



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

Milan Ž. Ružić

**POREĐENJE ITERATIVNIH ALGORITAMA ZA RJEŠAVANJE
STRUJNO-NAPONSKE ZAVISNOSTI DVODIODNOG I
TRODIODNOG MODELA SOLARNIH ĆELIJA**
MASTER RAD

Podgorica, 2025. godine



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

Milan Ž. Ružić

**POREĐENJE ITERATIVNIH ALGORITAMA ZA RJEŠAVANJE
STRUJNO-NAPONSKE ZAVISNOSTI DVODIODNOG I
TRODIODNOG MODELA SOLARNIH ĆELIJA**
MASTER RAD

Podgorica, 2025. godine

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: Milan Ružić

Datum i mjesto rođenja: 02.03.1994. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Master studije studijskog programa Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada: Poređenje iterativnih algoritama za rješavanje strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija

Fakultet na kom je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 01.06.2022. godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 23.11.2022. godine

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

1. Prof. dr Vladan Vujičić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, predsjednik
2. Prof. dr Ana Jovanović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, član
3. Prof. dr Martin Čalasan, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, mentor

Datum odbrane:

Datum promocije:

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat Milan Ružić

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja, dolje potpisan

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad po nazivom

„Poređenje iterativnih algoritama za rješavanje strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija“

rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno djelo.

Podgorica, 2025. godine

Potpis studenta



Rezime

Solarne ćelije su pretvarači koji konvertuju energiju sunca u električnu energiju. Međutim, iste mijenjaju svoje fizičke zavisnosti uslijed starosti i stalne promjene ambijentalnih uslova. Stoga je precizno matematičko modelovanje u cilju poznavanja parametara u svakom trenutku vremena i u svim vremenskim prilikama od krucijalne važnosti.

U literaturi postoje tri najčešće korišćena matematička modela solarnih ćelija: jednodiodni, dvodiodni i trodiodni model. Za razliku od jednodiodnog, strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija su nelinearne funkcije, za koje ne postoji analitičko rješenje struje u funkciji od napona, niti napona u funkciji od struje. Za rješavanje ove zavisnosti potrebno je koristiti iterativni pristup bez obzira na pristup (metaheuristički, hibridni, itd.) koji se koristi pri estimaciji parametara. S tim u vezi, ovaj rad istražuje performanse tri iterativne metode (Njutnova metoda, modifikovana Njutnova metoda, i metoda Regula-Falsi) za rješavanje strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija. Cilj istraživanja je poređenje primjene prethodno navedenih iterativnih metoda kod rješavanja strujno-naponskih karakteristika dvodiodnog i trodiodnog modela solarne ćelije za različite početne uslove i za različite kriterijume tačnosti. Ispitivanja su sprovedena posmatrajući mjerenu strujno-naponsku karakteristiku dobro poznate RTC France solarne ćelije. Numerički rezultati pokazuju da gotovo sve pomenute iterativne metode zavise od početnih uslova i zahtijevane tačnosti, pri čemu Njutnova metoda pokazuje ubjedljivo najbolje performanse i najmanju zavisnost od početnih uslova.

Ključne riječi: solarna ćelija, modelovanje solarnih ćelija, iterativna metoda, Njutnov metod, modifikovani Njutnov metod, metod lažne pozicije.

Abstract

Solar cells are converters that convert the sun's energy into electricity. However, they change their physical characteristics due to age and constant changes in ambient conditions. Therefore, precise mathematical modeling in order to know the parameters at every moment of time and in all weather conditions is of crucial importance.

There are three the most frequently used mathematical models of solar cells in the literature: one-diode, two-diode and three-diode models. In contrast to the single-diode, the current-voltage characteristics of the two-diode and three-diode solar cell models are non-linear functions, for which there is no analytical solution of the current as a function of the voltage, nor of the voltage as a function of the current. To solve this dependence, it is necessary to use an iterative approach, regardless of the approach (metaheuristic, hybrid, etc.) used in parameter estimation. In this regard, this paper investigates the performance of three iterative methods (Newton's method, modified Newton's method, and Regula-Falsi method) for solving the current-voltage dependence of two- and three-diode solar cell models. The aim of the research is to compare the application of the aforementioned iterative methods when solving the current-voltage characteristics of the two-diode and three-diode solar cell models for different initial conditions and for different accuracy criteria. The tests were carried out by observing the measured current-voltage characteristic of the well-known RTC France solar cell. Numerical results show that almost all mentioned iterative methods depend on the initial conditions and the required accuracy, with Newton's method showing convincingly the best performance and the least dependence on the initial conditions.

