji više obećava u poređenju sa svim ostalim optimizatorima, kao i osnovnom PSO.

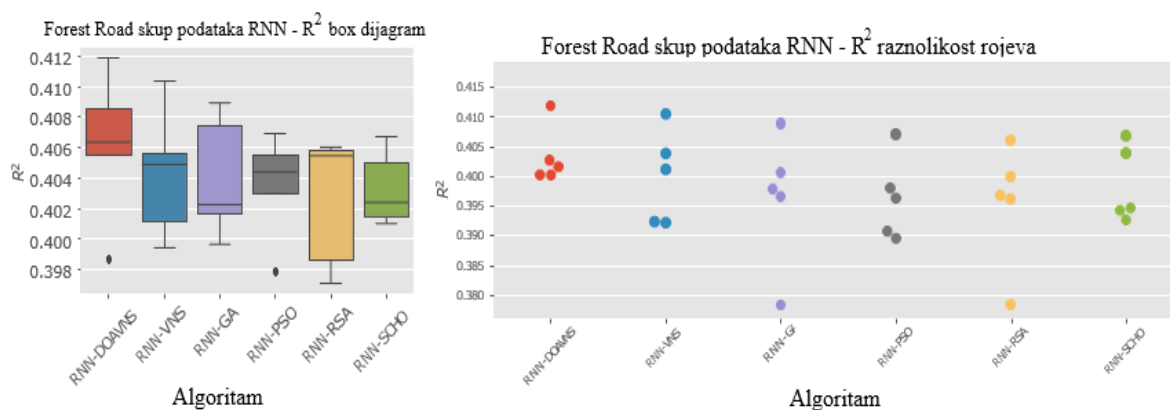
Tabela 5.5. Ishodi funkcije cilja RNN simulacija šumskog puta.

Method	Best	Worst	Mean	Median	Std	Var
RNN-DOAVNS	0.007205	0.007366	0.007275	0.007275	4.86×10^{-5}	2.36×10^{-9}
RNN-VNS	0.007223	0.007357	0.007293	0.007290	4.70×10^{-5}	2.20×10^{-9}
RNN-GA	0.007241	0.007354	0.007307	0.007322	4.15×10^{-5}	1.72×10^{-9}
RNN-PSO	0.007265	0.007376	0.007308	0.007296	3.74×10^{-5}	1.40×10^{-9}
RNN-RSA	0.007276	0.007385	0.007314	0.007283	4.59×10^{-5}	2.11×10^{-9}
RNN-SCHO	0.007267	0.007337	0.007313	0.007320	2.50×10^{-5}	6.23×10^{-10}



Slika 5.11. Dijagrami distribucije funkcije cilja RNN simulacija šumskog puta.

Dalja poređenja u pogledu detaljnih metrika data su u tabeli 5.6. Model optimizovan uvedenim DOAVNS optimizatorom pokazuje najbolje rezultate u smislu R2, MSE i RMSE, dok GA pokazuje visok rezultat u smislu MAE i SCHO prikazuje najbolji IoA rezultat.



Slika 5.12. Dijagrami distribucije funkcije indikatora simulacija šumskog puta RNN.

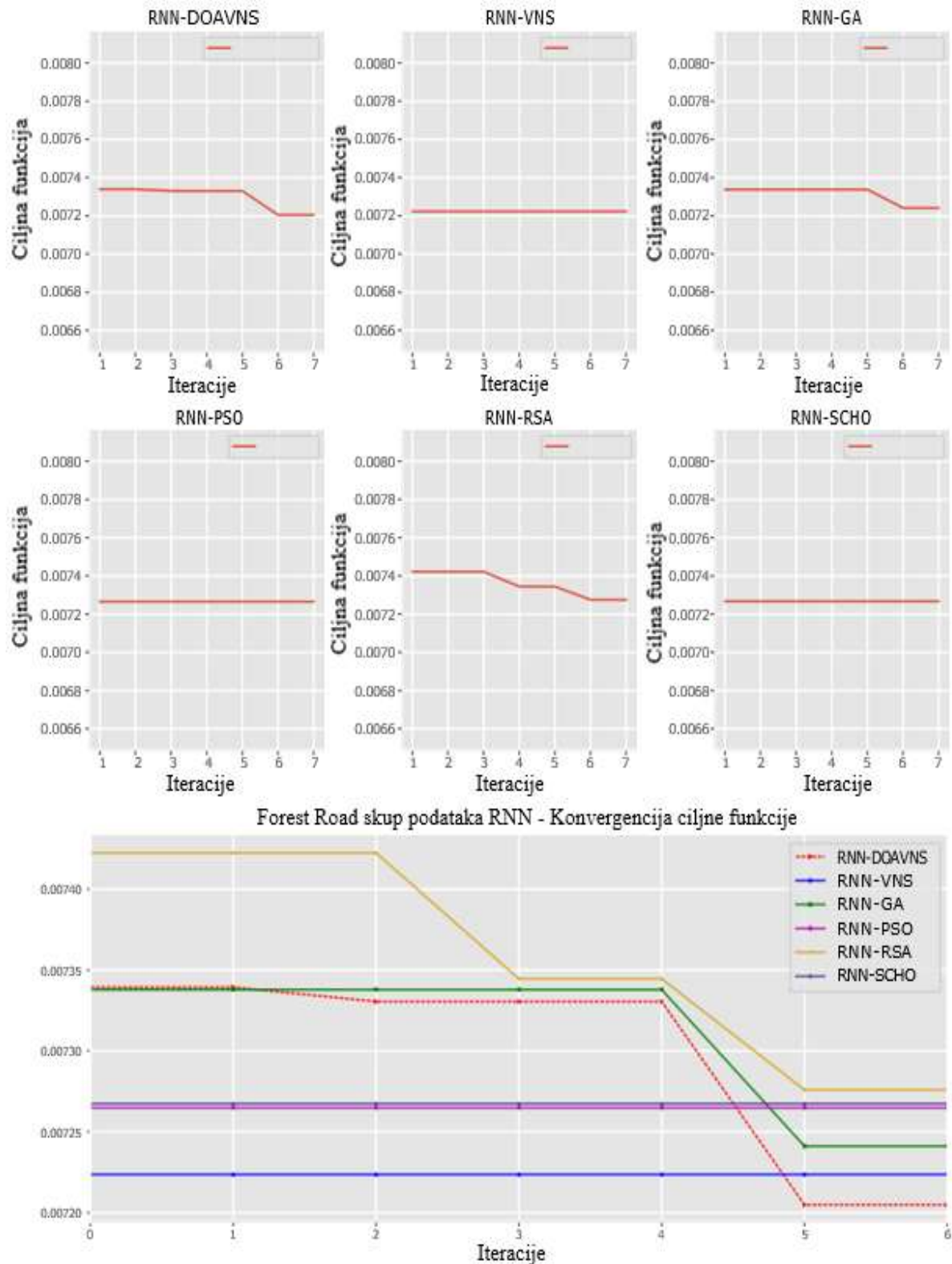
Tabela 5.6. Detaljne metrike RNN simulacija šumskog puta za optimizovane modele sa najboljim učinkom.

Method	R ²	MAE	MSE	RMSE	IoA
RNN-DOAVNS	0.411854	0.067344	0.007205	0.084881	0.758396
RNN-VNS	0.410324	0.067163	0.007223	0.084991	0.757463
RNN-GA	0.408894	0.067151	0.007241	0.085094	0.760513
RNN-PSO	0.406952	0.068032	0.007265	0.085234	0.750386
RNN-RSA	0.406050	0.067403	0.007276	0.085299	0.756161
RNN-SCHO	0.406745	0.067264	0.007267	0.085249	0.759018

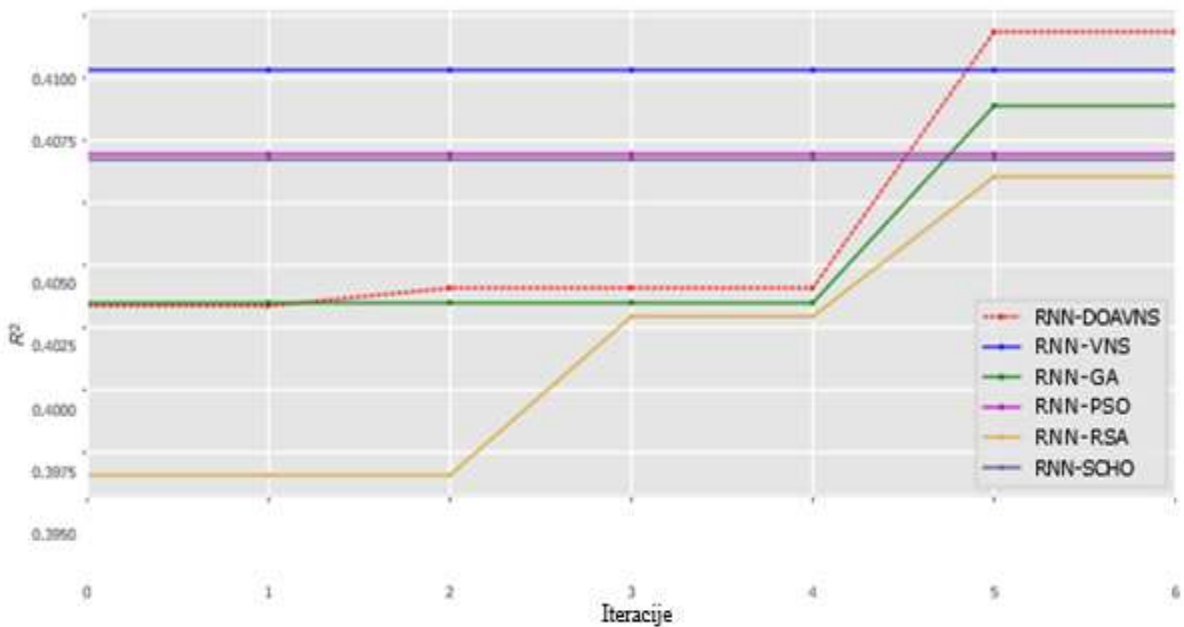
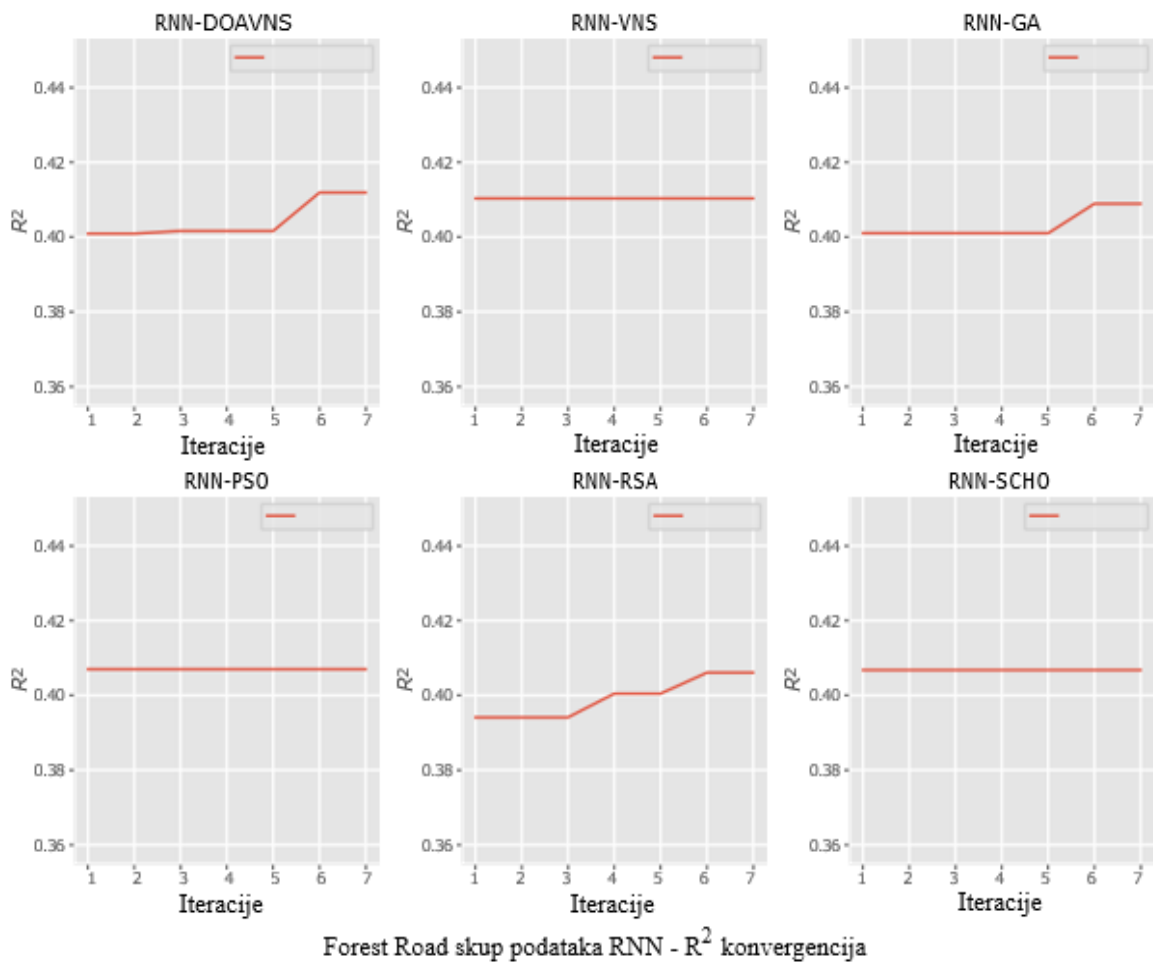
Dijagrami konvergencije za svaki optimizator su dati na slikama 5.13 i 5.14 za rezultate ciljeva i indikatora. Uvedeni optimizator prevazilazi lokalni optimum i konvergira ka boljem rešenju u petoj iteraciji, nadmašujući konkurentske optimizatore.

Izbor parametara napravljen od strane svakog algoritma za odgovarajući model sa najboljim učinkom dat je u tabeli 5.7. da bi se olakšala ponovljivost simulacije.

Predviđanja napravljena od strane modela sa najboljim performansama su data na slici 5.15, dok je dijagram greške tokom vremena prikazan na slici 5.16.



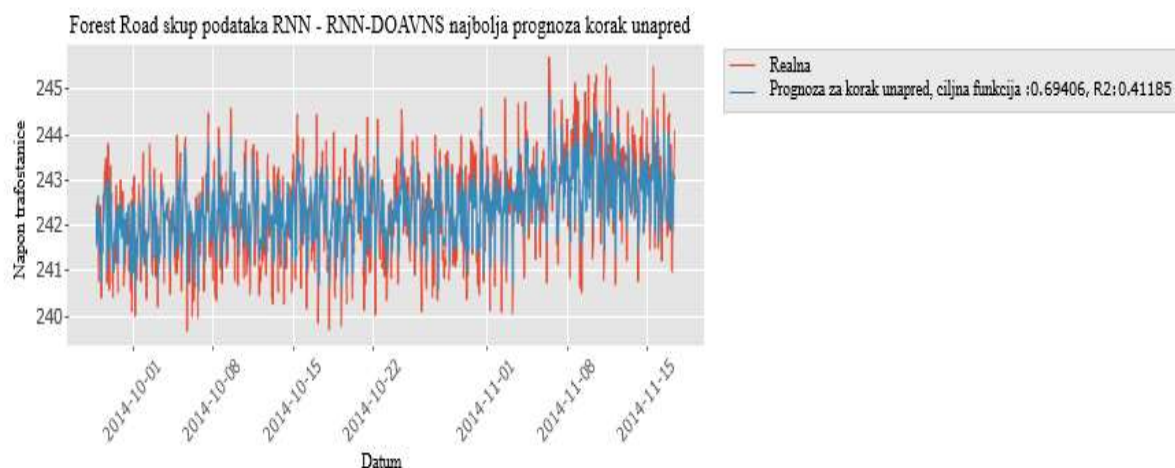
Slika 5.13. Dijagrami konvergencije funkcije cilja RNN simulacija Forest Road - šumskog puta.



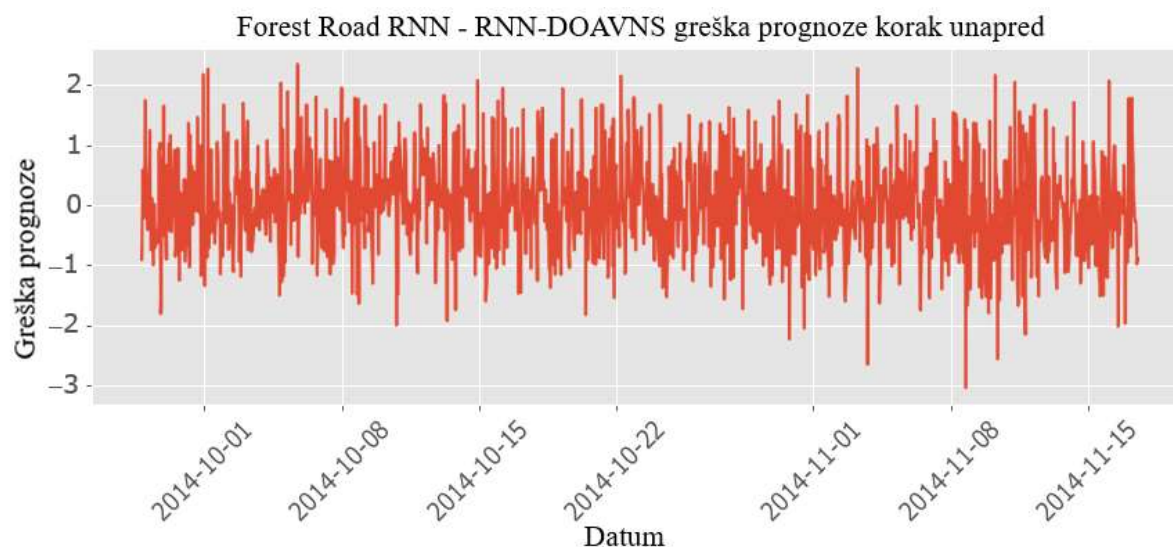
Slika 5.14. Dijagrami konvergencije funkcije indikatora simulacija šumskog puta RNN.

Tabela 5.7. Izbor parametara modela RNN sa najboljim učinkom za simulacije šumskog puta.

Method	Learning Rate	Dropout	Training Epochs	RNN Layers	L1 Neurons	L2 Neurons	L3 Neurons	L4 Neurons
RNN-	0.1	0.103	521	3	22	32	36	N/a
RNN-VNS0.01		0.052	555	1	21	N/a	N/a	N/a
RNN-GA	5.16×10^{-3}	0.186	541	3	36	34	31	N/a
RNN-PSO	5.48×10^{-3}	0.083	349	3	16	24	27	N/a
RNN-RSA	7.77×10^{-3}	0.094	308	1	36	N/a	N/a	N/a
RNN-SCHO	4.67×10^{-3}	0.133	535	4	18	18	34	14



Slika 5.15. Prognoze najboljeg DOAVNS modela iz Forest Road RNN simulacija.



Slika 5.16. Greška RNN simulacije šumskog puta tokom vremena.

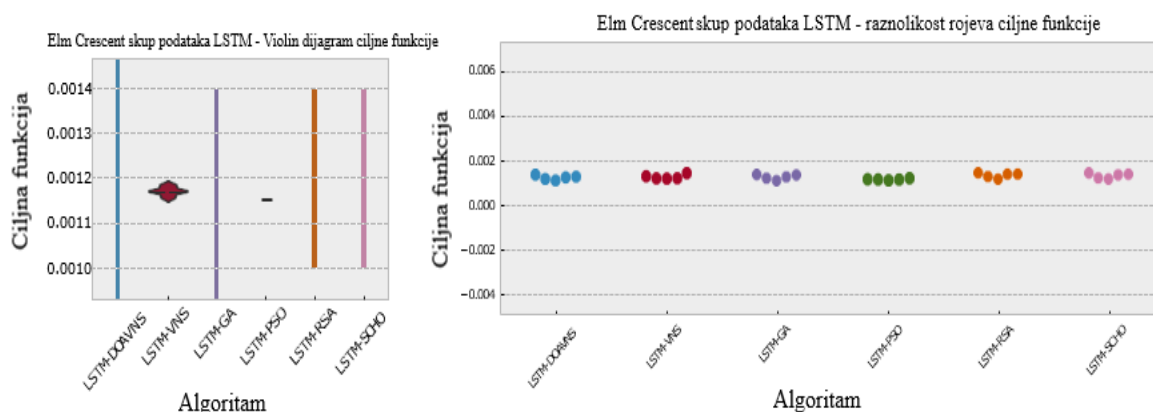
5.5.2.LSTM Simulacije

5.5.2.1. LSTM Elm Crescent Simulacije

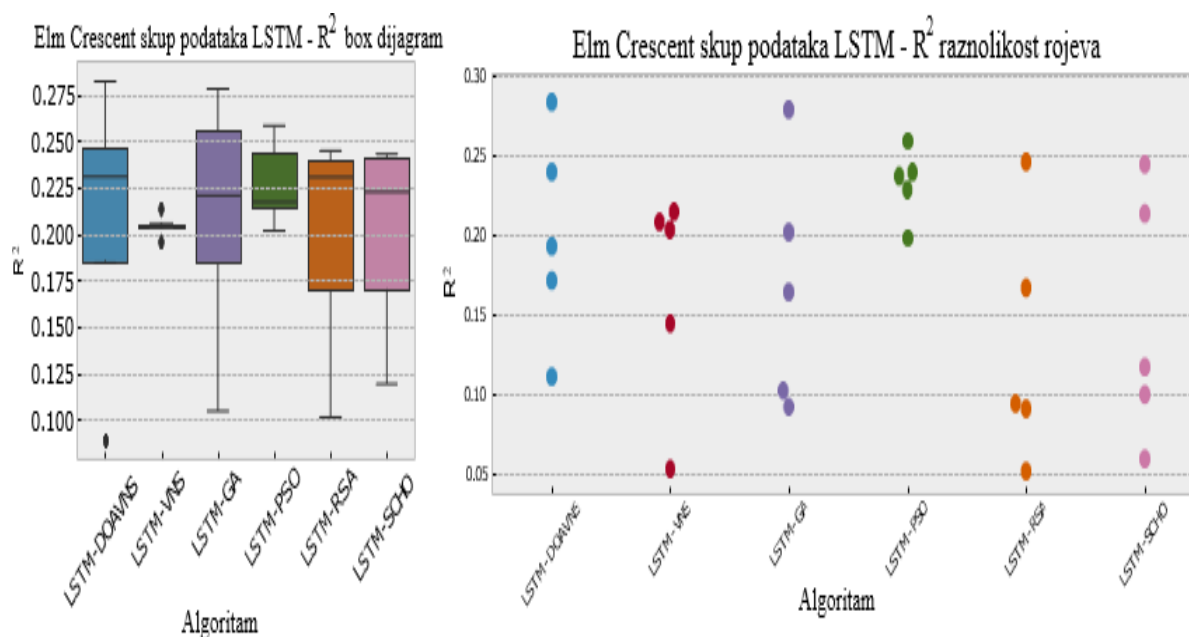
Poređenja u smislu funkcije cilja za rezultate simulacije Elm Crescent LSTM su predstavljena u tabeli 8. Uvedeni optimizator je postigao model sa najboljim performansama, sa rezultatom funkcije cilja od 0,001054. PSO optimizator pokazuje pristojne rezultate za najgore i srednje rezultate; međutim, uvedeni optimizator pokazuje najviše srednje rezultate. VNS pokazuje najveću stopu stabilnosti u poređenju sa drugim optimizatorima uključenim u uporedne simulacije. Dalja poređenja stabilnosti su data u smislu dijagrama distribucije ciljeva i rezultata indikatora za funkciju cilja na slici 17 i funkciju indikatora na slici 18. Primetan pad stabilnosti može se primetiti za uvedeni optimizator. Ovo je donekle očekivano sa sve većom diverzifikacijom. Međutim, uvedene modifikacije pomažu u poboljšanju performansi, omogućavajući uvedenom modifikovanom algoritmu da locira region koji najviše obećava i postigne najviše objektivne rezultate.

Tabela 8. Rezultati funkcije cilja Elm Crescent LSTM simulacija.

Method	Best	Worst	Mean	Median	Std	Var
LSTM-DOAVNS	0.001054	0.001340	0.001181	0.001131	9.84×10^{-5}	9.68×10^{-9}
LSTM-VNS	0.001157	0.001184	0.001171	0.001171	8.92×10^{-6}	7.96×10^{-11}
LSTM-GA	0.001062	0.001317	0.001165	0.001146	7.73×10^{-5}	5.97×10^{-9}
LSTM-PSO	0.001091	0.001174	0.001136	0.001151	2.96×10^{-5}	8.78×10^{-10}
LSTM-RSA	0.001111	0.001322	0.001174	0.001132	7.25×10^{-5}	5.25×10^{-9}
LSTM-SCHO	0.001113	0.001295	0.001177	0.001143	7.10×10^{-5}	5.04×10^{-9}



Slika 5.17. Dijagrami distribucije funkcije cilja Elm Crescent LSTM simulacija.



Slika 5.18. Diagrami distribucije funkcije indikatora simulacija Elm Crescent LSTM.

Dalja poređenja u pogledu detaljnih metrika data su u tabeli 9. Model optimizovan uvedenim DOAVNS optimizatorom prikazuje najbolje rezultate u pogledu svih metrika osim IoA, gde GA pokazuje najviši rezultat.

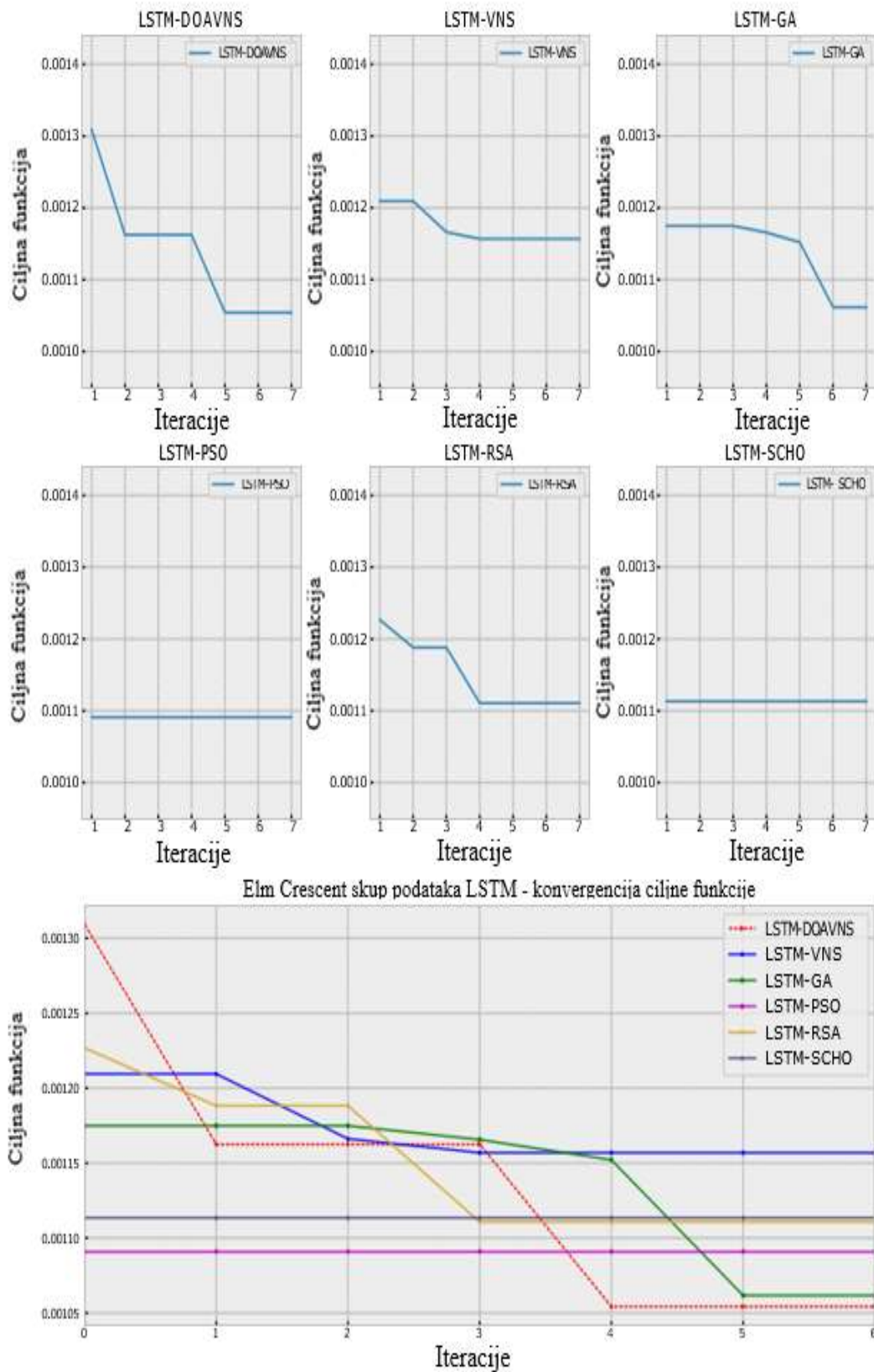
Tabela 5.9. Detaljne metrike Elm Crescent LSTM simulacija za optimizovane modele sa najboljim učinkom.

Method	R ²	MAE	MSE	RMSE	IoA
LSTM-DOAVNS	0.283279	0.026561	0.001054	0.032469	0.627262
LSTM-VNS	0.213508	0.027945	0.001157	0.034013	0.588553
LSTM-GA	0.278216	0.026651	0.001062	0.032584	0.653422
LSTM-PSO	0.258380	0.027084	0.001091	0.033028	0.644435
LSTM-RSA	0.244873	0.027386	0.001111	0.033328	0.599909
LSTM-SCHO	0.243068	0.027403	0.001113	0.033368	0.612395

Dijagrami konvergencije za svaki optimizator su dati na slikama 5.19 i 5.20 za rezultate objektivna i indikatora.

Uvedeni optimizator prevazilazi lokalni optimum i konvergira ka boljem rešenju u četvrtoj iteraciji, nadmašujući konkurentske optimizatore.

Izbor parametara napravljen od strane svakog algoritma za odgovarajući model sa najboljim učinkom dat je u tabeli 5.10. da bi se olakšala ponovljivost simulacije. Predviđanja napravljena od strane modela sa najboljim performansama su data na slici 5.21, dok je dijagram koji prikazuje grešku tokom vremena prikazan na slici 5.22.



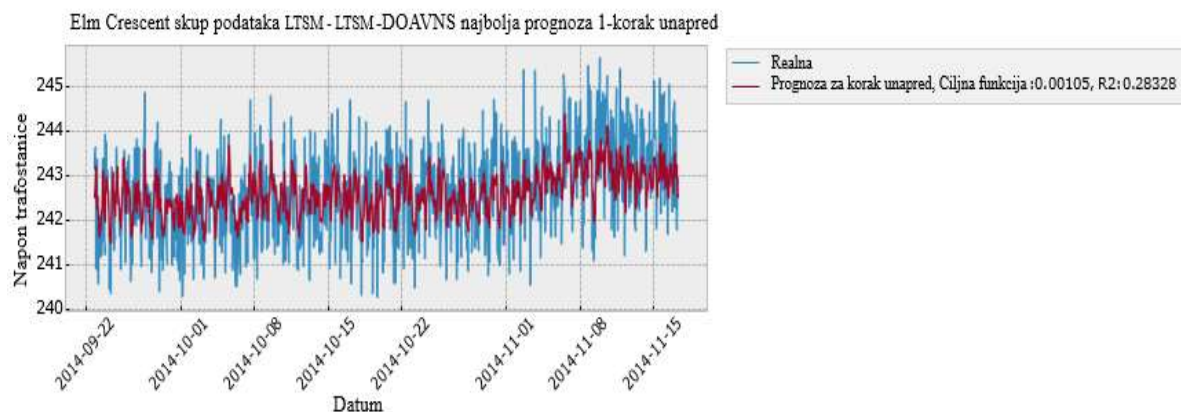
Slika 5.19. Diagrami konvergencije funkcije cilja Elm Crescent LSTM simulacija.



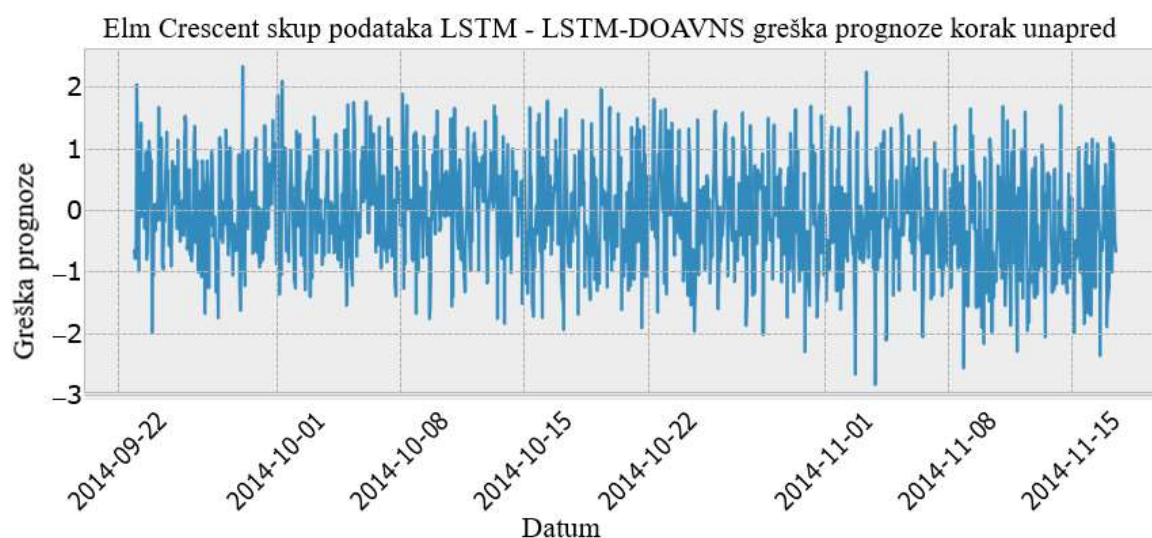
Slika 5.20. Diagrami konvergencije funkcije indikatora Elm Crescent LSTM simulacija.

Tabela 5.10. Izbor parametara LSTM modela sa najboljim učinkom za simulacije Elm Crescent.

Method	Learning Rate	Dropout	Training Epochs	LSTM Layers	L1 Neurons	L2 Neurons	L3 Neurons	L4 Neurons
LSTM-DOAVNS	1.00×10^{-2}	0.05	600	1	36	N/a	N/a	N/a
LSTM-VNS	5.16×10^{-3}	0.081	445	1	31	N/a	N/a	N/a
LSTM-GA	6.92×10^{-3}	0.136	600	1	25	N/a	N/a	N/a
LSTM-PSO	1.00×10^{-2}	0.2	600	1	16	N/a	N/a	N/a
LSTM-RSA	7.84×10^{-3}	0.058	600	1	33	N/a	N/a	N/a
LSTM-SCHO	5.19×10^{-3}	0.097	598	1	35	N/a	N/a	N/a



Slika 5.21. Prognoze najboljeg DOAVNS modela iz Elm Crescent LSTM simulacija.



Slika 5.22. Greška simulacije Elm Crescent LSTM tokom vremena.

5.5.2.2. LSTM Forest Road Simulacije

Poređenja u smislu funkcije cilja za rezultate simulacije Forest Road LSTM su predstavljena u tabeli 11. Uvedeni optimizator je postigao model sa najboljim učinkom, sa rezultatom funkcije cilja od 0,007066.

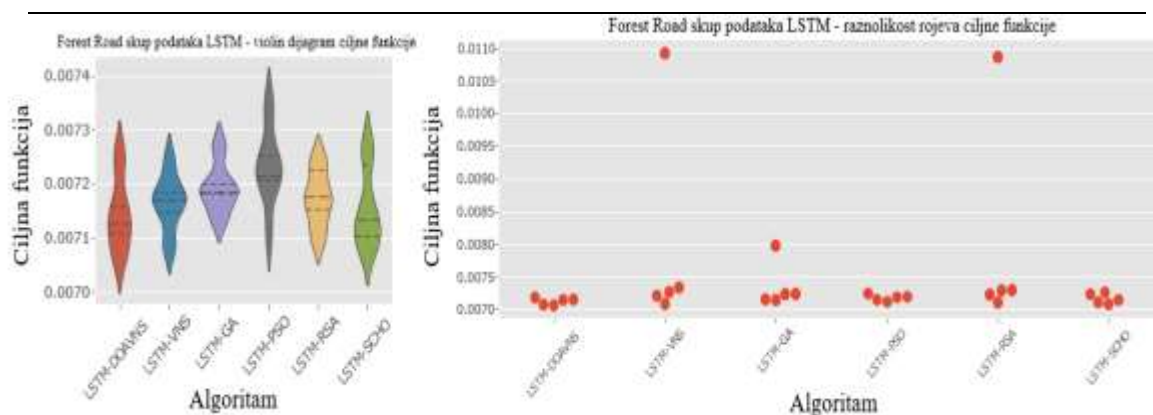
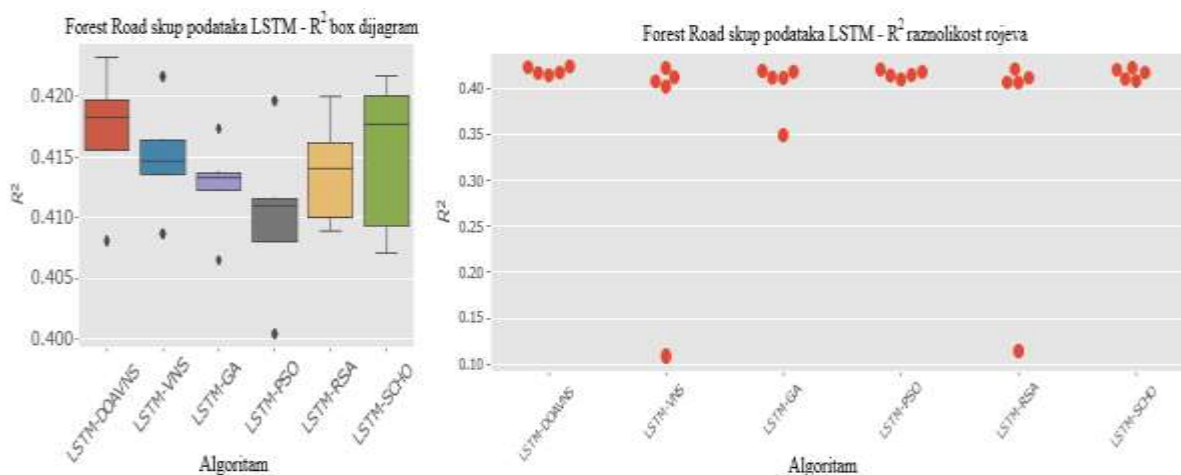
Optimizator takođe ima visoke rezultate u smislu srednje vrednosti i medijane. Međutim, RSA postiže najbolji ishod u najgorem slučaju simulacije. GA pokazuje najvišu ocenu stabilnosti. Dalja poređenja stabilnosti su data u smislu dijagrama distribucije cilja i rezultata indikatora za funkciju cilja na slici 5.23 i funkciju indikatora na slici 5.24.

Za uvedeni optimizator se može primetiti blagi pad stabilnosti. Ovo je donekle očekivano sa sve većom diverzifikacijom.

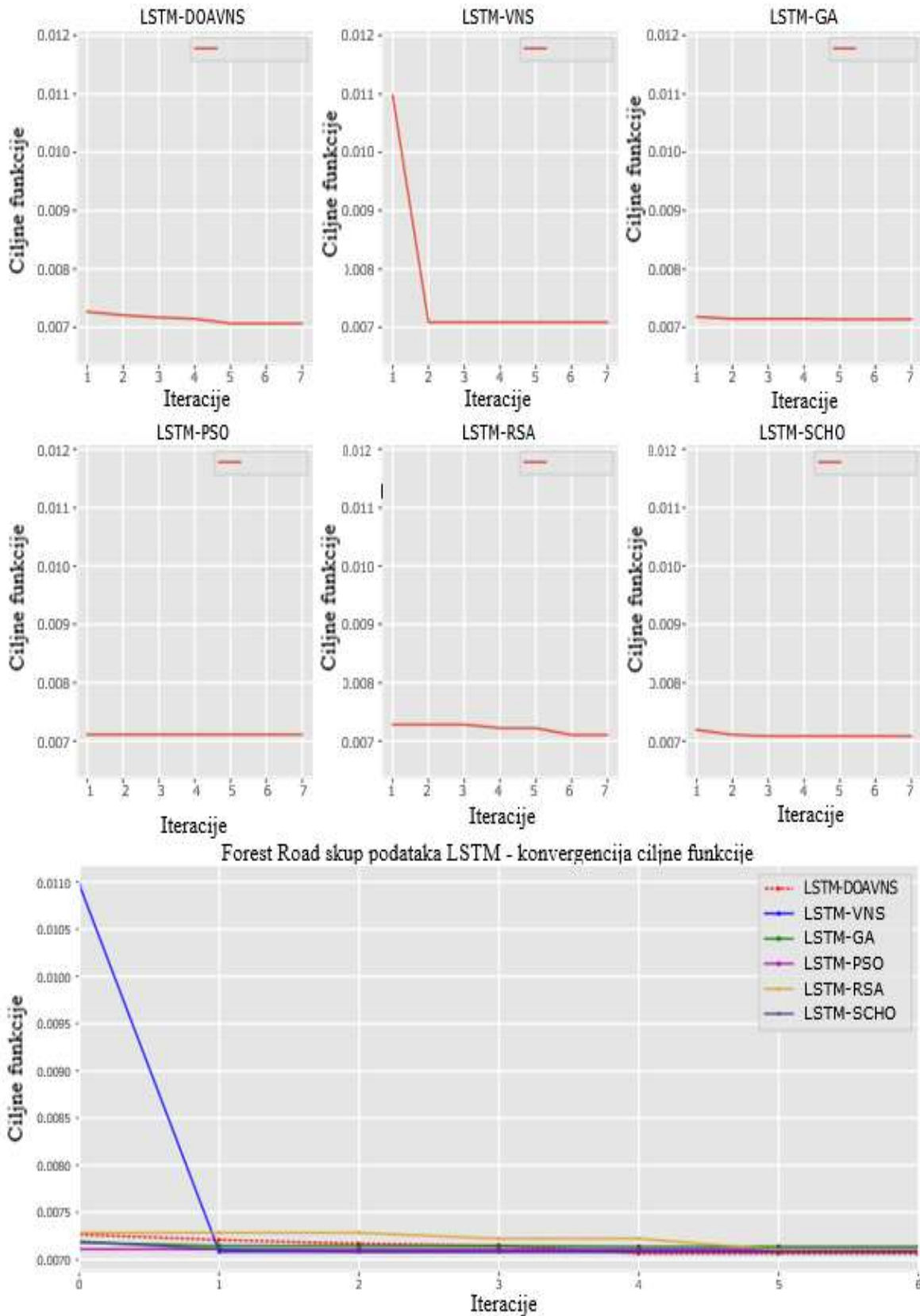
Ipak, ove modifikacije takođe omogućavaju optimizatoru da izbegne lokalne optimume, postižući sveukupno bolje rezultate u poređenju sa drugim testiranim algoritmima.

Tabela 5.11. Ishodi funkcije cilja simulacije šumskog puta LSTM.

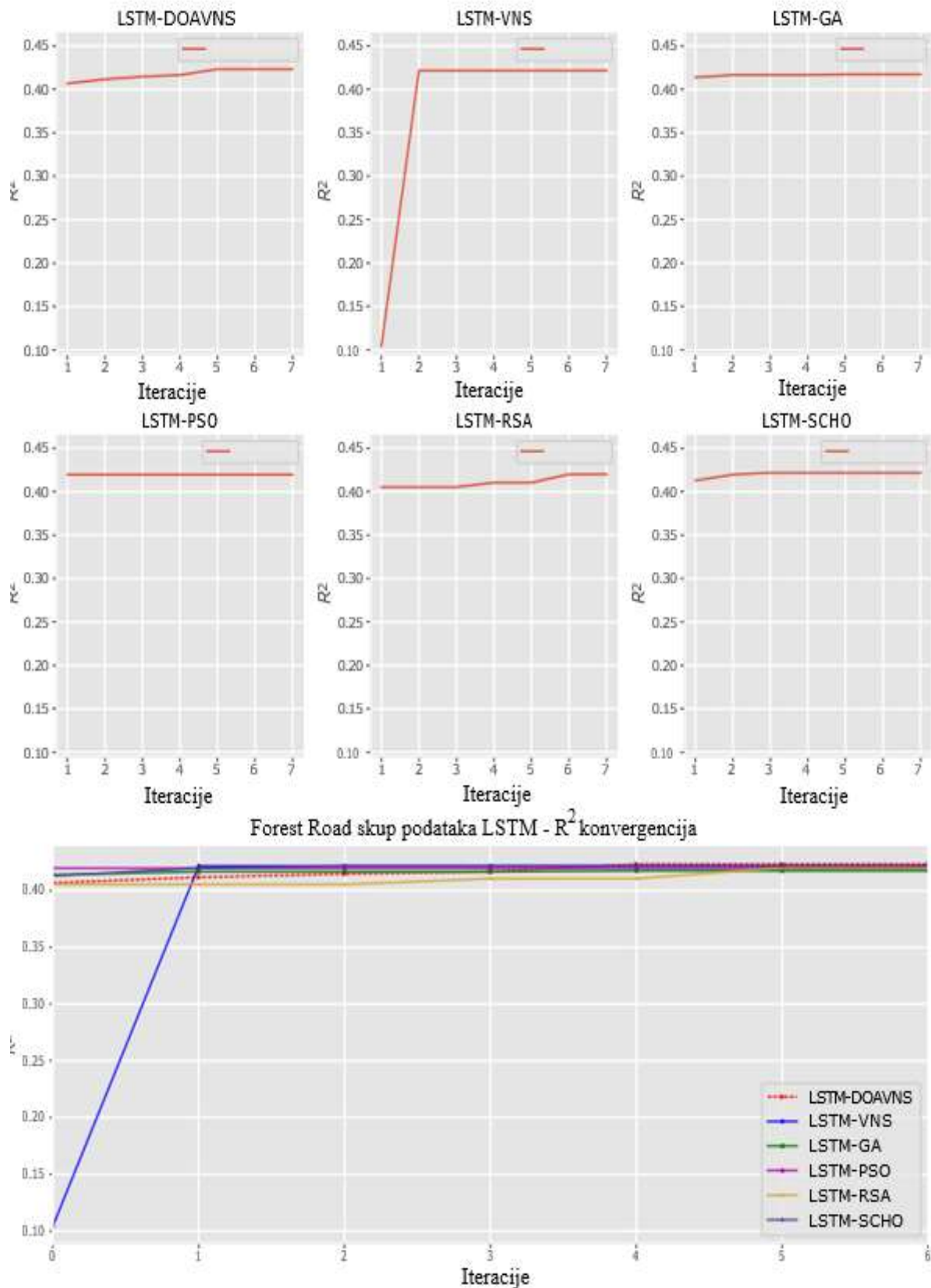
Method	Best	Worst	Mean	Median	Std	Var
LSTM-DOAVNS	0.007066	0.007250	0.007145	0.007127	6.58×10^{-5}	4.33×10^{-9}
LSTM-VNS	0.007085	0.007243	0.007166	0.007171	4.94×10^{-5}	2.44×10^{-9}
LSTM-GA	0.007138	0.007270	0.007193	0.007187	4.41×10^{-5}	1.94×10^{-9}
LSTM-PSO	0.007110	0.007344	0.007234	0.007215	6.90×10^{-5}	4.76×10^{-9}
LSTM-RSA	0.007104	0.007241	0.007174	0.007178	4.91×10^{-5}	2.41×10^{-9}
LSTM-SCHO	0.007084	0.007263	0.007155	0.007134	6.91×10^{-5}	4.77×10^{-9}

**Slika 5.23.** Dijagrami distribucije funkcije cilja Forest Road LSTM simulacija.**Slika 5.24.** Dijagrami distribucije funkcije indikatora Forest Road LSTM simulations'.

Dalja poređenja u pogledu detaljnih metrika data su u tabeli 12. Model optimizovan uvedenim DOAVNS optimizatorom pokazuje najbolje rezultate u pogledu svih metrika u sprovedenim testovima.



Slika 5.25. Dijagrami konvergencije funkcije cilja Forest Road LSTM simulacija.



Slika 5.26. Dijagrami konvergencije funkcije indikatora Forest Road LSTM simulacija.

Tabela 5.12. Detaljne metrike Forest Road LSTM simulacije za optimizovane modele sa najboljim učinkom.

Method	R ²	MAE	MSE	RMSE	IoA
LSTM-DOAVNS	0.423220	0.066313	0.007066	0.084057	0.777800
LSTM-VNS	0.421609	0.066415	0.007085	0.084174	0.779413
LSTM-GA	0.417343	0.066647	0.007138	0.084484	0.770246
LSTM-PSO	0.419611	0.066517	0.007110	0.084319	0.772205
LSTM-RSA	0.420049	0.066523	0.007104	0.084287	0.768804
LSTM-SCHO	0.421743	0.066467	0.007084	0.084164	0.786252

Dijagrami konvergencije za svaki optimizator su dati na slikama 5.25 i 5.26 za rezultate ciljeva i indikatora.

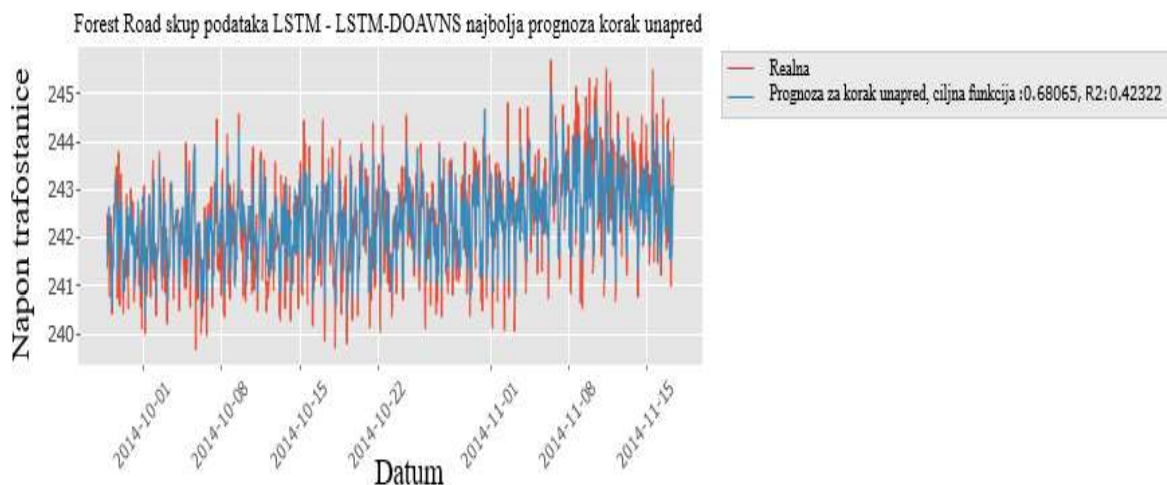
Uvedeni optimizator prevazilazi lokalni optimum i konvergira ka boljem rešenju, nadmašujući sve poznate koruščene konkurentske optimizatore u ovokvim tehnološkim procesima.

Izbor parametara napravljen od strane svakog algoritma za odgovarajući model sa najboljim učinkom dat je u dole prikazanoj tabeli 5.13, da bi se olakšala ponovljivost simulacije.

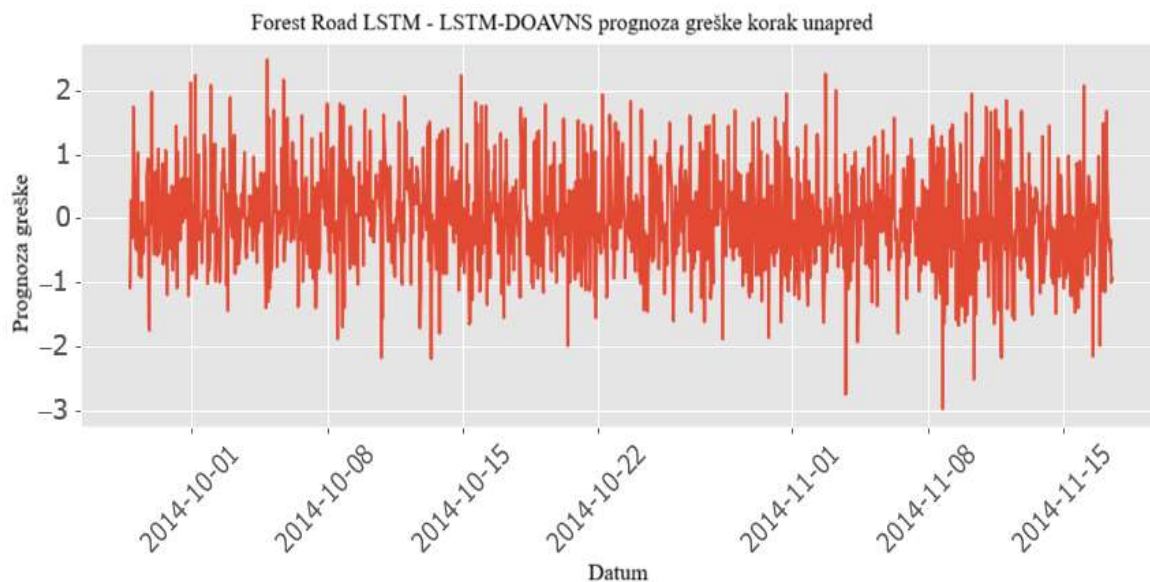
Predviđanja modela sa najboljim performansama su data na slici 5.27, dok slika 5.28 pruža uvid u grešku tokom vremena.

Tabela 5.13. Izbor parametara LSTM modela sa najboljim učinkom za simulacije šumskog puta.

Method	Learning Rate	Dropout	Training Epochs	LSTM Layers	L1 Neurons	L2 Neurons	L3 Neurons	L4 Neurons
LSTM-DOAVNS	6.45×10^{-3}	0.062	599	3	21	27	26	N/a
LSTM-VNS	1.00×10^{-2}	0.2	600	3	36	12	30	N/a
LSTM-GA	8.96×10^{-3}	0.05	600	2	35	13	N/a	N/a
LSTM-PSO	8.73×10^{-3}	0.094	442	2	36	19	N/a	N/a
LSTM-RSA	8.47×10^{-3}	0.198	509	2	20	14	N/a	N/a
LSTM-SCHO	1.00×10^{-2}	0.135	600	2	36	29	N/a	N/a



Slika 5.27. Prognoze najboljeg DOAVNS modela iz Forest Road LSTM simulacija.



Slika 5.28. Greška simulacije šumskog puta LSTM tokom vremena.

5.5.3. GRU Simulacije

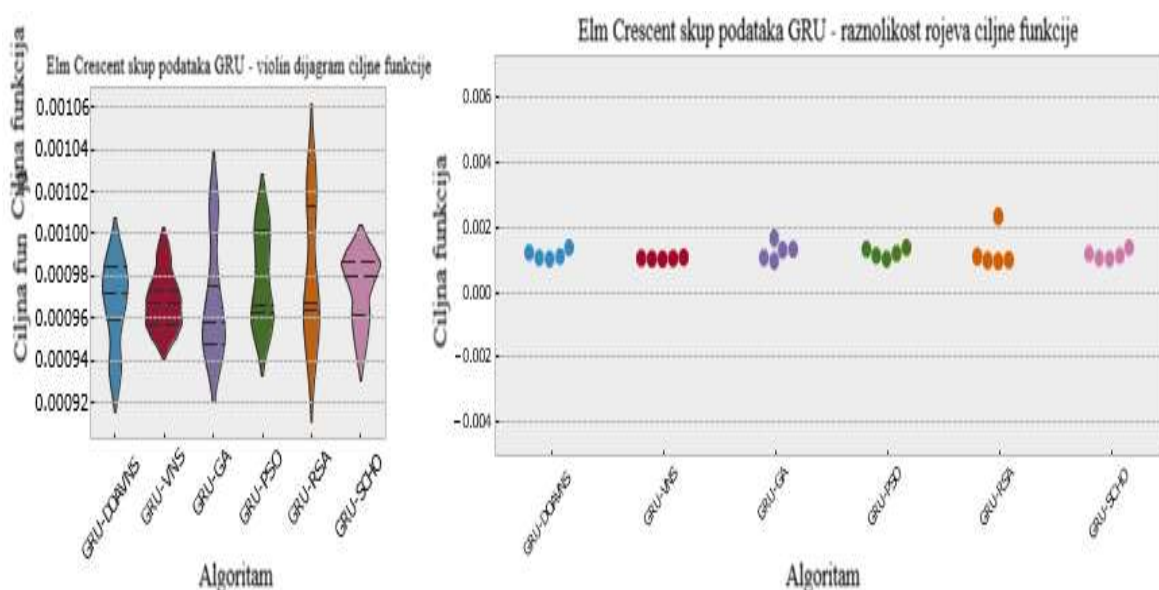
5.5.3.1. GRU Elm Crescent Simulacije

Poređenja u smislu funkcije cilja za rezultate simulacije Elm Crescent GRU prikazana su u tabeli 14. Uvedeni optimizator je postigao model sa najboljim učinkom, postigavši rezultat funkcije cilja od 0,000935, kao i najbolje rezultate u najgorem slučaju i srednje vrednosti. Međutim, najbolji srednji učinak ide u GA. Stope stabilnosti se

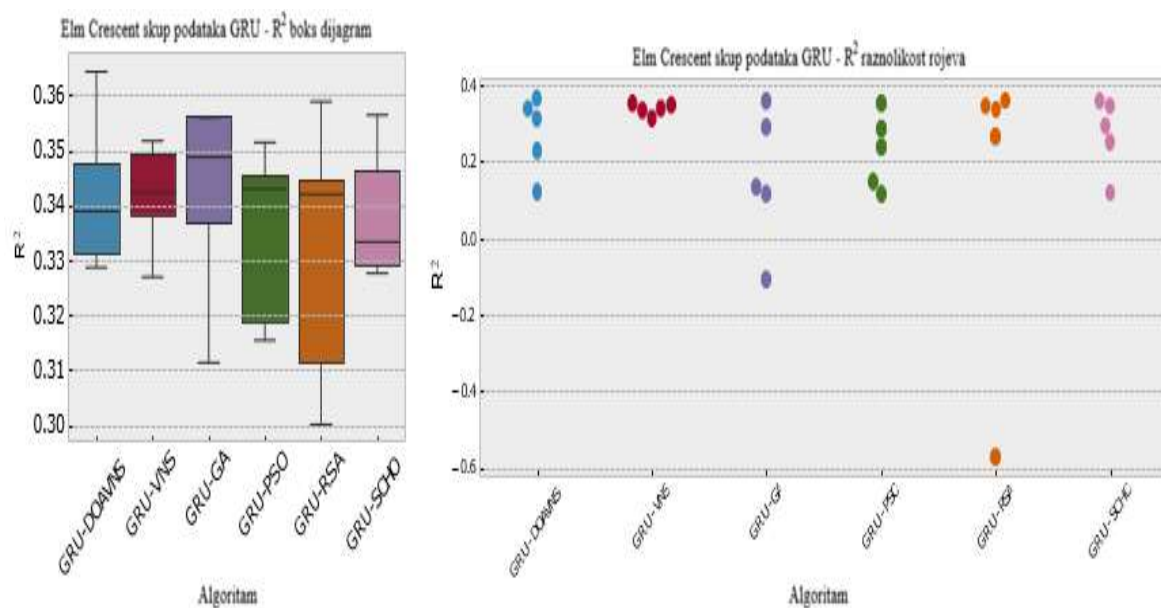
najbolje održavaju pomoću VNA algoritma, uprkos tome što modeli ne postižu visoke rezultate u drugim metrikama. Dalja poređenja stabilnosti su data u smislu dijagrama distribucije cilja i rezultata indikatora za funkciju cilja na slici 5.29 i funkciju indikatora na slici 5.30. Primetan pad stabilnosti može se primetiti za uvedeni optimizator. Međutim, kao što je ranije rečeno, ovaj pad se može pripisati povećanju diversifikacije.

Tabela 5.14. Ishodi funkcije cilja simulacije Elm Crescent GRU

Method	Best	Worst	Mean	Median	Std	Var
GRU-DOAVNS	0.000935	0.000987	0.000966	0.000972	1.93×10^{-5}	3.71×10^{-10}
GRU-VNS	0.000953	0.000990	0.000967	0.000967	1.24×10^{-5}	1.53×10^{-10}
GRU-GA	0.000947	0.001013	0.000969	0.000958	2.59×10^{-5}	6.71×10^{-10}
GRU-PSO	0.000954	0.001007	0.000978	0.000966	2.09×10^{-5}	4.37×10^{-10}
GRU-RSA	0.000943	0.001029	0.000981	0.000968	3.14×10^{-5}	9.85×10^{-10}
GRU-SCHO	0.000946	0.000989	0.000975	0.000980	1.51×10^{-5}	2.28×10^{-10}



Slika 5.29. Dijagrami distribucije funkcije cilja Elm Crescent GRU simulacija.



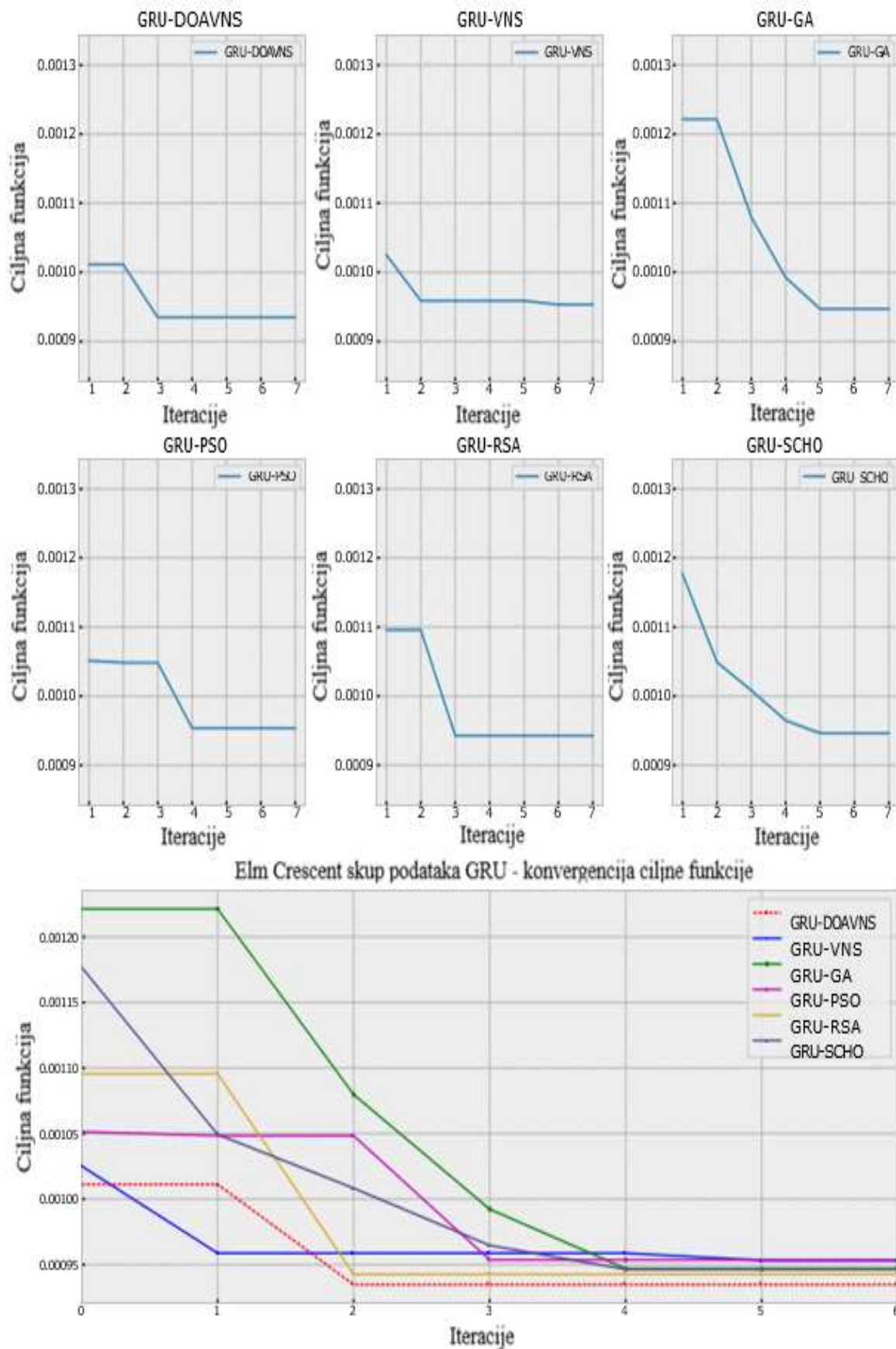
Slika 5.30. Dijagrami distribucije funkcije indikatora simulacija Elm Crescent GRU.

Dalja poređenja u pogledu detaljnih metrika su data u tabeli 15. Model optimizovan od strane uvedenog DOAVNS optimizatora pokazuje najbolje rezultate u pogledu svih metrika u sprovedenim testovima.

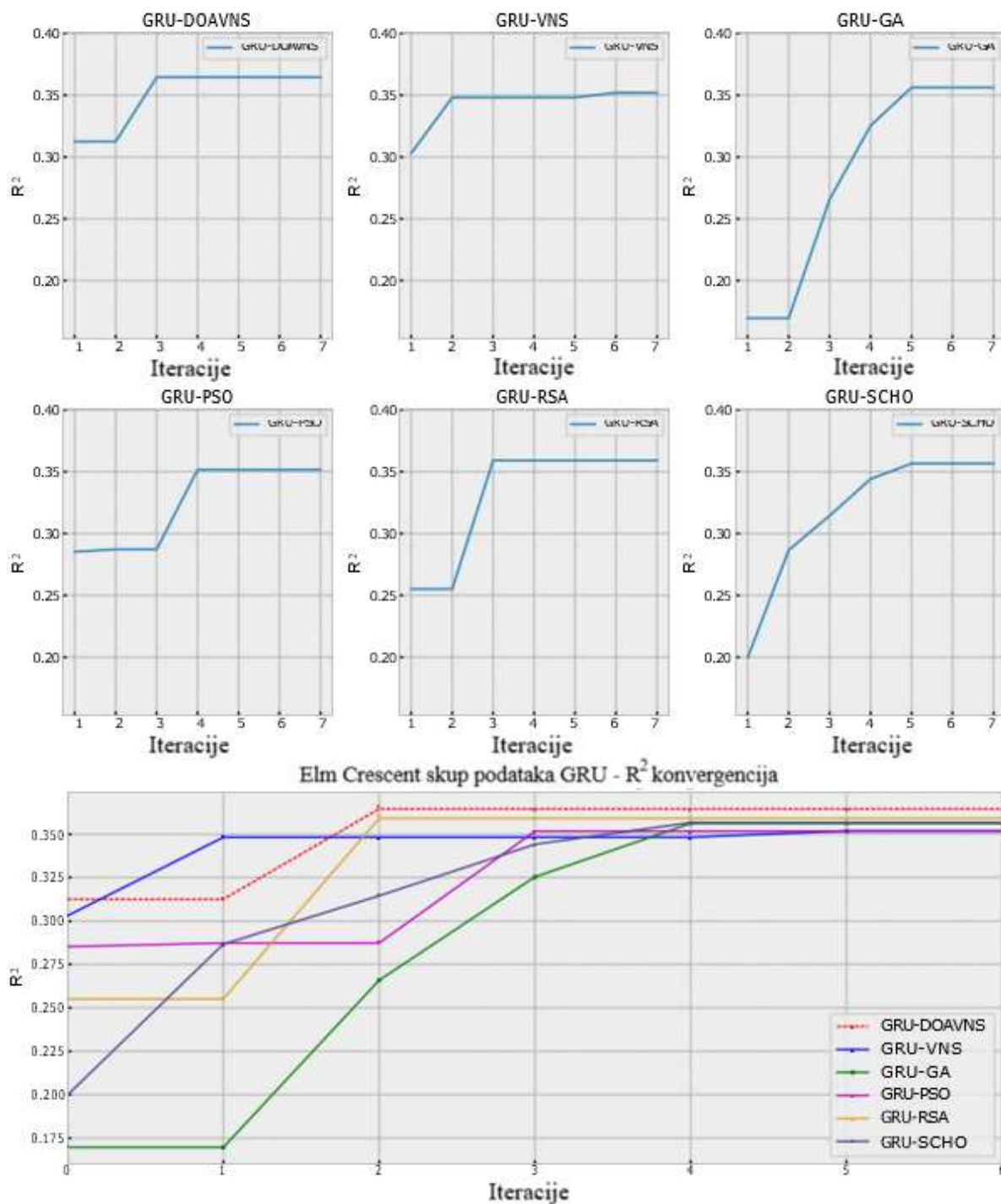
Tabela 5.15. Detaljne metrike simulacija Elm Crescent GRU za optimizovane modele sa najboljim učinkom.

Method	R^2	MAE	MSE	RMSE	IoA
GRU-DOAVNS	0.364567	0.024732	0.000935	0.030573	0.714853
GRU-VNS	0.351947	0.024926	0.000953	0.030875	0.699482
GRU-GA	0.356229	0.024853	0.000947	0.030772	0.698655
GRU-PSO	0.351697	0.024939	0.000954	0.030881	0.709874
GRU-RSA	0.359132	0.024496	0.000943	0.030703	0.724398
GRU-SCHO	0.356679	0.024926	0.000946	0.030762	0.695907

Dijagrami konvergencije za svaki optimizator su dati na slikama 5.31 i 5.32 za rezultate ciljeva i indikatora. Uvedeni optimizator prevazilazi lokalni optimum i konvergira ka boljem rešenju, nadmašujući konkurentske optimizatore.



Slika 5.31. Dijagrami konvergencije funkcije cilja Elm Crescent GRU simulacija.

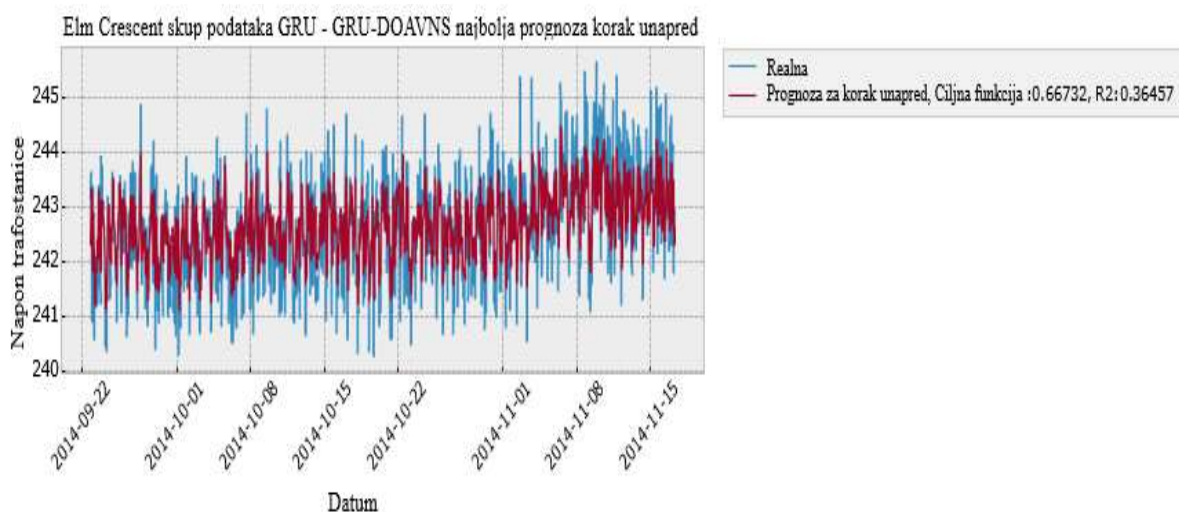
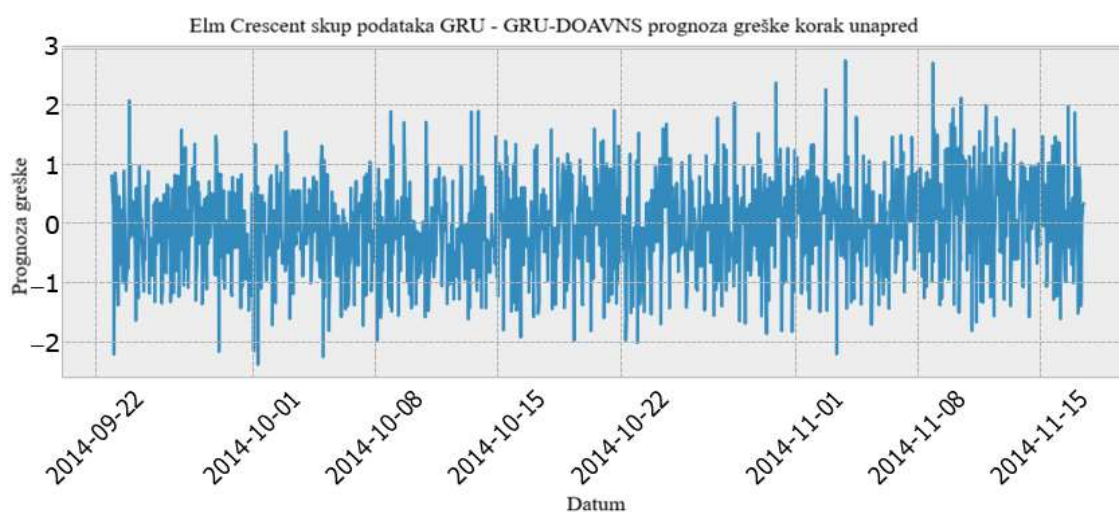


Slika 5.32. Diagrami konvergencije funkcije indikatora simulacija Elm Crescent GRU.

Izbor parametara napravljen od strane svakog algoritma za odgovarajući model sa najboljim učinkom dat je u tabeli 5.16 da bi se olakšala ponovljivost simulacije. Predviđanja napravljena od strane modela sa najboljim performansama su data na slici 5.33. Grafikon greške tokom vremena dat je na slici 5.34.

Tabela 5.16. Izbor parametara modela GRU sa najboljim učinkom za simulacije Elm Crescent.

Method	Learning Rate	Dropout	Training Epochs	GRU Layers	L1 Neurons	L2 Neurons	L3 Neurons	L4 Neurons
GRU-DOAVNS	1.00×10^{-2}	0.175	600	1	36	N/a	N/a	N/a
GRU-VNS	7.79×10^{-3}	0.0699	600	1	19	N/a	N/a	N/a
GRU-GA	6.08×10^{-3}	0.0747	600	1	31	N/a	N/a	N/a
GRU-PSO	1.00×10^{-2}	0.05	600	2	32	27	N/a	N/a
GRU-RSA	8.58×10^{-3}	0.15	600	3	19	23	35	N/a
GRU-SCHO	9.45×10^{-3}	0.125	596	1	13	N/a	N/a	N/a

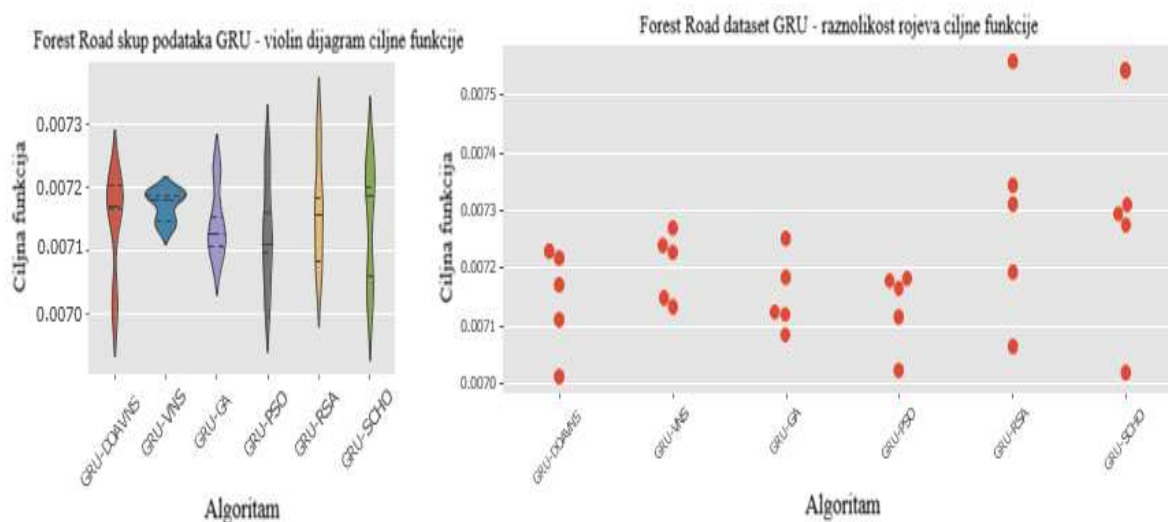
**Slika 5.33.** Prognoze najboljeg DOAVNS modela iz Elm Crescent GRU simulacija.**Slika 5.34.** Greška simulacije Elm Crescent GRU tokom vremena.

5.5.3.2. GRU Forest Road Simulacije

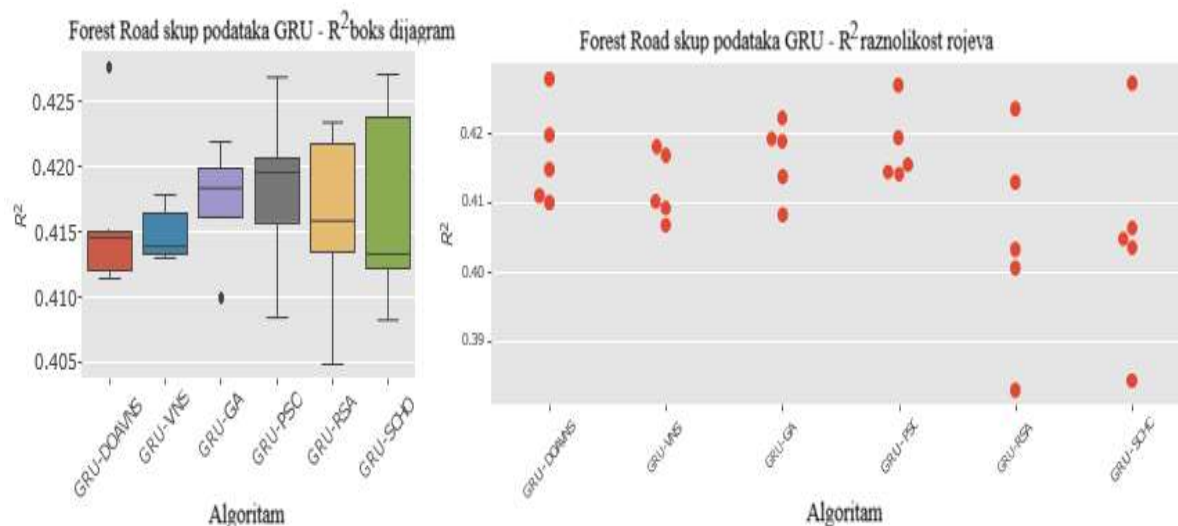
Poređenja u smislu funkcije cilja za rezultate simulacije Forest Road GRU predstavljena su u tabeli 5.17. Dok uvedeni optimizator pokazuje najbolji rezultat u smislu izvršenja u najboljem slučaju sa rezultatom od 0,007011, drugi optimizatori takođe pokazuju dobre performanse, sa VNS ima najviše bodova u smislu najgorih ishoda, dok PSO ima visoke rezultate u smislu medijane i srednja vrednost, a VNS optimizator ima najveću stopu stabilnosti. Dalja poređenja stabilnosti su data u smislu dijagrama distribucije ciljeva i rezultata indikatora za funkciju cilja na slici 5.35 i funkciju indikatora na slici 5.36. Primetan pad stabilnosti može se primetiti za uvedeni optimizator. Međutim, kao što je ranije rečeno, ovaj pad se može pripisati povećanju diversifikacije.

Tabela 5.17. Ishodi funkcije cilja GRU simulacija šumskog puta.

Method	Best	Worst	Mean	Median	Std	Var
GRU-DOAVNS	0.007011	0.007211	0.007145	0.007171	7.54×10^{-5}	5.68×10^{-9}
GRU-VNS	0.007131	0.007190	0.007169	0.007179	2.27×10^{-5}	5.15×10^{-10}
GRU-GA	0.007082	0.007229	0.007143	0.007125	5.19×10^{-5}	2.69×10^{-9}
GRU-PSO	0.007021	0.007247	0.007128	0.007110	7.95×10^{-5}	6.32×10^{-9}
GRU-RSA	0.007063	0.007291	0.007167	0.007156	8.11×10^{-5}	6.58×10^{-9}
GRU-SCHO	0.007018	0.007249	0.007145	0.007187	9.02×10^{-5}	8.14×10^{-9}



Slika 5.35. Dijagrami distribucije funkcije cilja Forest Road GRU simulacija.



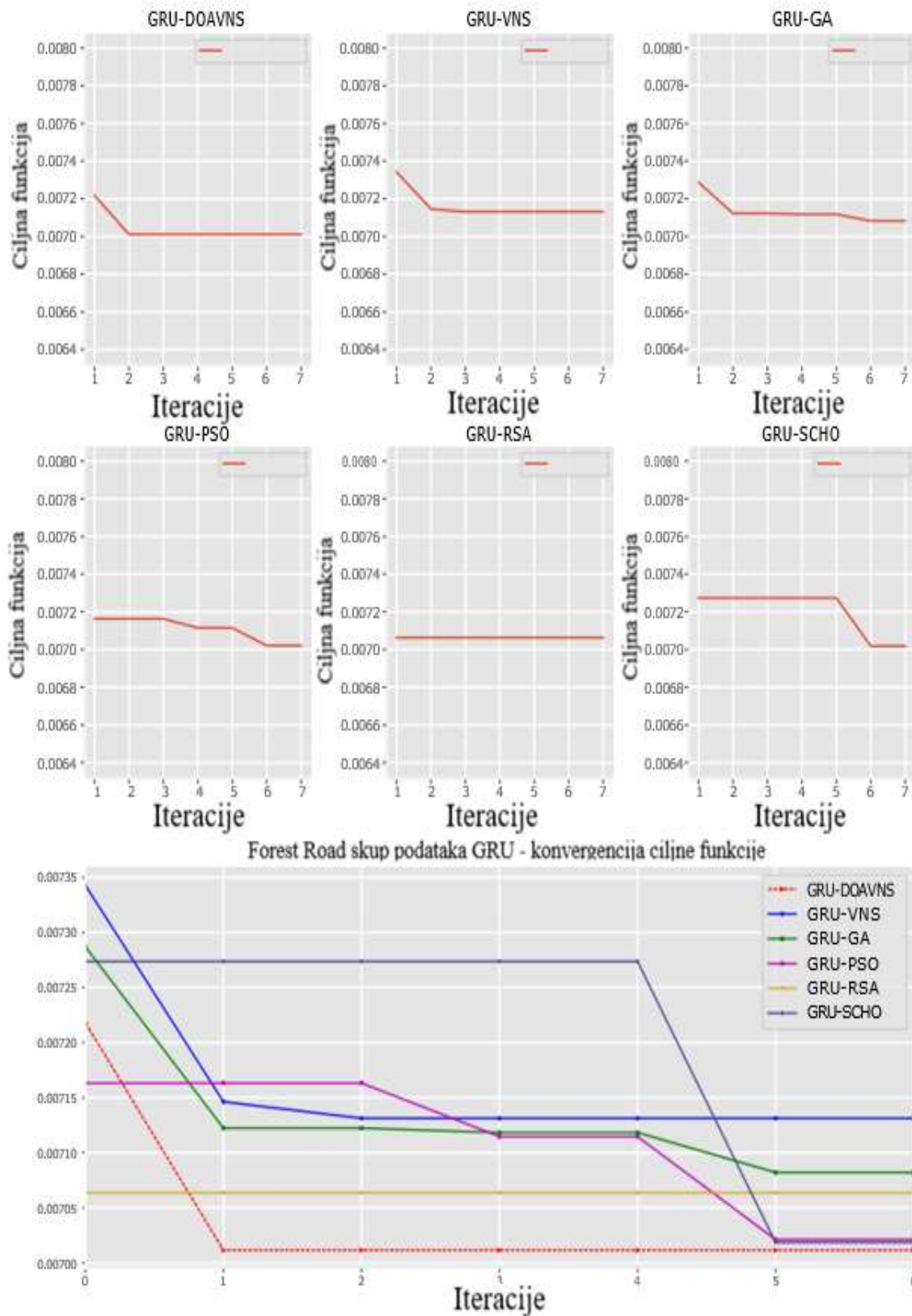
Slika 5.36. Dijagrami distribucije funkcije indikatora simulacija šumskog puta GRU.

Dalja poređenja u pogledu detaljnih metrika data su u tabeli 5.18. Model optimizovan uvedenim DOAVNS optimizatorom pokazuje najbolje rezultate u pogledu svih metrika u sprovedenim testovima. Uvedeni optimizator ima najviše rezultate u smislu R2, MSE i RMSE. Međutim, RSA pokazuje odlične performanse u smislu MAE kao i IoA.

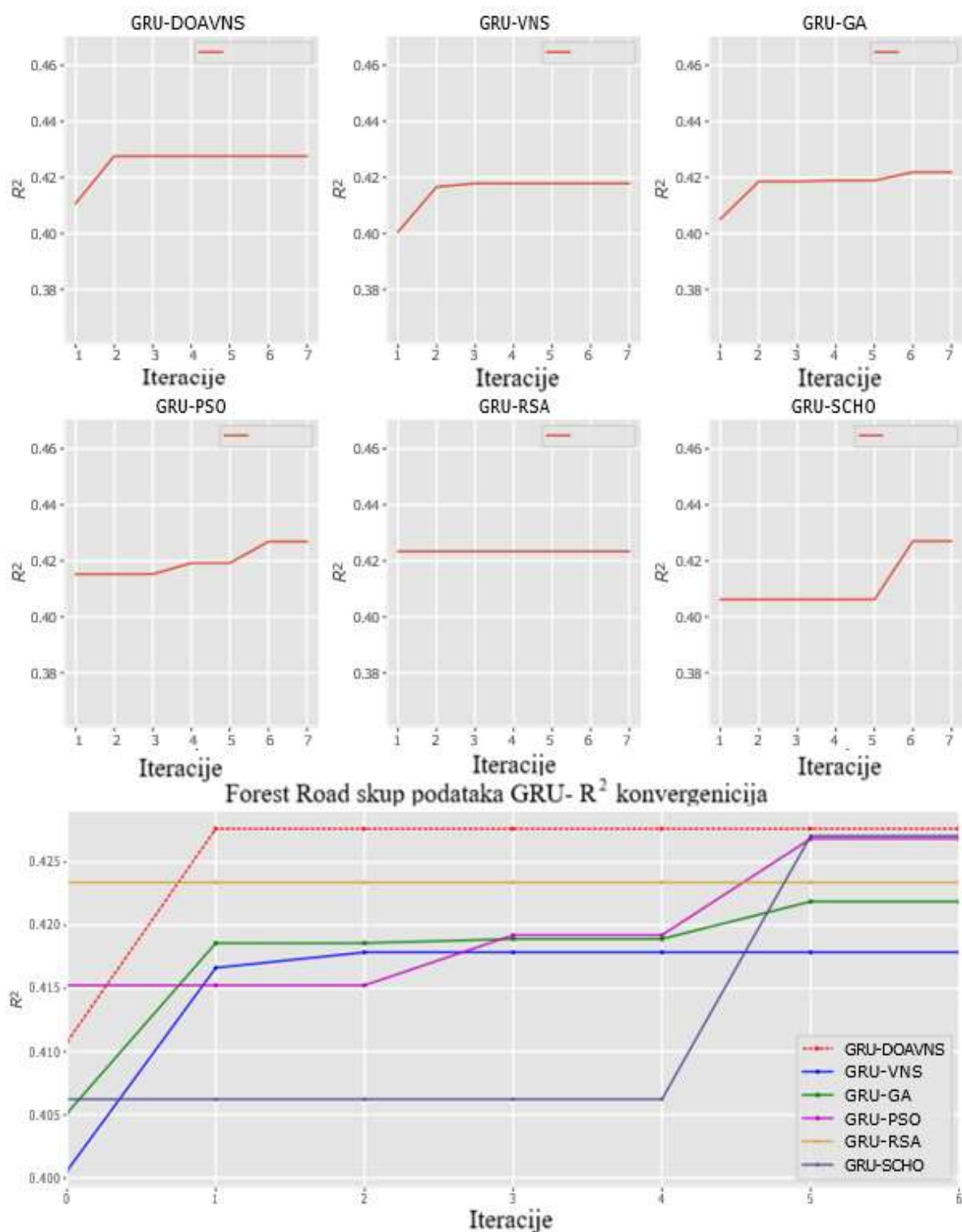
Tabela 5.18. Detaljne metrike GRU simulacija šumskog puta za optimizovane modele sa najboljim učinkom.

Method	R ²	MAE	MSE	RMSE	IoA
GRU-DOAVNS	0.427637	0.066774	0.007011	0.083734	0.784870
GRU-VNS	0.417857	0.066844	0.007131	0.084447	0.770818
GRU-GA	0.421873	0.066330	0.007082	0.084155	0.772736
GRU-PSO	0.426849	0.066375	0.007021	0.083792	0.774807
GRU-RSA	0.423387	0.066148	0.007063	0.084044	0.789407
GRU-SCHO	0.427066	0.066585	0.007018	0.083776	0.783809

Dijagrami konvergencije za svaki optimizator su dati na slikama 5.37. i 5.38. za rezultate objektiva i indikatora. Uvedeni optimizator prevazilazi lokalni optimum i konvergira ka boljem rešenju, nadmašujući konkurentske optimizatore.



Slika 5.37. Dijagrami konvergencije funkcije cilja Forest Road GRU simulacija.

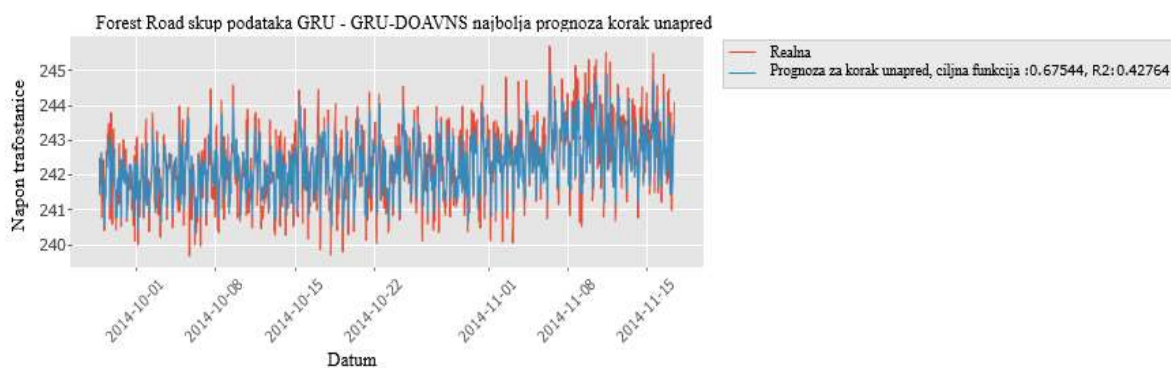


Slika 5.38. Dijagrami konvergencije funkcije indikatora simulacija šumskog puta GRU.

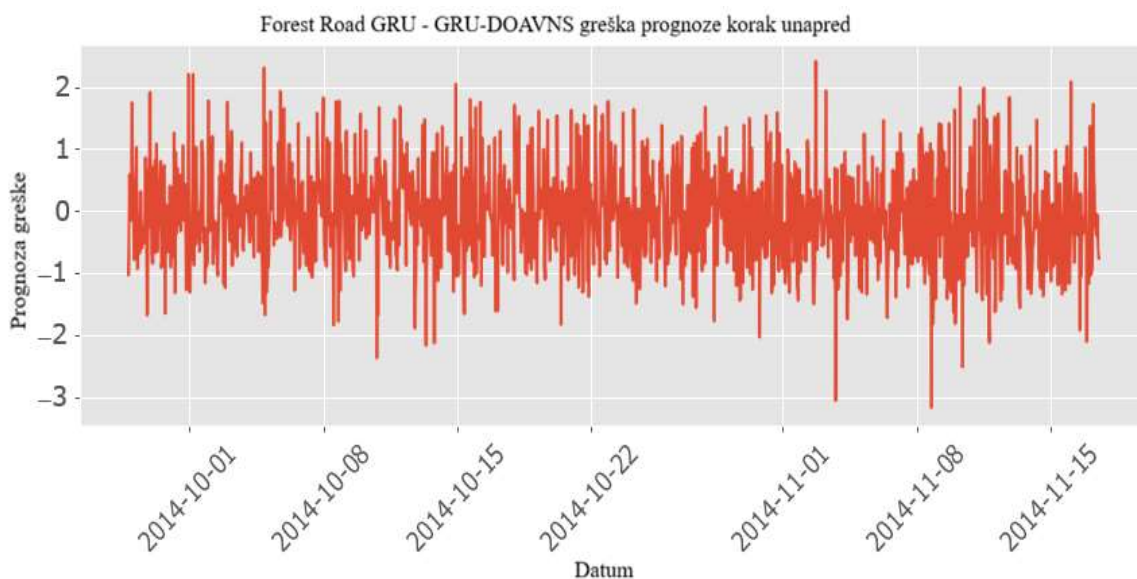
Izbor parametara napravljen od strane svakog algoritma za odgovarajući model sa najboljim učinkom dat je u tabeli 19 da bi se olakšala ponovljivost simulacije. Predviđanja napravljena od strane modela sa najboljim performansama su data na slici 5.39. Na kraju, slika 5.40 prikazuje grešku tokom vremena.

Tabela 5.19. Izbor parametara modela GRU sa najboljim učinkom za simulacije šumskog puta.

Method	Learning Rate	Dropout	Training Epochs	LSTM Layers	L1 Neurons	L2 Neurons	L3 Neurons	L4 Neurons
GRU-DOAVNS	1.00×10^{-2}	0.2	600	4	12	12	36	12
GRU-VNS	1.95×10^{-3}	0.0594	600	4	36	13	12	12
GRU-GA	5.41×10^{-3}	0.116	600	4	12	29	35	15
GRU-PSO	5.37×10^{-3}	0.128	600	3	30	18	17	N/a
GRU-RSA	4.57×10^{-3}	0.160	564	4	33	32	23	14
GRU-SCHO	8.66×10^{-3}	0.0838	600	2	23	12	N/a	N/a



Slika 5.39. Prognoze najboljeg DOAVNS modela iz Forest Road GRU simulacija.



Slika 5.40. Greška simulacije šumskog puta GRU tokom vremena.

Poređenje između optimizovanih modela sa najboljim učinkom u svakoj simulaciji je predstavljeno u tabeli 5.20.

Postignuti rezultati sugerišu da za simulaciju skupa podataka Elm Crescent, GRU model pokazuje najbolje performanse, sa R2 skorom od 0,364567 i MSE od 0,000935. U slučaju simulacija šumskog puta, GRU model takođe pokazuje najbolje rezultate, sa R2 od 0,427637 i MSE od 0,007011.

Ipak, važno je uzeti u obzir nekoliko faktora kada odlučujete o najpogodnijem modelu za upotrebu.

Povoljne performanse GRU-a čine ove mreže idealnim za upotrebu u TinyML aplikacijama zbog njihovih relativno niskih računarskih zahteva u poređenju sa LSTM režimima, dok i dalje pokazuju veću robusnost i otpornost na uobičajene probleme u jednostavnim RNN-ovima.

Iz tog razloga, GRU modeli su izabrani za simulacije sa ESP32 uređajima, koje je razvila Espressif Systems, kineska kompanija sa sedištem u Šangaju, Kina, a proizvodi TSMC koristeći njihov 40 nm proces.

Tabela 5.20. Poređenje modela sa najboljim performansama u svakoj simulaciji.

Simulation Method	R ²	MAE	MSE	RMSE	IoA
Elm Crescent simulations RNN-DOAVNS	0.358764	0.024683	0.000943	0.030712	0.732794
LSTM-DOAVNS	0.283279	0.026561	0.001054	0.032469	0.627262
GRU-DOAVNS	0.364567	0.024732	0.000935	0.030573	0.714853
Forest Road simulations RNN-DOAVNS	0.411854	0.067344	0.007205	0.084881	0.758396
LSTM-DOAVNS	0.423220	0.066313	0.007066	0.084057	0.777800
GRU-DOAVNS	0.427637	0.066774	0.007011	0.083734	0.784870

5.5.4. Optimizacija: Statistička validacija

Da bi se uspostavilo poređenje između procenjenih algoritama, neophodna je statistička validacija, pošto oslanjanje na jednostavna jednokratna izvršenja može dati pogrešne zaključke.

Sprovedene simulacije treba da zadovolje utvrđeni skup kriterijuma da bi bile kvalifikovane za evaluaciju korišćenjem parametarskog testiranja.

U suprotnom, potrebno je u studijama koristiti neparametarske statističke testove [172].

Za sprovođenje testiranja potreban je dovoljan broj simulacija; stoga je

sprovedeno 30 okreta za svaki od sprovedenih eksperimenata, sa nezavisnim slučajnim semenima koji su zadovoljavali kriterijume nezavisnosti.

Homoskedastičnost je ustanovljena Levenovim testom [173], gde su rezultujuće p vrednosti 0,62 za svaku od simulacija, što sugeriše da je i ovaj kriterijum ispunjen. Konačno, kriterijum normalnosti je testiran Shapiro–Vilk [174] testom.

Ostvareni ishodi su prikazani u tabeli 5.21.

Sa postignutim vrednostima ispod 0,05, nulta hipoteza se odbacuje, što sugeriše da pretpostavka normalnosti nije zadovoljena i da se ne može opravdati upotreba parametarskog testa.

Opažanja normalnosti su potom potvrđena KDE dijagramima funkcije cilja predstavljenim na slikama 5.41. i 5.42. za posmatrane simulacije Elm Crescent i Forest Road.

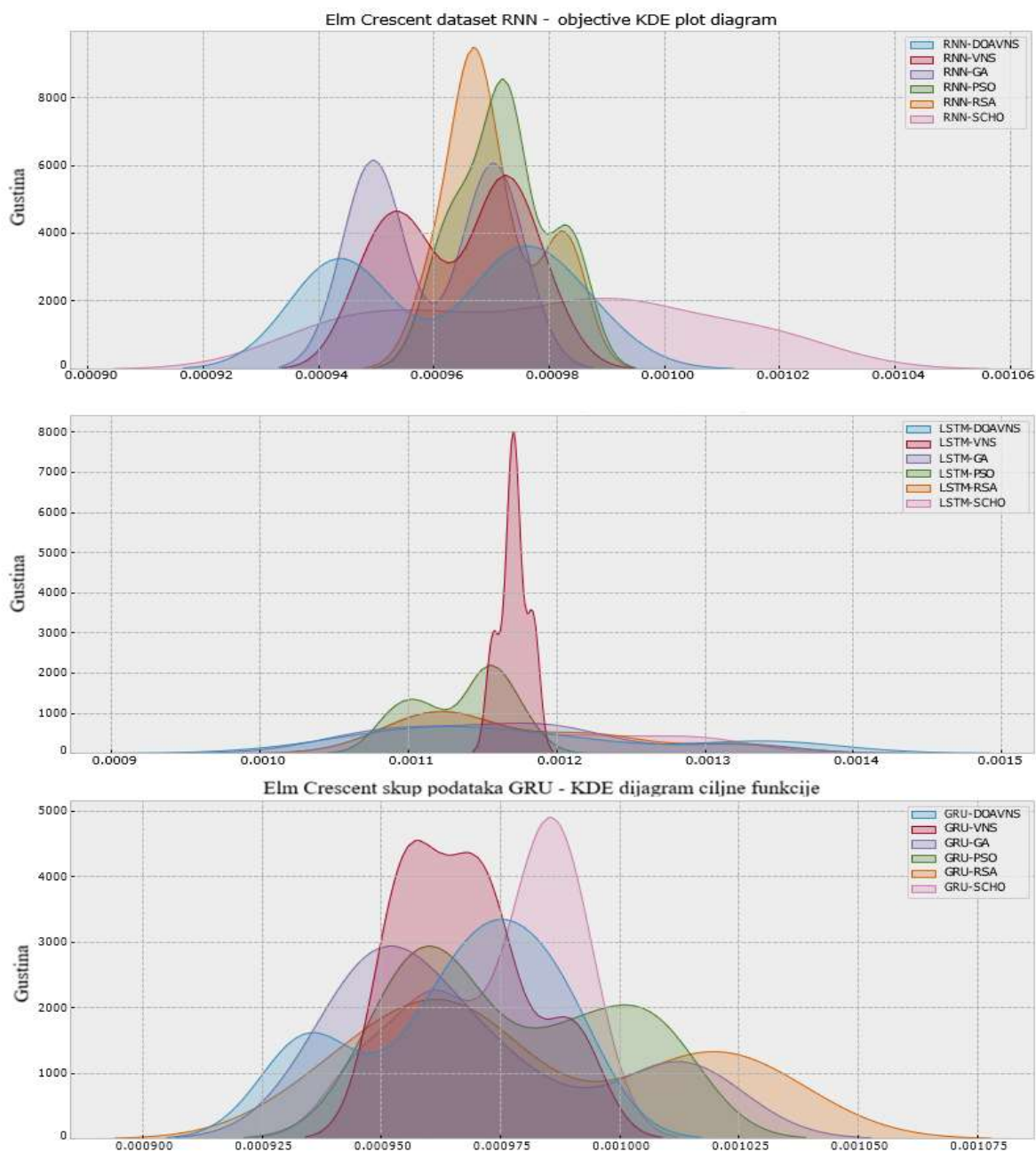
Pošto uslovi potrebni za primenu parametarskog testa nisu bili ispunjeni, ovaj rad je pribegao korišćenju Wilcoxon testa sa predznakom [175] da bi se uspostavilo poređenje između predloženog DOAVNS-a i drugih optimizatora.

Rezultati ovog testa su prikazani u tabeli 5.22.

Kako svi kriterijumi padaju ispod granične vrednosti $\alpha=0,05$, postignuti ishodi ukazuju na statističku značajnost postignutih rezultata komparativne analizeposmatranih rezultata.

Tabela 5.21. Shapiro-Vilk rezultati za eksperimente predviđanja za procenu uslova normalnosti.

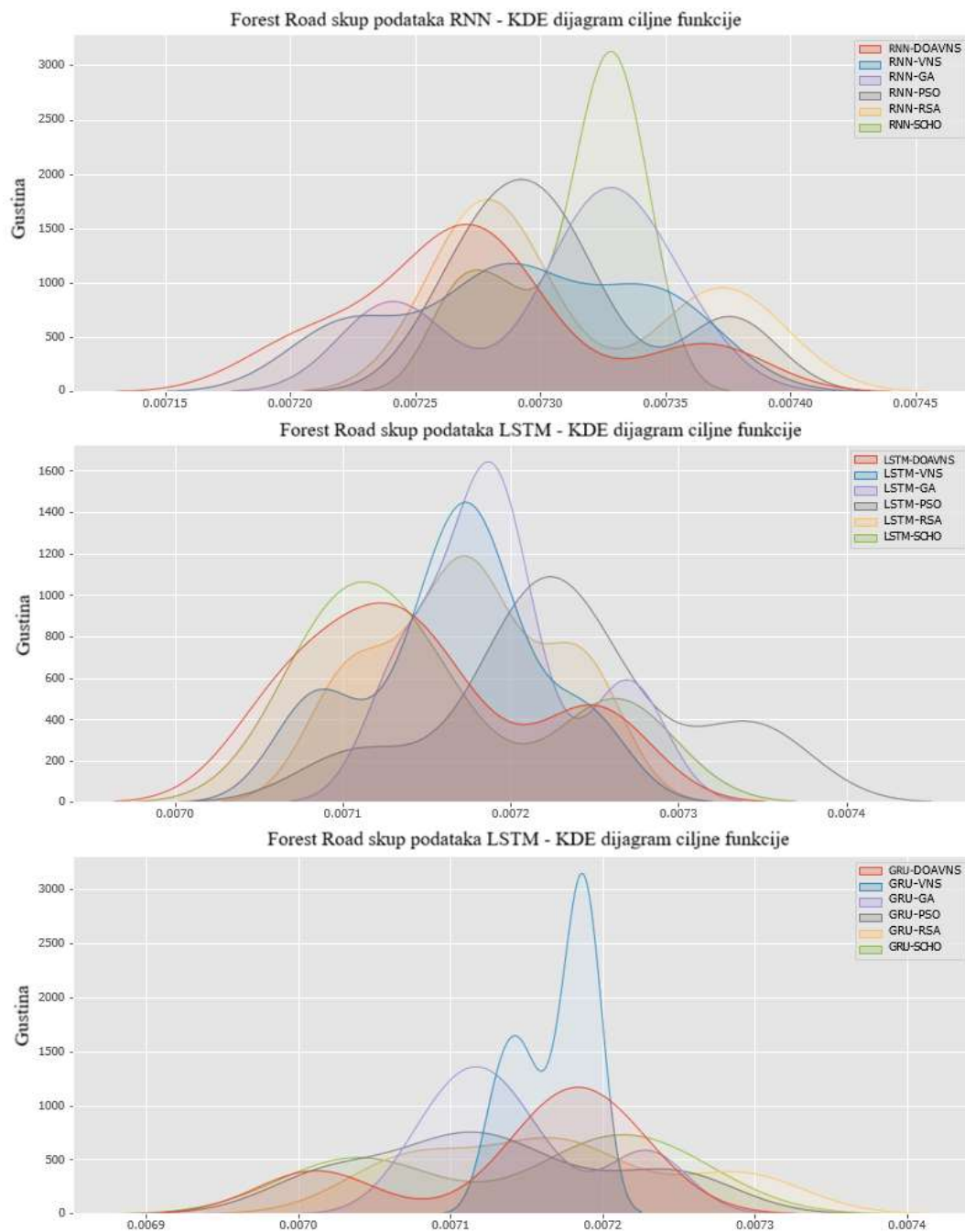
Approach	DOAVNS	VNS	GA	PSO	RSA	SCHO
Elm Crescent						
Elm Crescent	0.032	0.029	0.041	0.028	0.024	0.036
RNN						
Elm Crescent	0.031	0.034	0.023	0.032	0.027	0.033
LSTM						
Elm Crescent	0.037	0.024	0.029	0.032	0.031	0.029
GRU						
Forest road						
Forest Road RNN	0.035	0.028	0.023	0.034	0.029	0.027
Forest Road	0.028	0.029	0.033	0.031	0.031	0.029
LSTM						
Forest Road GRU	0.030	0.034	0.024	0.028	0.028	0.031



Slika 5.41. KDE dijagrami simulacije Elm Crescent.

Tabela 5.22. Rezultati Vilcoxon signed-rank testa u eksperimentima predviđanja.

DOAVNS vs. Others	VNS	GA	PSO	RSA	SCHO
Elm Crescent					
Elm Crescent RNN	0.034	0.018	0.025	0.029	0.023
Elm Crescent LSTM	0.029	0.031	0.042	0.025	0.036
Elm Crescent GRU	0.039	0.037	0.041	0.039	0.034
Forest road					
Forest road RNN	0.025	0.044	0.037	0.028	0.035
Forest road LSTM	0.032	0.038	0.024	0.039	0.037
Forest road GRU	0.031	0.035	0.034	0.028	0.029



Slika 5.42. KDE dijagrami simulacije šumskog puta.

5.5.5. Simulacije primene sistema

Na osnovu rezultata simulacije, GRU modeli pokazuju optimalne performanse kada su jednom optimizovani i obučeni za predviđanje u oba slučaja simulacije. Ovo je povoljno, pošto niži računarski zahtevi GRU-a čine ih idealnim za primenu na MCU-ovima koji se suočavaju sa izazovima sa ograničenim računarskim resursima. U ovoj

studiji, modeli su ponovo implementirani koristeći TensorFlow Lite, kompajlirani, konvertovani u C i otpremljeni na ESP32 razvojnu ploču koristeći Arduino IDE. Uređaj je konfigurisan da nadgleda ulaz serijskog porta i, na osnovu niza ulaza, generiše odgovore u skladu sa tim. Simulacije koje koriste testni deo skupova podataka daju rezultate u skladu sa rezultatima prijavljenim u prethodnim tabelama, sugerišući održivost za upotrebu u stvarnom svetu.

Važno je napomenuti da ESP32 podržava dodatne konfiguracije, kao što je veb server i direktno praćenje napona pomoću opadajućeg transformatora ili eksternog ADC, koji bi takođe mogao biti integrisan sa platformom. Studija dokaza o konceptu sprovedena u ovom radu sugerišu da bi proširena verzija ovog sistema mogla značajno pomoći u distribuciji i demokratizaciji IoT uređaja za predviđanje energije, čime bi se poboljšala integracija obnovljive energije u postojeće mreže za distribuciju električne energije i smanjili gubici od prekomerne proizvodnje energije. i distribucija.

5.6. Sumarna razmatranja i buduća istraživanja u oblasti predikcije proizvodnje solarne električne energije

Sa ograničenim fosilnim resursima i njihovim neodrživim uticajima, sve je veći pomak ka obnovljivoj energiji. Međutim, uspešno uključivanje ovih novih izvora u postojeće električne mreže ostaje izazov, sa tehničkim i regulatornim preprekama koje treba rešiti. Iako bi povećanje pouzdanosti moglo uveliko poboljšati energetska održivost, oslanjanje solarne energije na vremenske prilike uvodi varijabilnost koja često zahteva skupo skladištenje kako bi se osigurala stabilna proizvodnja.

Ova studija se fokusira na korišćenje metaheurističke optimizacije za fino podešavanje rekurentnih modela predviđanja sa ciljem predviđanja proizvodnje solarne energije, dizajniranih za TinyML primenu na MCU u in situ aplikacijama. Različiti rekurentni M-teški modeli (RNN, LSTM i GRU) su testirani da bi se identifikovao najefikasniji model. Pored toga, sprovedena je komparativna evaluacija na dva skupa podataka iz stvarnog sveta za odvojene lokacije, koja je obuhvatala više optimizatora za validaciju pristupa; prilagođeni optimizator je pokazao obećavajuće rezultate, postigavši MSE od samo 0,000935v i 0,007011v u najboljem slučaju na dva procenjena skupa podataka, signalizirajući njegov potencijal za implementaciju u stvarnom svetu. Najbolji modeli su dalje procenjeni na ESP32 čipu, koristeći UART terminal za simulaciju izvršenja. Performanse modela su bile dosledne, sa minimalnim kašnjenjem za potrebe aplikacije. Primenom modela direktno na licu mesta, smanjuju se troškovi mrežne infrastrukture i mogu se dodati lokalne funkcionalnosti koje pomažu u efikasnijem

upravljanju potražnjom i snabdevanjem, uključujući i upozoravanje u kritičnim situacijama.

Jedan nedostatak je taj što, u ovoj postavci, modeli postavljeni na MCU ne mogu da se ažuriraju u realnom vremenu; umesto toga, zahtevaju ponovnu obuku na odvojenom hardveru i reprogramiranje MCU firmvera za ažuriranja. Ostala ograničenja uključuju ograničene veličine populacije i vremena optimizacije, s obzirom na veliko računarsko opterećenje. Buduća istraživanja imaju za cilj da prošire ovu metodologiju, istražujući šire aplikacije za optimizovani model i razvijajući eksperimentalni okvir unutar TinyML okruženja. Specifični pravci će uključiti implementaciju ažuriranja modela u realnom vremenu, integraciju bežičnih senzorskih mreža i razvoj distribuiranih sistema predviđanja preko različitih obnovljivih izvora energije kao što su vetar, hidroelektrična i solarna energija. Istraživanje će takođe ispitati skup podataka o solarnoj energiji sa Balkana, koji se trenutno prikuplja; međutim, trenutno nije ni otvoreno dostupan ni kompletan za eksperimente ovog obima. Konačno, primena TinyML modela će se proširiti na druge domene aplikacija, uključujući zdravstvo, poljoprivredu, IoT bezbednost i industriju, gde ovi modeli mogu pomoći u klasifikaciji slika, rutiranju bežične senzorske mreže, otkrivanju kvarova, predviđanju pada za decu i starije osobe, itd.

Precizni sistemi za predviđanje solarne energije zasnovani na TinyML-u mogu značajno uticati na pravne politike vezane za pouzdanost mreže i integraciju obnovljive energije na Zapadnom Balkanu. Pružajući tačne, lokalizovane prognoze, ovi sistemi poboljšavaju usklađenost sa propisima EU, kao što je RED II, koji promovise veću upotrebu obnovljive energije i efikasnu integraciju u mrežu. Takvi modeli podržavaju politike koje imaju za cilj poboljšanje stabilnosti mreže balansiranjem ponude i potražnje obnovljive energije, usklađivanjem sa nacionalnom energetsom bezbednošću i ciljevima smanjenja gasova staklene bašte postavljenim u NECP. Štaviše, precizne in situ prognoze mogu pomoći u smanjenju oslanjanja na rezervne kopije fosilnih goriva tokom perioda fluktuacije solarne proizvodnje, unapređujući regionalne i EU ciljeve smanjenja emisija.

Isplativa, lokalizovana primena TinyML-a omogućava decentralizovano praćenje, smanjujući potrebu za opsežnom mrežnom infrastrukturom i čineći integraciju obnovljivih izvora dostupnijom, posebno za manje gradove i udaljena područja. Nadovezujući se na podsticaje kao što su fid-in tarife, ova mogućnost bi mogla da podstakne kreatore politike da ponude finansijsku podršku za TinyML u okviru većih subvencija za obnovljivu energiju. Štaviše, TinyML podržava kontinuirano praćenje i analizu podataka u realnom vremenu koji dolaze od senzora, što može pomoći u identifikaciji obrazaca koji ukazuju na anomalije, kao što su neispravnost opreme ili odstupanja u izlazu električne energije, obezbeđujući brze intervencije i smanjujući vreme zastoja sistema. Kontinuirano praćenje može pomoći u integraciji obnovljivih sistema sa pametnim mrežama, osiguravajući da proizvodnja energije odgovara potražnji i stabilizujući mrežu kroz predviđanja energetske fluktuacije. Poboľšane mogućnosti praćenja i skladištenja koje omogućava TinyML takođe mogu podržati propise o

prekograničnoj razmeni energije. Uz preciznije predviđanje viškova proizvodnje, energija se može skladištiti ili trgovati na međunarodnom nivou, pomažući regionalnoj energetske nezavisnosti, smanjenju oslanjanja na uvoz i postizanju cilja Energetske zajednice o harmonizovanoj integraciji tržišta širom Zapadnog Balkana.

Konačno, tačnost predviđanja TinyML-a je u skladu sa propisima o zaštiti životne sredine omogućavajući solarnim projektima da efikasnije predvide i ublaže uticaje na životnu sredinu. Precizni modeli proizvodnje obezbeđuju usklađenost sa standardima kvaliteta vazduha i očuvanja resursa, ubrzavajući procene uticaja na životnu sredinu prema propisima kao što je Zakon o zaštiti životne sredine. Integracijom TinyML-a, regulatorni nadzor bi mogao postati efikasniji kroz podatke u realnom vremenu koji identifikuju neefikasnost ili prekomerne emisije. TinyML stoga ima potencijal da vodi politike koje podržavaju otpornu i održivu energetske mrežu širom Zapadnog Balkana, opremajući donosiocima odluka poboljšanim alatima za praćenje i predviđanje.

6. MODIFIKOVANI METAHEURISTIČKI OPTIMIZACIONI PRISTUP ZA PREDVIĐANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA PUNJIVIH LITIJUM-JONSKIH BATERIJA

6.1. Uvodna razmatranja predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

Rastuća globalna potražnja za energijom, u kombinaciji sa sve većom zabrinutošću za održivost životne sredine, stavlja dodatni pritisak na tradicionalne energetske sisteme. Ogromna većina trenutno proizvedene energije potiče od sagorevanja fosilnih goriva, koja koriste toplotu za proizvodnju električne energije [176]. Međutim, ovaj proces proizvodi brojne nusprodukte u različitim fazama. Tokom eksploatacije fosilnih goriva često se oslobađaju zagađivači u okolinu. Dodatno, samo sagorevanje emituje niz štetnih jedinjenja u atmosferu.

U postindustrijskim društvima sve se više pažnje posvećuje ublažavanju zagađenja koje nastaje proizvodnjom energije, pri čemu se ulažu značajni napor u obnovu životne sredine i smanjenje emisija [177, 178, 209, 210].

Ipak, ljudska potreba za energijom i dalje raste. Da bi se ta potreba zadovoljila na održiv način, neophodna je fundamentalna promena u načinu proizvodnje i upravljanja energijom. Ograničene rezerve fosilnih goriva dodatno naglašavaju hitnost razvoja alternativnih rešenja. Jedan od obećavajućih pravaca jeste širenje obnovljivih izvora energije, kao što su hidroelektrane, vetroenergija i fotonaponski sistemi. Ove tehnologije mogu da obezbede značajne količine energije uz mnogo manji ekološki otisak na duži rok. Međutim, obnovljivi izvori uvode nove tehničke izazove [179].

Ključni izazov predstavlja njihova povremena i često nepredvidiva proizvodnja, kao i ograničenja u tehnologijama skladištenja [180, 181]. Iako su razvijeni brojni prediktivni modeli za prognozu proizvodnje i balansiranje ponude i potražnje (uz oslonac na tradicionalne izvore kao rezervu), relativno malo radova se bavilo problemima skladištenja energije. Kod vetra i solarne energije često se dešava da se energija proizvede onda kada nije odmah potrebna. Taj višak se mora iskoristiti, uskladištiti ili izgubiti.

Kako bi se izbegao gubitak, uobičajeno se koriste baterijske banke. Iako je tehnologija baterija značajno napredovala poslednjih godina [182], i dalje postoje važna ograničenja. Baterije vremenom i upotrebom degradiraju, a broj njihovih ciklusa

punjenja i pražnjenja je konačan. Na kraju postaju neupotrebljive i zahtevaju zamenu. Stoga je mogućnost praćenja zdravstvenog stanja baterije i predviđanja preostalog korisnog veka od velike vrednosti za donosioce odluka u sistemima obnovljive energije.

Tehnike veštačke inteligencije (AI) nude značajan potencijal za optimizaciju strategija skladištenja energije u aplikacijama obnovljive energije. Ovaj rad istražuje upotrebu modifikovane LSTM mreže [183], vrste rekurentne neuronske mreže (RNN) [184], za predviđanje zdravlja baterija i procenu preostalog korisnog životnog ciklusa. Dizajniranje takvih modela nije trivijalno; potrebno je pažljivo izabrati arhitekturu i parametre treniranja kako bi se obezbedio dovoljan kapacitet za hvatanje obrazaca u podacima, a da se pri tom izbegnu prenaučenosť i prekomerno korišćenje računarskih resursa.

Izbor hiperparametara u modelima dubokog učenja široko se smatra NP-teškim problemom. Da bi se to prevazišlo, u ovom radu se predlaže modifikovani metaheuristički optimizacioni algoritam zasnovan na originalnom pristupu optimizacije rojem čestica (PSO) [185], prilagođen potrebama ovog zadatka. Algoritam je integrisan u širi okvir optimizacije sa ciljem poboljšanja performansi modela kroz efikasno podešavanje hiperparametara. Predloženi pristup je upoređen sa više najsavremenijih metoda optimizacije. Sprovedeni su sveobuhvatni eksperimenti i statističke validacije kako bi se pokazala njegova efikasnost.

Glavni doprinosi ovog rada mogu se sumirati na sledeći način:

- Metodologija predviđanja preostalog korisnog životnog ciklusa baterija korišćenjem LSTM mreža.
- Integrisani okvir optimizacije za podešavanje hiperparametara, dizajniran da poboljša performanse modela bez prenaučenosťi.
- Modifikovani metaheuristički optimizacioni algoritam posebno prilagođen zahtevima predviđanja skladištenja energije.

6.2. Trenutno stanje u procesima predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum-jonskih baterija

Tehnike predviđanja našle su široku primenu u sistemima za skladištenje energije. Neka istraživanja fokusirala su se na prognoziranje troškova baterija. Na primer, Mauler i saradnici [186] dali su pregled različitih metoda za predviđanje cena litijum-jonskih baterija koje se koriste u obnovljivoj energiji i električnim vozilima. Druga istraživanja [187] bavila su se predviđanjem zdravstvenog stanja baterija, uglavnom kroz pristupe zasnovane na modelima i metode zasnovane na podacima, sa ciljem da se poveća

pouzdanost baterija u realnim uslovima. Međutim, ovi pristupi često zanemaruju potencijalna poboljšanja koja se mogu postići primenom optimizacije i finim podešavanjem hiperparametara. Takođe, metode predviđanja zasnovane na impedansi pojedinačnih ćelija pokazale su se obećavajućim u uslovima heterogene upotrebe [188].

Integracija veštačke inteligencije u predviđanje zdravstvenog stanja baterija nudi značajan potencijal, ali u praksi i dalje postoje brojni izazovi [189]. Pored izbora odgovarajućeg modela, proces treniranja mora uključiti pažljivo predprocesiranje podataka kako bi se izbeglo curenje informacija i prenaučenosť [190]. Iako su ti koraci predprocesiranja generalno dobro poznati, proces podešavanja hiperparametara ostaje otvoren istraživački problem. Uobičajeni pristupi poput grid search ili slučajnog pretraživanja često zahtevaju velike računarske resurse i mogu propustiti optimalne regione pretrage.

Metaheuristički optimizacioni algoritmi predstavljaju obećavajuću alternativu za podešavanje hiperparametara [191]. Ovi algoritmi inspirisani su prirodnim procesima, kao što su evolucija ili kolektivno ponašanje životinja. Uglavnom funkcionišu tako što održavaju populaciju kandidata za rešenja (agenata), koji prate jednostavna heuristička pravila radi istraživanja prostora rešenja. Iako globalni optimum nije zagarantovan, metaheuristike često konvergiraju ka konkurentnim rešenjima u razumnom vremenskom okviru i sa skromnim računarskim resursima.

Primena metaheuristika je široko rasprostranjena u različitim oblastima, uključujući obradu audio signala [192], optimizaciju u poljoprivredi [193] i predviđanje grešaka u softveru [194].

Hibridne metaheuristike, koje kombinuju prednosti više algoritama, takođe su pokazale veliku efikasnost u praktičnim scenarijima predviđanja, kao što su prognoza potrošnje energije u domaćinstvima [195], predviđanje cena nafte i gasa [196] i procena brzine vozila [197].

Predviđanje životnog ciklusa baterija, složen zadatak vremenskih serija, zahteva modele sposobne da uče dugoročne vremenske zavisnosti. LSTM mreže su posebno pogodne za ovu svrhu, ali njihova primena u predviđanju životnog ciklusa baterija je i dalje ograničena. Štaviše, performanse LSTM modela u velikoj meri zavise od pažljivog podešavanja hiperparametara.

Iako su metaheurističke i hibridne optimizacione tehnike uspešno primenjene u drugim oblastima, njihova upotreba za optimizaciju LSTM modela u ovom kontekstu je nedovoljno istražena.

Posebno, integracija operatora genetskog algoritma (GA) [198]—poput ukrštanja i mutacije—u okviru PSO [185] metodologije, strukturisane kroz *ostrvski model pristup* [199], do sada nije primenjena na probleme predviđanja životnog ciklusa baterija.

Kako bi se popunile ove praznine, ovaj rad predlaže modifikovani optimizacioni algoritam koji kombinuje operatore genetske raznolikosti sa ostrvskim modelom strukturiranja populacije. Ovaj hibridni optimizator koristi se za podešavanje hiperparametara LSTM modela radi predviđanja životnog ciklusa baterija, nudeći novi pravac kako u metodologiji predviđanja, tako i u strategiji optimizacije hiperparametara.

6.2.1. Mreže zasnovane na LSTM arhitekturi

Modeli zasnovani na neuronskim mrežama predstavljaju osnovu mnogih savremenih VI aplikacija. Međutim, jednostavne arhitekture neurona teško uspevaju da uhvate vremenske složenosti u podacima. Iako su korišćene razne tehnike, poput „spljoštavanja“ podataka, za delimično ublažavanje ovih problema, direktniji pristup rešava ih dodavanjem memorije u svaku neuronsku ćeliju. Rekurentne veze u RNN mrežama omogućavaju im da zadrže deo informacija o prethodnim ulazima.

Iako to omogućava mreži da obrađuje vremenske zavisnosti, javljaju se određeni problemi. Konkretno, rekurentne veze stvaraju izazove u treniranju mreže, što ponekad dovodi do problema nestajanja ili eksploziranja gradijenata u dubljim mrežama, ograničavajući praktičnu primenu običnih RNN-ova.

Kako bi rešili ove probleme, istraživači su razvili dve specifične modifikacije RNN-ova. Prva, jednostavnija, jeste arhitektura gated recurrent unit (GRU) [200]—preferira se kada su računarski resursi ograničeni. Druga, naprednija arhitektura zasnovana je na LSTM [183]. LSTM mreže koriste set kontrolnih „vrata“ dizajniranih da selektivno skladište delove ulaznih podataka i oslobode ih mreži onda kada su potrebni.

Matematički, mehanizam rada ovih vrata može se opisati sledećim jednačinama:

$$\bar{s}[n] = \bar{g}_{cs}[n] \odot \bar{s}[n-1] + \bar{g}_{cu}[n] \odot \bar{u}[n] \quad (6.1)$$

Ovde stanje ćelije $\bar{s}[n]$ u trenutku n zavisi od prethodnog stanja $\bar{s}[n-1]$, modulisanog vratima za zaboravljanje $\bar{g}_{cs}[n]$, i od kandidata za novo stanje $\bar{u}[n]$, ponderisanog ulaznim vratima $\bar{g}_{cu}[n]$. Simbol \odot označava element-po-element množenje.

Izlaz modela u trenutku n , označen kao $\bar{v}[n]$, računa se prema sledećoj jednačini:

$$\bar{v}[n] = \bar{g}_{cr}[n] \odot \bar{r}[n] \quad (6.2)$$

gde izlazna vrata $\bar{g}_{cr}[n]$ regulišu koliki deo unutrašnjeg signala $\bar{r}[n]$ učestvuje u formiranju krajnjeg izlaza.

Ovi mehanizmi omogućavaju LSTM mrežama da zadrže relevantne informacije kroz duge vremenske sekvence i da ublaže problem nestajanja gradijenata, koji ograničava obične RNN modele.

6.3. Metodologija predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

U ovom odeljku opisana je metodologija predložena u ovom radu. Najpre je predstavljen originalni algoritam, zatim su istaknuti njegovi nedostaci. Nakon toga predložena je modifikovana verzija algoritma, sa ciljem da se unaprede originalne performanse. Na kraju je prikazan dijagram toka predloženog optimizacionog okvira.

6.3.1. Osnovni algoritam optimizacije rojem čestica (PSO)

Algoritam PSO [185] može se implementirati na dva osnovna načina: kroz globalnu strategiju i kroz lokalnu strategiju. U globalnoj varijanti, svaka čestica je vođena sopstvenim najboljim istorijskim rešenjem, ali i najboljom poznatom pozicijom koju je pronašao bilo koji član roja. Nasuprot tome, lokalna varijanta ograničava svaku česticu da koristi samo sopstveno iskustvo i najbolje performanse među unapred definisanim susedima (nbest).

Formalno, roj se sastoji od N čestica, pri čemu svaka ima svoj vektor pozicije i vektor brzine. Svaka čestica pamti i svoje lično najbolje rešenje, kao i globalno najbolje rešenje koje je roj otkrio. Ova dva faktora vode proces konvergencije roja ka optimalnom rešenju.

Za zadatke minimizacije, pravilo za ažuriranje ličnog najboljeg rešenja čestice glasi:

$$B_{i,t+1} = \begin{cases} S_{i,t+1} & \text{ako } F(S_{i,t+1}) < F(B_{i,t}) \\ B_{i,t} & \end{cases} \quad (6.3)$$

u suprotnom $(B_{i,t})$ ostaje nepromenjeno.

Ažuriranje brzine i pozicije vrši se po standardnim PSO jednačinama:

$$u_{d,i,t+1} = \omega \cdot u_{d,i,t} + k_1 \cdot rand_1 \cdot (b_{d,i,t} - s_{d,i,t}) + k_2 \cdot rand_2 \cdot (b_{d,g,t} - s_{d,i,t}) \quad (6.4)$$

$$s_{d,i,t+1} = s_{d,i,t} + u_{d,i,t+1} \quad (6.5)$$

gde su k_1 i k_2 kognitivni i socijalni koeficijenti učenja, dok $rand$ predstavlja slučajnu vrednost iz intervala $[0, 1]$.

6.3.2. Modifikovani adaptivni pristup za životni ciklus punjivih litijum jonskih baterija

Kako bi se poboljšalo istraživanje i očuvala raznovrsnost u binarnim prostorima pretrage, u ovom radu uvedena je hibridna strategija optimizacije inspirisana genetskim algoritima i strukturisana kroz ostrvski model [199]. Ovaj pristup proširuje konvencionalni Genetic Inspired Binary PSO (GIPSO) tako što u mehanizam ažuriranja populacije uvodi genetske operacije, dok se populacija deli na polu-izolovana ostrva.

Ukupna populacija podeljena je na dva ostrva, koja evoluiraju polu-nezavisno. Standardna GIPSO pravila upravljaju ažuriranjem brzina i pozicija unutar svakog ostrva. Međutim, da bi se povećala raznovrsnost i omogućila razmena informacija između ostrva, u redovnim intervalima ubacuju se nova rešenja, koja zamenjuju najlošiju česticu u svakom ostrvu.

- **Faza istraživanja (prvih 50% iteracija):** najlošija jedinka u svakom ostrvu zamenjuje se novim rešenjem dobijenim ukrštanjem i mutacijom dva nasumično izabrana člana istog ostrva. Time se podstiče unutrašnja raznovrsnost i održava istraživačka sposobnost.
- **Faza iskorišćavanja (poslednjih 50% iteracija):** zamensko rešenje nastaje kombinovanjem najboljeg rešenja iz suprotnog ostrva sa jednim slučajnim članom tekućeg ostrva, opet uz primenu ukrštanja i mutacije. Na ovaj način omogućava se širenje dobrih osobina između ostrva i jače iskorišćavanje obećavajućih regiona prostora pretrage.

Za rekombinaciju roditeljskih rešenja koristi se binarno uniformno ukrštanje: za svaku poziciju bita dete sa jednakom verovatnoćom nasleđuje vrednost od jednog od roditelja. Nakon ukrštanja primenjuje se mutacija, pri čemu se svaki bit potomka menja (flip) sa malom verovatnoćom p_m , tipično 0.01 ili 0.05.

Mutacija pomaže da se izbegne prerana konvergencija tako što uvodi slučajne perturbacije u rešenje i omogućava izlazak iz lokalnih optimuma. Tokom čitavog procesa, sve ostale čestice koje nisu označene za zamenu nastavljaju da slede standardnu GIPSO dinamiku, ažurirajući svoje brzine i pozicije na osnovu ličnih i lokalnih najboljih iskustava. Ova hibridna ostrvska strategija postiže ravnotežu između istraživačkih sposobnosti genetskih algoritama i eksploatacionih sposobnosti GIPSO pristupa.

6.4. Predloženi optimizacioni okvir

Proces optimizacije hiperparametara pomoću metaheurističkih metoda upravljan je specijalizovanim okvirom razvijenim za ovu svrhu. Ovaj okvir je nezavisan od konkretne arhitekture modela i može se primeniti na većinu algoritama optimizacije zasnovanih na populaciji.

Okvir optimizacije počinje podelom originalnog skupa podataka na trening, validacioni i test skup. Definišu se početni parametri optimizacije, uključujući broj iteracija (T), veličinu populacije agenata (N) i brojač iteracija ($t = 0$).

Proces inicijalizuje populaciju agenata, gde svaki agent predstavlja potencijalno rešenje sa određenim hiperparametrima.

U svakoj iteraciji optimizacionog ciklusa, LSTM modeli se inicijalizuju i treniraju na osnovu parametara agenata korišćenjem trening skupa. Performanse modela zatim se mere na validacionom skupu pomoću funkcije cilja, nakon čega se ažuriraju pozicije agenata.

Ciklus se ponavlja sve dok se ne dostigne maksimalan broj iteracija. Po završetku optimizacije, kao konačno rešenje biraju se modeli sa najboljim performansama.

Oni se dodatno testiraju na test skupu, a rezultati se analiziraju i predstavljaju pomoću tabela i grafikona radi interpretacije i izveštavanja.

6.5. Postavka simulacije životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

Za evaluaciju predložene metodologije predviđanja životnog ciklusa baterija korišćen je javno dostupan skup podataka objavljen na platformi Kaggle [201]. Podaci su obrađeni, a reprezentativni uzorak je iskorišćen za predviđanje preostalih ciklusa. Podaci su modelovani kao vremenska serija, gde se koristi skup od N vremenskih zaostataka (lags) kao ulaz za predviđanje preostalih ciklusa baterije.

Sprovedena su dva eksperimenta:

- predviđanje jednog ciklusa unapred,
- predviđanje tri ciklusa unapred.

Za predviđanja su korišćene mreže zasnovane na LSTM arhitekturi. Od ukupnih podataka, 70% je korišćeno za treniranje modela, 20% za validaciju tokom optimizacije hiperparametara, a poslednjih 10% je izdvojeno za završnu evaluaciju.

Takođe je sprovedena komparativna analiza između predloženog GIBPSO

algoritma i više savremenih optimizacionih metaheuristika, pod identičnim uslovima. Testirani algoritmi uključuju originalni PSO [10], metodu promenljive pretrage susedstva (VNS) [202] i algoritam krijesnica (FA) [203]. Pored njih, uključeni su i noviji algoritmi kao što su algoritam optimizacije čimpanza (ChOA) [204] i COLSHADE [205].

Optimizacije su imale trajanje od šest iteracija, sa po pet agenata dodeljenih za svaku optimizacionu sesiju. Sve simulacije su ponovljene 30 puta kako bi se osigurala statistička validacija i pouzdanost rezultata. Optimizatori su imali zadatak da pronađu optimalna podešavanja hiperparametara u unapred definisanom, empirijski određenom opsegu.

Tokom optimizacije praćen je skup standardnih regresionih metrika [206], dok je srednja kvadratna greška (MSE) korišćena kao funkcija cilja. Pored nje, praćen je i koeficijent determinacije (R^2) kao indikatorska funkcija. Izračunavanje svake metrike definisano je sledećim formulama:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \hat{p}_i)^2} \quad (6.6)$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |p_i - \hat{p}_i| \quad (6.7)$$

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \frac{(p_i - \hat{p}_i)^2}{p_i} \quad (6.8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (6.9)$$

gde p_i i \hat{p}_i označavaju stvarne (posmatrane) i predviđene vrednosti za i -ti podatak, \bar{p} predstavlja aritmetičku sredinu stvarnih podataka, a n je veličina uzorka. Dodatno je korišćena i metrika indeksa slaganja (IoA) [207], radi boljeg poređenja između modela:

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 + |p_i - \hat{p}_i|^2} \quad (6.10)$$

6.6. Rezultati simulacije životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

U ovom odeljku predstavljeni su rezultati sprovedenih simulacija i upoređene performanse predloženog GIBPSO algoritma sa nekoliko referentnih optimizacionih

algoritama. Takođe je sprovedena statistička validacija radi procene pouzdanosti rezultata.

6.6.1. Ukupni rezultati optimizacije životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

Rezultati pokazuju da predloženi GIBPSO algoritam dosledno nadmašuje referentne optimizatore u pogledu tačnosti i stabilnosti.

Konkretno, GIBPSO postiže niže vrednosti MSE i više vrednosti R^2 u zadacima predviđanja i jednog i tri ciklusa unapred.

Ovo ukazuje da hibridizacija genetskih operatora sa dinamikom PSO, u kombinaciji sa ostrvskim modelom, obezbeđuje superiornu ravnotežu između istraživanja i iskorišćavanja, omogućavajući algoritmu da izbegne lokalne minimume i da se efikasno konvergira ka obećavajućim regionima prostora pretrage.

Komparativna analiza sa drugim algoritmima ističe prednosti predloženog metoda:

- Standardni PSO postiže prihvatljive rezultate, ali često pati od prerane konvergencije.
- VNS i FA obezbeđuju razumnu sposobnost istraživanja, ali njihovi mehanizmi iskorišćavanja su slabiji, što dovodi do manje tačnih prognoza.
- ChOA i COLSHADE pokazuju konkurentne performanse u pojedinim simulacijama, ali beleže veću varijansu između ponavljanja, što smanjuje pouzdanost.

6.6.2. Statistička validacija životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

Radi provere pouzdanosti rezultata, sprovedeni su statistički testovi kroz 30 nezavisnih simulacionih ponavljanja.

Za poređenje distribucija grešaka u predviđanju između GIBPSO i drugih algoritama korišćen je Wilcoxon-ov test sa rangovima. Rezultati testa potvrđuju da je superiornost GIBPSO algoritma statistički značajna ($p < 0.05$) u većini poređenja.

Dodatno, sprovedena je analiza varijanse (ANOVA) kako bi se procenilo da li su razlike između algoritama statistički značajne.

Naknadna post hoc poređenja potvrdila su robusnost GIBPSO u svim evaluacionim metrima.

6.6.3. Performanse predviđanja životnog ciklusa punjivih litijum jonskih baterija

Kada se primeni na skup podataka o životnom ciklusu baterija, LSTM modeli optimizovani GIBPSO algoritmom ostvaruju visoku tačnost u predviđanju preostalog korisnog trajanja.

Predviđanja jednog ciklusa unapred pokazuju posebno niske stope grešaka, dok predviđanja tri ciklusa unapred prirodno uključuju nešto veću neizvesnost, ali i dalje zadržavaju znatno veću tačnost u poređenju sa referentnim metodama.

Rezultati naglašavaju praktičnu vrednost integracije naprednih metaheurističkih optimizacionih tehnika sa LSTM modelima u zadacima predviđanja skladištenja energije.

Ovakav pristup ne samo da poboljšava tačnost prognoza, već i povećava njihovu robusnost, čineći ih pogodnijim za primenu u realnim sistemima obnovljive energije, gde je pouzdano donošenje odluka od ključnog značaja.

6.7. Modifikovani metaheuristički optimizacioni pristup za predviđanje životnog ciklusa punjivih litijum-jonskih baterija: Sumarna razmatranja i buduća istraživanja

U ovom radu predložen je modifikovani metaheuristički optimizacioni pristup za predviđanje preostalog korisnog životnog ciklusa punjivih litijum-jonskih baterija. Predloženi pristup integriše genetske operatore raznovrsnosti u okvir optimizacije rojem čestica, strukturisan kroz ostrvski model, sa ciljem poboljšanja podešavanja hiperparametara LSTM mreža [210].

Glavni nalazi istraživanja mogu se sumirati na sledeći način:

- Predloženi GIBPSO algoritam pokazuje superiornu tačnost predviđanja u poređenju sa referentnim optimizatorima, postizujući niži MSE i viši R^2 u više različitih zadataka predviđanja.
- Statističke analize potvrđuju značaj ovih poboljšanja i naglašavaju robusnost predloženog pristupa.
- LSTM modeli optimizovani predloženim algoritmom tačno opisuju trendove degradacije baterija i preostale životne cikluse, čime omogućavaju donošenje kvalitetnijih odluka u aplikacijama skladištenja energije iz obnovljivih izvora.

Ovo istraživanje doprinosi sve većem broju radova na preseku veštačke

inteligencije, metaheurističke optimizacije i sistema obnovljive energije. Ponuđena je skalabilna metodologija za predviđanje zdravstvenog stanja baterija, koja pruža dragocene uvide u dugoročnu efikasnost tehnologija skladištenja energije.

Ipak, određena ograničenja ostaju. Korišćeni skup podataka, iako javno dostupan i reprezentativan, ograničen je po obimu. Buduća istraživanja treba da uključe veće i raznovrsnije skupove podataka, kao i da ispituju primenu predloženog optimizacionog okvira na druge tipove problema predviđanja izvan oblasti zdravlja baterija.

Sa praktične tačke gledišta, nalazi ovog rada ukazuju da hibridne strategije metaheurističke optimizacije mogu igrati ključnu ulogu u unapređenju pouzdanosti i efikasnosti sistema obnovljive energije. Kako skladištenje energije postaje sve centralniji element u prelasku ka održivim elektroenergetskim mrežama, tačne i robusne metode predviđanja ostaju jedan od glavnih faktora uspeha ove globalne tranzicije.

7. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada razvijen je i analiziran pametni sistem za praćenje solarne energije zasnovan na Internetu stvari, koji omogućava pouzdano i kontinuirano praćenje ključnih parametara rada fotonaponskog sistema. Integracijom senzora napona i struje, mikrokontrolera i bežične komunikacije ostvareno je prikupljanje podataka u realnom vremenu, njihova lokalna vizualizacija na LCD ekranu i daljinski pristup putem IoT platforme u oblaku.

Eksperimentalni rezultati pokazuju da predloženi sistem uspešno prati promene napona, struje, temperature i vlažnosti u različitim vremenskim uslovima, što omogućava detaljnu analizu rada solarnog panela tokom vremena. Uočena je dobra usklađenost između stvarnih merenja i podataka prikupljenih putem IoT sistema, čime je potvrđena tačnost i pouzdanost predloženog rešenja. Sistem pruža korisnicima pravovremene informacije o performansama, što može doprineti ranom otkrivanju nepravilnosti u radu i smanjenju troškova održavanja.

Primena IoT tehnologije u solarnim energetske sistemima predstavlja značajan korak ka razvoju pametnih i održivih energetske mreža. Automatizovano praćenje i analiza podataka omogućavaju efikasnije upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije, kao i bolju iskorišćenost dostupnih obnovljivih resursa. Predloženi sistem je fleksibilan i može se prilagoditi različitim veličinama i tipovima solarnih instalacija, od manjih kućnih sistema do većih komercijalnih rešenja.

Iako je razvijeni sistem prvenstveno fokusiran na nadzor i vizualizaciju podataka, on predstavlja solidnu osnovu za dalji razvoj naprednijih funkcionalnosti. Budući rad može uključiti implementaciju algoritama za predikciju proizvodnje energije na osnovu vremenskih uslova, automatsku kontrolu opterećenja, kao i integraciju dodatnih senzora i hibridnih izvora energije. Na taj način, IoT-bazirani sistemi za praćenje solarne energije mogu imati ključnu ulogu u unapređenju energetske efikasnosti i razvoju održivih energetske rešenja budućnosti.

8. LITERATURA

- [1] Shahid, M.T. , Hasan, M.N., Hassan, M.M. and Alam, M. (2023). IoT-enabled smart solar energy management system for enhancing smart grid power quality and reliability, *SN Computer Science*, 4(6), art. No. 805.
- [2] Spanias, A. S. (2017). Solar energy management as an Internet of Things application. In *2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)* (pp. 1-4).
- [3] Sahu, R. K., & Ghosh, A. (2022). Maximum Power Generation From Solar Panel By Using P & O MPPT. In *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCCSP)* (pp. 1-4). IEEE.
- [4] Patil, S.M., Vijayalashmi, M. and Tapaskar, R. (2017). IoT based solar energy monitoring system. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, (pp. 1574-1579).
- [5] Sarswat, S., Yadav, I. and Kumar Maurya, S. (2019). Real Monitoring of Solar PV Parameter Using IoT, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(1S), pp. 267-271.
- [6] Neelima, K. and Pranavi, B. N. (2022). Integration of Solar PV into Grid Using a New UPQC with Differential Inverter Control. *Journal of Optoelectronics Laser*, 41(9), pp. 273-280.
- [7] Goud, B. S., Rao, B. L., Reddy, B. N., Rajesh, N., Anjan, B., & Reddy, C. R. (2020). Optimization techniques in PV-wind based distribution generation – a brief review. In *2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)* (pp. 1-6).
- [8] Jiju, K., Ramesh, P. (2014). Development of Android-based online monitoring and control system for Renewable Energy Sources. In *Computer, Communications and Control Technology (I4CT): International Conference in IEEE*, (pp. 372-375).
- [9] Neelima, K., Kumar, A. M., & Jagan, V. (2024). An Adaptive DC Link Voltage Three-Phase Photovoltaic Structure for CPI Voltage Fluctuations. In *Emerging Technologies & Applications in Electrical Engineering: Proceedings of the International Conference on Emerging Technologies & Applications in Electrical Engineering (ETAEE-2023)*, Raipur, India (p. 136). CRC Press.
- [10] Siddula, S., Dennis Gleeson, C. and Geetha Kumari, P. (2020). Solar Panel Position Control and Monitoring System For Maximum Power Generation,. In *International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and*

- Electronics (ICSTCEE), Bengaluru, India.* (pp. 169-174), doi: [10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277293](https://doi.org/10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277293).
- [11] Turkenburg W.C., Energy and the challenge of sustainability, Chapter 7- renewable energy technologies, <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/chapter7.pdf>
- [12] Forouadstan, D. and Dees, O. *Solar Power and Sustainability in Developing Countries Saeed*, Dostupno na: <http://files.do-not-link.ucd.edu/docs/cere/Solar%20Power%20and%20Sustainability%20in%20Developing%20Countries.pdf> (Datum pristupa: 17 Avgust 2024).
- [13] *Solar Energy Technologies*. Dostupno na: <https://www.seia.org/sites/default/files/inline-files/SEIA-Solar-Energy-Technologies-Factsheet-2018-April.pdf>
- [14] Solar energy: a renewable energy source. Dostupno na: <https://gcepvnvis.nic.in/PDF/solarp.pdf> (Datum pristupa: 18 Avgust 2023).
- [15] Rhodes Ch. J. (2010). Solar energy: principles and possibilities, *Science Progress* 93(1), pp. 37–112.
- [16] Jing Cheng, J., *Application of solar energy*, Dostupno na: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/11005/Li_jingcheng.pdf?sequence=1 (Datum pristupa: 17 Avgust 2024).
- [17] Raviaraj, P. (2017). Solar energy for sustainable development in developing countries, *Ceylon Journal of Science*, 46(2), <http://doi.org/10.4038/cjs.v46i2.7424>
- [18] *Sustainable Energy Handbook Capacity4dev*. [online] Dostupno na: https://capacity4dev.europa.eu/groups/public-energy/info/sustainable-energy-handbook_en (Datum pristupa: 12 Decembar 2024).
- [19] Danish, S.N. (n.d.). *Introduction to Solar Energy Technologies*. Dostupno na: https://est.ksu.edu.sa/sites/est.ksu.edu.sa/files/imce_images/First%20Series%20by%20Dr.Noman.pdf. (Datum pristupa: 17 Avgust 2024).
- [20] Pastuszak, J. and Wegierek, P. (2022). Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. *Materials*, 15(16), art. No. 5542. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15165542.1-5>
- [21] Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S.W. (2013). Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. *IEEE J. Photovolt*, 3, pp. 1184–1191
- [22] Sharma, P. and Goyal, P. (2020). Evolution of PV technology from conventional to nano-materials. *Mater. Today Proc.*, 28, pp. 1593–1597.
- [23] Marques Leinemhias, R.A., Torres, J.P.N., de Melo Cunha, J.P. (2022). A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications. *Energies*, 15, art. No. 1823.
- [24] Kuczyn'ska-Lazewska, A., Klugmann-Radziemska, E. and Witkowska, A. (2021). Recovery of Valuable Materials and Methods for Their Management When Recycling Thin-Film CdTe Photovoltaic Modules. *Materials*, 14, art. No. 7836.

- [25] Dunlap-Shohl, W.A., Zhou, Y., Padture, N.P. and Mitzi, D.B. (2019). Synthetic approaches for halide perovskite thin films. *Chem. Rev.*, 119, pp. 3193–3295.
- [26] Peumans, P., Yakimov, A. and Forrest, S.R. (2003). Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells, *J. Appl. Phys.*, 93, pp. 3693–3723.
- [27] Lim, D.H., Ha, J.W., Choi, H., Yoon, S.C., Lee, B.R. and Ko, S.J. (2021). Recent progress of ultra-narrow-bandgap polymer donors for NIR-absorbing organic solar cells. *Nanoscale Adv.*, 3, pp. 4306–4320.
- [28] Liu, Y. and Chen, Y. (2020). Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells. *Adv. Mater.*, 32, art. No. 1805843.
- [29] Hu, Z., Wang, J., Ma, X., Gao, J., Xu, C., Yang, K. and Zhang, F. (2020). A critical review on semitransparent organic solar cells. *Nano Energy* 2020, 78, art. No. 105376.
- [30] Keis, K., Magnusson, E., Lindström, H., Lindquist, S.E. and Hagfeldt, A. A (2002). 5% efficient photoelectrochemical solar cell based on nanostructured ZnO electrodes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 73, pp. 51–58.
- [31] Singh, B.P., Goyal, S.K. and Kumar, P. (2021). Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Mater. Today Proc.*, 43, pp. 2843–2849.
- [32] Law, M., Greene, L.E., Johnson, J.C., Saykally, R. and Yang, P. (2005). Nanowire dye-sensitized solar cells. *Nat. Mater.*, 4, pp. 455–459.
- [33] Mozaffari, S., Nateghi, M.R. and Zarandi, M.B. (2017). An overview of the Challenges in the commercialization of dye-sensitized solar cells. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 71, pp. 675–686.
- [34] Kim, H.S., Lee, C.R., Im, J.H., Lee, K.B., Moehl, T., Marchioro, A., Moon, S.J., Humphry-Baker, R., Yum, J.H., Moser, J.E. et al. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Sci. Rep.*, 2, art. No. 591.
- [35] Lee, M.M.; Teuscher, J.; Miyasaka, T.; Murakami, T.N.; Snaith, H.J. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Science* 2012, 338, 643–647.
- [36] Tian, J. and Cao, G. (2013). Semiconductor quantum dot-sensitized solar cells. *Nano Rev.*, 4, art. No. 22578.
- [37] Bera, D.; Qian, L.; Tseng, T.-K.; Holloway, P.H. Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review. *Materials* 2010, 3, 2260–2345.
- [38] Yuan, J., Hazrika, A., Zhao, Q., Ling, X., Moot, T., Ma, W. and Luther, J.M. (2020). Metal halide perovskites in quantum dot solar cells: Progress and prospects., *Joule*, 4(6), pp. 1160–1185. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120301756>
- [39] Jasim, K.E. (2015). Quantum dots solar cells, *Sol. Cells-New Approaches Rev.*, 3,

- pp. 303–331.
- [40] Yamaguchi, M., Takamoto, T., Araki, K. And Ekins-Daukes, N. (2005). Multi-junction III–V solar cells: Current status and future potential, *Sol. Energy*, 79, pp. 78–85.
- [41] Gao, H., Yang, R. and Zhang, Y. (1985). Improving Radiation Resistance of GaInP/GaInAs/Ge Triple-Junction Solar Cells Using GaInP Back-Surface Field. In the Middle Southeast. *Materials*, 13.
- [42] Alami, A.H., Ramadan, M., Abdelkareem, M.A., Alghawi, J.J., Altahatwi, N.T., Mohamad, H.A. and Olabi, A.G. (2022). Novel and practical photovoltaic applications. *Chem. Sci. Eng. Prog.*, 29, art. No. 121028.
- [43] Azzouzi, G. and Tazibt, W. (2013). Improving silicon solar cell efficiency using the impurity photovoltaic effect, *Energy Procedia*, 41, pp. 40–49.
- [44] Lopez, E., Marti, A., Antolin, E. and Luque, A. (2020). On the Potential of Silicon Intermediate Band Solar Cells, *Energies*, 13, art. No. 3044.
- [45] Wilkins, M.M., Dumitrescu, E.C. and Krich, J.J. (2020). Material quality requirements for intermediate band solar cells. *IEEE J. Photovolt.*, 10, pp. 467–474.
- [46] Wolf, M. (2014). Modeling of Annealing Processes for Ion-Implanted Single-Crystalline Silicon Solar Cells. *Ph.D Thesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen and Nuremberg, Bavaria, Germany.* Dostupno na: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/deliver/index/docId/4906/file/WolffDissertation2014.pdf> (datum pristupa: 13 Decembar 2023).
- [47] Ushasree, P.M. and Bora, B. (2019). Chapter 1: Silicon solar cells. In *Solar Energy Capture Materials; The Royal Society of Chemistry: London, UK*, (pp. 1–55).
- [48] Billewicz, P., Wegierek, P., Grudniewski, T. and Turek, M. (2017). Application of ion implantation for intermediate energy levels formation in the silicon-based structures dedicated for photovoltaic purposes. *Acta Phys. Pol.*, 132, pp. 274–277.
- [49] Wu, C., Wang, K., Batmunkh, M., Bai, A.S., Yang, D., Jiang, Y., Hou, Y., Shapter, J.G. and Priya, S. (2020). Multifunctional nanostructured materials for next generation photovoltaics. *Nano Energy*, 70, art. No. 104480.
- [50] Das, S., Pandey, D., Thomas, J. and Roy, T. (2019). The role of graphene and other 2D materials in solar photovoltaics. *Adv. Mater.*, 31, art. No. 1802722.
- [51] Li, X., Zhu, H., Wang, K., Cao, A., Wei, J., Li, C., Jia, Y., Li, Z., Li, X. and Wu, D. (2010). Graphene-on-silicon Schottky junction solar cells. *Adv. Mater.*, 22, pp. 2743–2748.
- [52] Geim, A. and Novoselov, K. (2007). The rise of graphene. *Nat. Mater.*, 6, pp. 183–191.
- [53] Mahmoudi, T., Wang, Y. and Hahn, Y.B. (2018). Graphene and its derivatives for solar cells application. *Nano Energy*, 47, pp. 51–65.

- [54] Cai, J., Ruffieux, P., Jaafar, R., Bieri, M., Braun, T., Blankenburg, S., Muoth, M., Seitsonen, A.P., Saleh, M., Feng, X. et al. (2010). Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons, *Nature*, 466, pp. 470–473.
- [55] Eswaraiah, V., Aravind, S.S.J. and Ramaprabhu, S. (2011). Top-down method for synthesis of highly conducting graphene by exfoliating graphene oxide using focused solar radiation, *J. Mater. Chem.*, 21, pp. 6800–6803.
- [56] Jia, G., Plentz, J., Dellith, J., Dellith, A., Wahyuno, R.A. and Andra, G. (2019). Large Area Graphene Deposition on Hydrophobic Surfaces, Flexible Textiles, Glass Fibers, and 3D Structures, *Coatings*, 9, art. No. 183.
- [57] Wang, Y., Chen, X., Zhong, Y., Zhu, F. and Loh, K.P. (2009). Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices, *Appl. Phys. Lett.*, 95, art. No. 209.
- [58] *Concentrating Solar-Thermal Power Basics* (n.d.). Energy.gov.
- [59] Mahdi, M. S., & Khudheyer, A. F. (2021). Central Receivers Design in Concentrated Solar Thermal Power Plants: A review. *IOP Conference Series*.
- [60] Machida, G. T., Chowdhury, S., Arscott, R., Chowdhury, S. P. and Kibaraa, S. (2011). Concentrating Solar Thermal Power Technologies: A review. *In Annual IEEE India Conference* (pp. 1-6).
- [61] Manuel, R.A. (2007). Concentrating Solar Thermal Power, *In CIEMAT-Plataforma Solar de Almeria, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*.
- [62] Islam, R., Bhuiyan, A. B. M. N. and Ullah, M. W. (2017). An overview of Concentrated Solar Power (CSP) technologies and its opportunities in Bangladesh, *An Overview of Concentrated Solar Power (CSP) Technologies and Its Opportunities in Bangladesh*. <https://doi.org/10.1109/ceace.2017.7913020>
- [63] Belgasim, B., Aldali, Y., Abdunnabi, M. and Hossin, K. (2018). The potential of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Libya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.045>
- [64] Becker, M., Meinecke, W., Geyer, M. A. and Ferrière, A. (2002). Solar Thermal Power Plants. *In VGB Congress Power Plants 2001, Brussels* (pp. 1-8).
- [65] Poullikkas, A., Hadjipaschalis, I. and Kourti, G. (2013). A comparative overview of wet and dry cooling systems for Rankine cycle-based CSP plants. *Trends in Heat & Mass Transfer*, 13, pp. 1-24.
- [66] Soomro, M. I., Mengal, A., Memon, Y. A., Khan, M. W. A., Shafiq, Q. N., and Mirjat, N. H. (2019). Performance and Economic Analysis of Concentrated Solar Power Generation for Pakistan, *Processes*, 7(9), art. No. 575. <https://doi.org/10.3390/pr7090575>
- [67] Santamarta, J. (n.d.). *Desert Foundation endorses King Saud University Point Focus Fresnel Collector*. HELIOSCSP.
- [68] Tawaleh, M., Al-Othman, A., Kaifiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F. and Alkasrawi, M. (2020). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A

- critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, 759, art. No. 143528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.
- [69] Bošnjaković, M. and Tadijanović, V. (2019). Environment impact of a concentrated solar power plant. *Tehnički glasnik*, 13(1), pp. 68-74. <https://doi.org/10.31803/tg-20180911085644>.
- [70] MacGill, I. and Watt, M. (2015). Chapter 10: Economics of Solar PV Systems with Storage, in *Main Grid and Mini-Grid Settings*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124095403000104>. (Datum pristupa: 23 Septembar 2025).
- [71] Energy5. (n.d.) The Economics of Concentrated Solar Power CSP Systems Cost Profitability and ROI. Dostupno na: <https://energy5.com/the-economics-of-concentrated-solar-power-csp-systems-cost-profitability-and-roi/> (Datum pristupa: 23 Septembar 2025).
- [72] James, A. (2021). Global Journal of Engineering and Architecture Solar Photovoltaic Energy: Advantages and Disadvantages. Dostupno na: <https://www.globalscienceresearchjournals.org/articles/solar-photovoltaic-energy-advantages-and-disadvantages.pdf>. (Datum pristupa: 23 Septembar 2025).
- [73] www.linkedin.com. (n.d.). An Overview of Concentrated Solar Power (CSP). Dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/overview-concentrated-solar-power-csp-engineeine> (Datum pristupa: 23 Septembar 2025).
- [74] Kaplan, N., Nithin, K.C., and Chiranth, K.N. (2022). Challenges and opportunities in solar photovoltaic system. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.390>.
- [75] Ramde, E.W., Tchao, E.T.E., Fiagbe, Y.A.K., Kpony, J.J. and Atuah, A.S. (2020). Pilot Low-Cost Concentrating Solar Power Systems Deployment in Sub-Saharan Africa: A Case Study of Implementation Challenges. *Sustainability*, 12(15), art. No. 6223. <https://doi.org/10.3390/su12156223>.
- [76] Mughal, S. N., Sood, Y. R., & Jarial, R. K. (2018). A review of solar photovoltaic technology and future trends. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 4(1), pp. 227-235.
- [77] Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (n.d.). Renewable Energy: Our World in Data. Dostupno na: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>. (Datum pristupa: 23 Septembar 2025).
- [78] Jaber, S., Ameli, M., Hassan Mahdavi, S.M. and Bhourri, N. (2025). A methodological framework for resilience as a service (raas) in multimodal urban transportation networks. *Sustainable Cities and Society*, 124, art. No. 106276. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106276>
- [79] Rekabi, F., Mousavi Nejad Souq, S.S. Schuelke-Leech, B.A. and Mirhassani, M. (2025). Enhancing public transportation sustainability: Insights from electric bus scheduling and charge optimization. *Sustainable Cities and Society*, art. No.

- 106298.
- [80] Elsans, M., Al-Hatam, M., Tkirut, M., and Bedawi, S. (2024). Intelligent transportation systems for sustainable smart cities. *Transportation Engineering*, 16(17), art. No. 100522. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100252>
- [81] Chen G. and Zhang, W. (2024). Intelligent transportation systems: Machine learning approaches for urban mobility in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 107, art. No. 105369.
- [82] Zhang, Z., Chai, H. and Guo, Z. (2023). Quantitative resilience assessment of the network-level metro rail service's responses to the covid-19 pandemic, *Sustainable Cities and Society*, 89, art. No. 104315.
- [83] Sajjad, M., Chan, C.L. J., and Chopra, S.S. (2021). Rethinking disaster resilience in high-density cities: Towards an urban resilience knowledge system, *Sustainable Cities and Society*, 69, art. No. 102580.
- [84] Shahbazi, A., Aghaei, J., Pirouzi, S., Shafe-Khah, M. and Catalão, J.P.S. (2021). Hybrid stochastic/robust optimization model for resilient architecture of distribution networks against extreme weather conditions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, art. No. 106576.
- [85] Afzal, S., Mokhtis, H., Ilias, H.A., Mansor, N.N. and Shareef, H. (2020). State-of-the-art review on power system resilience and assessment techniques. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(25), pp. 6107–6121.
- [86] Dugon, J., Blyle, D. and Mobasheri, S. (2023). Social vulnerability to long-duration power outages, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 85, art. No. 103501.
- [87] Luo, D., Xia, Y., Zeng, Y., Li, C., Zhou, B., Yu, H. and Wu, Q. (2018). Evaluation method of distribution network resilience focusing on critical loads. *IEEE Access*, 6, pp. 61533–61539.
- [88] Bobrnan, A.D., Abdulla, A. and Morgan, M.G. (2022). Individual and collective strategies to limit the impacts of large power outages of long duration. *Risk Analysis*, 43(2), pp. 544–560.
- [89] Do, V., McBrien, H., Flores, N.M. et al. Spatiotemporal distribution of power outages with climate events and social vulnerability in the USA. *Nature Communications*, 14, art. No. 2470. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38084-62470>.
- [90] Dehbozorgi, M.R., Rastegar, M. and Sami. M. (2022). Data mining-based cause identification of momentary outages in power distribution systems. *Sustainable Cities and Society*, 77, art. No. 103587. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103587>
- [91] Emmerson, G. (2018). *Solar-powered server for a traffic signal*. US Patent Aug. 30 2018. US Patent App. 15/441, 524.
- [92] Jones, J., Marner, B., Williams, J. and Minna, P. (2002). *Apparatus and method for traffic signal flash mode during power outages*, Mar. 7 2002. US Patent App.

- 09/845, 507.
- [93] Kalingapai, S., Harambeachilar, J.C., Rumraaj, L.S.K., De Silva, J.H.S.R., Fjiwurareanda, D.P.D., De Silva, L.D.L., Abeymama, L.T., Chameera, K.H.G.G., Divasneya, B.P., Atneayake, A.M.C.R. et al. (2006). A new approach for advanced solar powered traffic light system. *In First International IEEE Conference on Industrial and Information Systems*, (pp. 208–210).
- [94] Wang, X., Shahidehpour, M., Jiang, Ch. and Li. Zh. (2018). Resilience enhancement strategies for power distribution network coupled with transportation system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), pp. 4068–4079.
- [95] Wang, Y., Xu, Y., He, J. and Lee. S.J. (2022). Overview of collaborative response between the power distribution network and urban transportation network coupled by electric vehicle cluster under unconventional events, *Energy Conversion and Economics*, 3(6), pp. 360–367.
- [96] Li, J., Xu, X., Yan, Zh., Wang, T., Shahidehpour, M., Xie, B. and Luo, X. (2024). Resilient resource allocations for multi-stage transportation-power distribution system operations in hurricanes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(4), pp. 3994-4009. <https://doi.org/0.1109/TSG.2024.3370307>
- [97] Che, L., Zhang, J., Faurabound, M. and Shahidehpour, M. (2025) Mobile Microgrids for Enhancing the Electricity Grid Resilience in Constrained Operations of Electricity and Transportation Networks, *In Wang, J. (eds) Power Grid Resilience. Power Electronics and Power Systems, Springer Cham* (pp. 261–365). https://doi.org/10.1007/978-3-031-73978-1_7.
- [98] Zhou, K., Fu, Ch., Feng, B. and Wu, L. (2024). A bi-level mobile energy storage pre-positioning method for distribution network coupled with transportation network against typhoon disaster, *IET Renewable Power Generation*, 18(16), pp. 3776–3787.
- [99] Salehi Boroujeni, M., Oroffen, E.E. and Neel, J-Ch. (2022). A solar backup system to provide reliable energy in presence of unplanned power outages, *Journal of Energy Storage*, 47, art. No. 103653.
- [100] Javed, M.Sh., Juracz, J., Ruggles, T.H., Khan, I. and Ma. T. (2023). Designing off-grid renewable energy systems for reliable and resilient operation under stochastic power supply outages, *Energy Conversion and Management*, 294, art. No. 117605.
- [101] Guènieme Kafando, J., Yameogue, D. and Houdji, E.T. (2024). Review on sizing and management of stand-alone pv/wind systems with storage. *Heliyon*, 10(18), art. No. E38080.
- [102] Khatib, T., Ibrahim, I.A. and Mohamed. A. (2016). A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 120, pp. 430–448.
- [103] Josla, H.R. (2023). Off-grid solar PV system design and analysis in isolated island

- for sustainable energy access: A case study in Sukun Island, Indonesia, *Journal of Solar Energy Research*, 8(3), pp. 1609–1621, 2023.
- [104] Rezaamiztaar, M., Barrett, E., Monaghan, R.F.D. and Duffy, M. (2024). A stochastic method for behind-the-meter pv-battery energy storage systems sizing with degradation minimization by limiting battery cycling, *Journal of Energy Storage*, 68, art. No. 111199.
- [105] Tikliwali, V.A., Singh, S.V. and Gupta, H.O. (2021). Multi-objective optimisation of a grid-connected hybrid pv-battery system considering battery degradation, *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), art. No. 1769–1779.
- [106] Zarei, A., Ghaffarzadeh, N., Shahnia, F., Shafe-Khah, M. and Mirjalili, S.A. (2022). Integrated seasonal demand response for ac-opt with precise and innovative modeling of thermal energy storage and optimal ees allocation. Dostupno na: SSRN 5124670. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5142670>
- [107] Jalil, M., Sedighzadeh, M. and Fini, A.S. (2021). Stochastic optimal operation of a microgrid based on energy hub including a solar-powered compressed air energy storage system and an ice storage conditioner, *Journal of Energy Storage*, 33, art. No. 102089. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102089>
- [108] Nagata, T. (2007). Vehicular traffic through a sequence of green-wave lights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380, pp. 503–511.
- [109] Pervez, L., Junaid Arif, M., Nauman, M., Rani, R. and Hanif, S. (2020). A new robust real-time video streaming analysis algorithm for effective green wave route for traffic control application. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, 18(9), pp. 37-45. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4131666>
- [110] Zarei, A., Ghaffarzadeh, N., Shahnia, F. and Shafe-Khah, M., (2024). Optimal scheduling of demand response-based ac opt by smart power grid flexible loads considering user convenience, lstm-based load forecasting, and ders uncertainties. *IEEE Access*, 12, pp. 171617–171633.
- [111] Ltemasi, M. and Behzooie, H. (2024). Predicting the type of road accidents based on air temperature in iran: a case study of roads in qazvin province, *Heliyon*, 0(7), art. No. e28536. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28536>.
- [112] <https://www.renewables.ninja>. Data of solar photovoltaic power, year = 2019, note=Accessed:2024-11-07.
- [113] <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=iran>. Solar resource maps gis data, year = 2021, note = Datum pristupa:2024-12-03.
- [114] Taylor, M. (2009). *What is sensitivity analysis*. Consortium YHE: University of York, pp. 1–8.

- [115] Höök, M. and Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*, 52, pp. 797–809.
- [116] Hayat, M.B., Ali, D., Monyake, K.C.; Alagha, L. And Ahmed, N. (2019). Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*, 43, pp. 1049–1067.
- [117] Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A.Z., Salman, H.M. and Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, 20, art. No. 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- [118] Simankov, V., Buchatskiy, P., Kazak, A., Teploukhov, S., Onishchenko, S., Kuzmin, K. and Chetyrbok, P. (2024). A Solar and Wind Energy Evaluation Methodology Using Artificial Intelligence Technologies. *Energies*, 17(2), art. No. 416. <https://doi.org/10.3390/en17020416>
- [119] European Parliament and Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources (Recast)*. Text with EEA relevance; European Parliament and Council of the European Union: Brussels, Belgium.
- [120] European Commission. (2018). *EU's Revised Renewable Energy Directive*. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj> (datum pristupa: 31 Octobar 2024).
- [121] Lim, B. and Zohren, S. (2021). Time-series forecasting with deep learning: a survey. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379, art. No. 20200209.
- [122] Kataray, T., Nitesh, B., Yarram, B., Sinha, S., Cuce, E., Shaik, S., Vigneshwaran, P. and Roy, A. (2023). Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges—A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, art. No. 103363.
- [123] Khalid, M. (2024). Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*, 51, art. No. 101299.
- [124] Berta, R., Dabbous, A., Lazzaroni, L., Pau, D. and Bellotti, F. (2024). Developing a TinyML Image Classifier in a Hour. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 5, pp. 946–960.
- [125] Ficco, M., Guerriero, A., Milite, E., Palmieri, F., Pietrantuono, R. and Russo, S. (2024). Federated learning for IoT devices: Enhancing TinyML with on-board training. *Information Fusion*, 104, art. No. 102189. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102189>
- [126] Elhanashi, A., Dini, P., Saponara, S. and Zheng, Q. (2024). Advancements in TinyML: Applications, Limitations, and Impact on IoT Devices. *Electronics*, 13, art. No. 3562.
- [127] Medsker, L. and Jain, L.C. (1999). *Recurrent Neural Networks: Design and*

- Applications*, CRC Press:Boca Raton, FL, USA.
- [128] Bischl, B., Binder, M., Lang, M., Pielok, T., Richter, J., Coors, S., Thomas, J., Ullmann, T., Becker, M., Boulesteix, A.L. et al. (2023). Hyperparameter optimization: Foundations, algorithms, best practices, and open challenges. *Wiley Interdisciplinary Review: WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 13, art. No. e1484.
- [129] Alazemi, T., Darwish, M. and Radi, M. (2024). Renewable energy sources integration via machine learning modelling: A systematic literature review. *Heliyon*, 10, art. No. e26088. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26088>
- [130] Khurshid, H., Mohammed, B.S., Al-Yacoubya, A.M., Liew, M. and Zawawi, N.A.W.A. (2024). Analysis of hybrid offshore renewable energy sources for power generation: A literature review of hybrid solar, wind, and waves energy systems. *Developments in the Built Environment*, 19, art. No. 100497. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100497>
- [131] Bacanin, N., Jovanovic, L., Zivkovic, M., Kandasamy, V., Antonijevic, M., Deveci, M. and Strumberger, I. (2023). Multivariate energy forecasting via metaheuristic tuned long-short term memory and gated recurrent unit neural networks. *Information Sciences*, 642, art. No. 119122. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119122>
- [132] Park, K., Yim, J., Lee, H., Park, M. and Kim, H. Real-time solar power estimation through rnn-based attention models. *IEEE Access*, 12, pp. 62502–62510. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3233951>
- [133] Zameer, A., Jaffar, F., Shahid, F., Muneeb, M., Khan, R. and Nasir, R. (2023). Short-term solar energy forecasting: Integrated computational intelligence of LSTMs and GRU, 18(10), art. No. e0285410. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285410>
- [134] Moradzadeh, A., Moayyed, H., Mohammadi-Ivatloo, B., Vale, Z., Ramos, C. and Ghorbani, R. (2023). A novel cyber-Resilient solar power forecasting model based on secure federated deep learning and data visualization. *Renewable Energy*, 211, pp. 697–705. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.055>
- [135] Salman, D., Direkoglu, C., Kusaf, M. and Fahrioglu, M. (2024). Hybrid deep learning models for time series forecasting of solar power. *Neural Computing and Applications*, 36, pp. 9095–9112. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09558-5>
- [136] Olcay, K., Tunca, S.G. and Özgür, M.A. Forecasting and performance analysis of energy production in solar power plants using long short-term memory (LSTM) and random forest models, *IEEE Access*, 12, pp. 103299–103312. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3432574>
- [137] Jailani, N.L.M., Dhanasegaran, J.K., Alkaws, G., Alkahtani, A.A., Phing, C.C., Baashar, Y., Capretz, L.F., Al-Shetwi, A.Q. and Tiong, S.K. (2023). Investigating the power of LSTM-based models in solar energy forecasting, *Processes*, 11(5),

- art. No. 1382. <https://doi.org/10.3390/pr11051382>
- [138] Guo, X., Zhan, Y.; Zheng, D.; Li, L.; Qi, Q. (2023). Research on short-term forecasting method of photovoltaic power generation based on clustering SO-GRU method, *Energy Reports*, 9(10), 786–793. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2023.05.208>
- [139] Xu, Y., Zheng, S., Zhu, Q., Wong, K.C., Wang, X. and Lin, Q. (2024). A complementary fused method using GRU and XGBoost models for long-term solar energy hourly forecasting. *Expert Systems with Applications*, 254, art. No. 124286. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124286>
- [140] Hayajneh, A.M., Alasali, F., Salama, A. and Holderbaum, W. Intelligent Solar Forecasts: Modern Machine Learning Models & TinyML Role for Improved Solar Energy Yield Predictions. *IEEE Access*, 12, pp. 10846–10864. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3354703>
- [141] Yang, L. and Shami, A. (2020). On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. *Neurocomputing*, 415, pp. 295–316. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.061>
- [142] Bassegy, K.E. (2023). Hybrid renewable energy systems modeling. *Engineering Science & Technology Journal*, 4(6), pp. 571–588. <https://doi.org/10.51594/estj/v4i6.1255>
- [143] Öcal, A. and Koyuncu, H. (2024). An in-depth study to fine-tune the hyperparameters of pre-trained transfer learning models with state-of-the-art optimization methods: Osteoarthritis severity classification with optimized architectures. *Swarm and Evolutionary Computation*, 89, art. No. 101640. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101640>
- [144] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of the Proceedings of ICNN'95—International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 27 November–1 December 1995*. (pp. 1942–1948).
- [145] Mirjalili, S., (2019). Genetic Algorithm. In *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications; Springer International Publishing: Cham, Switzerland* (pp. 43–55).
- [146] Abualigah, L., Elaziz, M.A., Sumari, P., Geem, Z.W. and Gandomi, A.H., Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer. *Expert Systems with Applications*, 191, art. No. 116158. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116158>
- [147] Bai, J., Li, Y., Zheng, M., Khatir, S., Benaissa, B., Abualigah, L. and Abdel Wahab, M. (2023). A Sinh Cosh optimizer. *Knowledge-Based Systems*, 282, art. No. 111081. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.111081>
- [148] Minic, A., Jovanovic, L., Bacanin, N., Stoean, C., Zivkovic, M., Spalevic, P., Petrovic, A., Dobrojevic, M. and Stoean, R. (2023). Applying recurrent neural networks for anomaly detection in electrocardiogram sensor data. *Sensors*, 23(24),

- art. No. 9878. <https://doi.org/10.3390/s23249878>
- [149] Jovanovic, L., Djuric, M., Zivkovic, M., Jovanovic, D., Strumberger, I., Antonijevic, M., Budimirovic, N. and Bacanin, N. (2022). Tuning xgboost by planet optimization algorithm: An application for diabetes classification. *In Proceedings of the Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems: ICCCES 2022, Coimbatore, India, 15–16 September 2022; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany*, (pp. 787–803).
- [150] Jovanovic, L., Bacanin, N., Zivkovic, M., Antonijevic, M., Petrovic, A. And Zivkovic, T. (2023). Anomaly detection in ECG using recurrent networks optimized by modified metaheuristic algorithm. *In Proceedings of the 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 21–22 November 2023*, (pp. 1–4).
- [151] Mladenovic, D., Antonijevic, M., Jovanovic, L., Simic, V., Zivkovic, M., Bacanin, N., Zivkovic, T. and Perisic, J. (2024). Sentiment classification for insider threat identification using metaheuristic optimized machine learning classifiers, *Scientific Reports*, 14, art. No. 25731. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77240-w>
- [152] Dobrojevic, M., Jovanovic, L., Babic, L., Cajic, M., Zivkovic, T., Zivkovic, M., Muthusamy, S., Antonijevic, M. and Bacanin, N. (2024). Cyberbullying Sexism Harassment Identification by Metaheuristics-Tuned eXtreme Gradient Boosting. *Computers, Materials and Continua*, 80(3), pp. 4997–5027. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.054459>
- [153] Pavlov-Kagadejev, M., Jovanovic, L., Bacanin, N., Deveci, M., Zivkovic, M., Tuba, M., Strumberger, I. and Pedrycz, W. (2024). Optimizing long-short-term memory models via metaheuristics for decomposition aided wind energy generation forecasting. *Artificial Intelligence Review*, 57, art. No. 45. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10678-y>
- [154] Damaševičius, R., Jovanovic, L., Petrovic, A., Zivkovic, M., Bacanin, N., Jovanovic, D. and Antonijevic, M. Decomposition aided attention-based recurrent neural networks for multistep ahead time-series forecasting of renewable power generation. *PeerJ Computer Science*, 10, art. No. e1795. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1795/table-13>
- [155] Bacanin, N., Petrovic, A., Jovanovic, L., Zivkovic, M., Zivkovic, T. and Sarac, M. Parkinson's Disease Induced Gain Freezing Detection using Gated Recurrent Units Optimized by Modified Crayfish Optimization Algorithm. *In Proceedings of the 2024 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI), Lalitpur, Nepal, 18–19 January 2024*, (pp. 1–8).
- [156] Bacanin, N., Jovanovic, L., Djordjevic, M., Petrovic, A., Zivkovic, T., Zivkovic, M. and Antonijevic, M. (2024). Crop Yield Forecasting Based on Echo State Network Tuned by Crayfish Optimization Algorithm. *In Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Contemporary Computing and Communications (InC4), Bengaluru, India, 15–16 March 2024; Vol. 1*, (pp. 1–6).

- [157] Zakon o Energetici. *Službeni glasnik Republike Srbije*, br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon, 62/2023, 94/2024 i 109/2025 - dr. Zakoni. Dostupno na: https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html (datum pristupa: 31 October 2025).
- [158] European Union. Communication on REPowerEU Plan. 2022. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230> (datum pristupa: 31 October 2024).
- [159] Ekološka Ekonomija. (n.d.) *Što je feed-in tarifa za obnovljive izvore? [What Is a Feed-in Tariff for Renewable Energy?]* 2016. Dostupno na: <https://ekoloskaekonomija.wordpress.com/2016/09/30/sto-je-feed-in-tarifa-za-obnovljive-izvore/> (datum pristupa: 31 October 2024).
- [160] D'Aprile, P., Engel, H., van Gendt, G., Helmcke, S., Hieronimus, S., Naucélér, T., Pinner, D., Walter, D. and Witteveen, M. (2020). *Net-Zero Europe: Decarbonization Pathways and Socioeconomic Implications*. McKinsey & Company: Stockholm, Sweden.
- [161] Sherstinsky, A. (2020). Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, art. No. 132306. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>
- [162] Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K. and Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. *In Proceedings of the NIPS 2014 Workshop on Deep Learning, Montreal, QC, Canada, 13 December*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.3555>
- [163] Mladenovic, N. And Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24, pp. 1097–1100.
- [164] Luo, W., Lin, X., Li, C., Yang, S. and Shi, Y. (2022). Benchmark Functions for CEC 2022 Competition on Seeking Multiple Optima in Dynamic Environments. arXiv:cs.NE/2201.00523. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.00523>
- [165] Cheng, S. and Shi, Y. (2011). Diversity control in particle swarm optimization. *In Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on Swarm Intelligence, Paris, France, 11–15 April 2011*, (pp. 1–9).
- [166] Yang, X.S. and He, X. (2013). Firefly algorithm: Recent advances and applications, *International Journal of Swarm Intelligence Research*, 1, pp. 36–50. <https://doi.org/10.1504/IJSI.2013.055801>
- [167] Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. 2024. Dostupno na: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (datum pristupa: 15. October 2024).
- [168] Maier, A., Sharp, A. and Vagapov, Y. (2017). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. *In Proceedings of the 2017 Internet Technologies and Applications (ITA), Wrexham, UK, 12–15 September 2017*, (pp. 143–148).

- [169] Zim, M.Z.H. (2021). *TinyML: Analysis of Xtensa LX6 microprocessor for neural network applications by ESP32 SoC*. arXiv:2106.10652. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28602.11204>
- [170] Tatachar, A.V. (2021). Comparative assessment of regression models based on model evaluation metrics. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 8, pp. 853–860. <https://www.irjet.net/archives/V8/i9/IRJET-V8I9127.pdf>
- [171] Willmott, C.J., Robeson, S.M. and Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), pp. 2088–2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>
- [172] LaTorre, A., Molina, D., Osaba, E., Poyatos, J., Del Ser, J. and Herrera, F. (2021). A prescription of methodological guidelines for comparing bio-inspired optimization algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 67, art. No. 100973. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100973>
- [173] Schultz, B.B. (1985). Levene's Test for Relative Variation. *Systematic Zoology*, 34(4), pp. 449–456. <https://doi.org/10.2307/2413207>
- [174] Shapiro, S.S. and Francia, R.S. (1972). An Approximate Analysis of Variance Test for Normality. *Journal of the American Statistical Association*, 67(337), pp. 215–216. <https://doi.org/10.1080/01621459.1972.10481232>
- [175] Woolson, R.F. (2005). Wilcoxon Signed-Rank Test. In *Encyclopedia of Biostatistics; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA*.
- [176] Croonenbroeck, C. and Lowitzsch, J. (2019). From fossil to renewable energy sources. In: *Energy Transition: Financing Consumer Co-Ownership in Renewables*, Springer, Cham, (pp. 29–58).
- [177] Sofia, D., Gioiella, F., Lotrecchiano, N. and Giuliano, A. (2020). Mitigation strategies for reducing air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(16), pp. 19226–19235.
- [178] Escobedo, F.J., Kroeger, T. And Wagner, J.E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8–9), pp. 2078–2087.
- [179] Stram, B.N. (2016). Key challenges to expanding renewable energy. *Energy Policy*, 96, pp. 728–734. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.034>
- [180] Moriarty, P. and Honnery, D.: (2022). The limits of renewable energy. In: *Switching Off: Meeting Our Energy Needs in a Constrained Future*, Springer, Cham, (pp. 35–54).
- [181] Shaqsi, A.Z.A., Sopian, K. and Al-Hinai, A. (2020). Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*, 6(7), 288–306. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.028>
- [182] Sarmah, S., Kakati, B.K. and Deka, D. (2023). Lakhanlal: Recent advancement in rechargeable battery technologies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and*

- Environment*, 12(2), art. No. e461. <https://doi.org/10.1002/wene.46>
- [183] Sherstinsky, A. (2020). Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, Art. No. 132306. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>
- [184] Medsker, L.R. and Jain, L.C. (1999). *Recurrent Neural Networks: Design and Applications*. CRC Press, Boca Raton.
- [185] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*, vol. 4, (pp. 1942–1948). <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [186] Mauler, L., Duffner, F., Zeier, W.G. and Leker, J. (2021). Battery cost forecasting: A review of methods and results with an outlook to 2050. *Energy & Environmental Science*, 14(9), pp. 4712–4739. <https://doi.org/10.1039/D1EE01530C>
- [187] Bülow, F. and Meisen, T. (2023). A review on methods for state-of-health forecasting of lithium-ion batteries applicable in real-world operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 57, art. No. 105978. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105978>
- [188] Jones, P.K., Stimming, U. and Lee, A.A. (2022). Impedance-based forecasting of lithium-ion battery performance amid uneven usage. *Nature Communications*, 13(1), art. No. 4806. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32422-w>
- [189] Bischl, B., Binder, M., Lang, M., Pielok, T., Richter, J., Coors, S., Thomas, J., Ullmann, T., Becker, M., Boulesteix, A.-L., et al. (2023). Hyperparameter optimization: Foundations, algorithms, best practices, and open challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 13(2), art. No. e1484. <https://doi.org/10.1002/widm.1484>
- [190] Papagiannidis, E., Enholm, I.M., Dremel, C., Mikalef, P. and Krogstie, J. (2023). Toward AI governance: Identifying best practices and potential barriers and outcomes. *Information Systems Frontiers*, 25(1), pp. 123–141. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10251-y>
- [191] Bačanin, N., Stoean, C., Živković, M., Rakić, M., Strulak-Wójcikiewicz, R. and Stoean, R. (2023). On the benefits of using metaheuristics in the hyperparameter tuning of deep learning models for energy load forecasting. *Energies*, 16(3), art. No. 1434. <https://doi.org/10.3390/en16031434>
- [192] Purković, S., Jovanović, L., Živković, M., Antonijević, M., Dolićanin, E., Tuba, E., Tuba, M., Bačanin, N. and Spalević, P. (2024). Audio analysis with convolutional neural networks and boosting algorithms tuned by metaheuristics for respiratory condition classification. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 36(10), art. No. 102261. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102261>
- [193] Jovanović, L., Bačanin, N., Antonijević, M., Tuba, E., Ivanović, M. and Venkatachalam, K. (2022). Plant classification using firefly algorithm and support

- vector machine. In: *2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, (pp. 255–260).
- [194] Villoth, J.P., Živković, M., Živković, T., Abdel-Salam, M., Hammad, M., Jovanović, L., Simić, V., Bačanin, N. (2025). Two-tier deep and machine learning approach optimized by adaptive multi-population firefly algorithm for software defects prediction. *Neurocomputing*, 630, art. No. 129695. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.129695>
- [195] Jovanović, L., Kljajić, M., Petrović, A., Mizdraković, V., Živković, M. and Bačanin, N. (2017). Modified teaching-learning-based algorithm tuned long short-term memory for household energy consumption forecasting. In: *International Conference on Worldwide Computing and Its Applications*, Springer, Cham, (pp. 347–362).
- [196] Jovanović, L., Bačanin, N., Jovancai, A., Jovanović, D., Singh, D., Antonijević, M., Živković, M. and Strumberger, I. (2022). Oil price prediction approach using long short-term memory network tuned by improved seagull optimization algorithm. In: *International Conference on Sustainable and Innovative Solutions for Current Challenges in Engineering & Technology*, Springer, Cham (pp. 253–265).
- [197] Dogandžić, T., Petrović, A., Jovanović, L., Bačanin, N., Jovanović, A. and Živković, M. (2022). Speeding classification by a deep learning audio analysis system optimized by the reptile search algorithm. In: *International Joint Conference on Advances in Computational Intelligence*, Springer, Cham (pp. 73–88).
- [198] Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. In: *Evolutionary Algorithms and Neural Networks. Studies in Computational Intelligence, Vol. 780*. Springer, Cham (pp. 43–55). https://doi.org/10.1007/978-3-319-93025-1_4
- [199] Izzo, D., Ruciński, M. and Biscani, F. (2012). The generalized island model. In: *Vega, F., Hidalgo Pérez, J.I., Lanchares, J. (eds.) Parallel Architectures and Bioinspired Algorithms*, Springer, Berlin–Heidelberg (pp. 151–169). https://doi.org/10.1007/978-3-642-28789-3_7
- [200] Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K. and Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. In: *NIPS 2014 Workshop on Deep Learning, December 2014*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.3555>
- [201] Obisakin, I. and Ekeanyanwu, C.V. (2022). State-of-health estimation of lithium-ion batteries using support vector regression and long short-term memory. *Open Journal of Applied Sciences*, 12(8), pp. 1366–1382. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.128094>
- [202] Mladenović, N. and Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11), pp. 1097–1100. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00031-2)

- [203] Yang, X.-S. and He, X. (2013). Firefly algorithm: Recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), pp. 36–50. <https://doi.org/10.1504/IJSI.2013.055801>
- [204] Khishe, M. and Mosavi, M.R. (2020). Chimp optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 149, art. No. 113338. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113338>
- [205] Gurrola-Ramos, J., Hernández-Aguirre, A. and Dalmau-Cedeño, O. (2020). Colshade for real-world single-objective constrained optimization problems. In: *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, (pp. 1–8). <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185583>
- [206] Tatachar, A.V. (2021). Comparative assessment of regression models based on model evaluation metrics. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(9), pp. 853–860. <https://www.irjet.net/archives/V8/i9/IRJET-V8I9127.pdf>
- [207] Willmott, C.J., Robeson, S.M. and Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), pp. 2088–2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>
- [208] Popovic, G., Spalevic, Z., Jovanovic, L., Zivkovic, M., Stosic, L. and Bacanin, N. (2024). Optimizing Lightweight Recurrent Networks for Solar Forecasting in TinyML: Modified Metaheuristics and Legal Implications, *Energies*, 18(1), art. No. 105. <https://doi.org/10.3390/en18010105>
- [209] Spalević, Ž., Popović, G., Marković, F., Sarčević, Đ., Dobrojević, M. i Spalević, P. (2025). Veštačka inteligencija i njen uticaj na obnovljive izvore energije, *Zbornik radova sa XXIX međunarodne konferencije Informacione tehnologije - sadašnjost i budućnost 2025. (Ur. Bozidar Krstajic), Zabljak 19-22. februar 2025.* (str. 25-29). <https://www.it.ucg.ac.me/upload/files/zbornici/ZbornikIT25.pdf>
- [210] Spalević, Ž., Milosavljević, S. Dubljanin, D., Popović, G. and Ilić, M. (2024). The Role of Artificial Intelligence in Judicial Systems, *International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education*, 12(3), pp. 561–569. <https://doi.org/10.23947/2334-8496-2024-12-3-561-569>