Keywords: solar cell, modeling of solar cells, iterative method, Newton's method, modified Newton's method, regula falsi method.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Solarna energija	3
2.1 Istorija fotonaponske konverzije: Tehnološki razvoj fotonaponskih ćelija	3
2.2 Prednosti solarne energije: Osvjetljenje puta ka održivosti	6
2.2.1 Poređenje sektora solarne energije i tradicionalnih neobnovljivih izvora energije	7
2.2.2 Društvene koristi solarne energije	9
2.2.3 Prednosti implementacije solarne energije za elektroenergetsku mrežu	10
2.3 Tipovi solarnih energetske sistema	12
2.4 Budući trendovi i inovacije u solarnoj energiji	14
2.4.1 Budućnost materijala za izradu solarnih ćelija	14
2.4.3 Napredne tehnologije fotonaponskih modula.....	16
2.4.4 Budućnost projekata i prototipa solarnih sistema	17
3. Solarna ćelija	19
3.1 Princip rada solarne ćelije	19
3.1.1 Teorijski aspekt fotonaponskog efekta	19
3.1.2 Apsorpcija svjetlosti u solarnoj ćeliji.....	20
3.1.3 Struktura solarne ćelije	22
3.1.4 Fotonaponski elementi i sistemi	24
3.2 Matematički modeli solarne ćelije.....	27
3.2.1 Jednodiodni model solarne ćelije	28
3.2.2 Dvodiodni model solarne ćelije.....	38
3.2.3 Trodiodni model solarne ćelije.....	40
4. Iterativni algoritmi	42
4.1 Njutnov metod	42
4.1.1 Algoritam Njutnovog metoda.....	43
4.2 Modifikovani Njutnov metod.....	45
4.2.1 Algoritam modifikovanog Njutnovog metoda	45
4.3 Metod lažne pozicije	48
4.3.1 Algoritam metoda lažne pozicije.....	48
5. Numerički rezultati	50
5.1 Numerički rezultati za dvodiodni model solarne ćelije	51
5.2 Numerički rezultati za trodiodni model solarne ćelije	62
6. Zaključak.....	72
Literatura	73

1. Uvod

Konvencionalni, neobnovljivi izvori energije su najčešće korišćeni izvori energije zbog svoje relativno visoke efikasnosti, lakoće pristupa i transporta. Međutim, njihovo nekontrolisano korišćenje dovelo je do nekih nepovratnih štetnih uticaja po životnu sredinu uključujući zagađenje vazduha, oštećenje ozonskog omotača, emisije štetnih gasova, klimatskih promjena i globalnog zagrijavanja. Sve veća prisutnost obnovljivih izvora energije u savremenim energetske sistemima smanjuje navedene štetne efekte, smanjuje gubitke energije u prenosnim i distributivnim mrežama, poboljšava naponske uslove i proširuje nezavisne energetske resurse za potrošače. Obnovljivi izvori, posebno solarna energija, energija vjetra i sistemi za skladištenje energije su osnova za razvoj savremenih energetske sistema. Trenutno, kritični indikator koji utiče na energetske sigurnost u bilo kojoj zemlji je stabilan rad energetske sistema. Nažalost, klimatske promjene, političke krize, epidemije i ratovi značajno utiču na energetske tranziciju na energetske sisteme bez fosilnih goriva. Kao rezultat toga, većina zemalja je ojačala svoje planove za obnovljive izvore energije u cilju smanjenja upotrebe fosilnih goriva i postizanje zelene energetske nezavisnosti.

Solarna ćelija je energetska komponenta u kojoj se sunčeva energija pretvara u električnu energiju. Solarne ćelije se povezuju serijski i paralelno u solarne nizove i module, formirajući solarne panele, a radi dobijanja većih vrijednosti napon, struja i snaga. U matematičkom smislu solarna ćelija se opisuje nelinearnom vezom struje i napona. Najjednostavniji model solarne ćelije je model sa jednom diodom (JDM). To je model koji se sastoji od jednog strujnog generatora, izvora fotostruje, dva otpornika (serijski i paralelni), koji predstavljaju gubitke u solarnoj ćeliji, i jedne diode, koja opisuje pn spoj same ćelije. Pošto je dioda opisana sa dva nepoznata parametra (struja zasićenja i idealni faktor), JDM se naziva model sa pet parametara. Klasični model sa pet parametara je najšire prihvaćen, ali i najmanje tačan model solarnih ćelija. Poboljšane varijante ovog modela uključuju postojanje još jednog otpornika povezanog serijski sa diodom.

Pored JDM-a, postoje i dviodni i troiodni modeli (DDM i TDM, respektivno) solarnih ćelija koji su opisani u dostupnoj literaturi. Štaviše, pronađene su i modifikovane verzije ovih modela koje uključuju dodatne otpornosti i kapacitivnosti. Ovi modeli imaju po jednu, odnosno dvije dodatne diode. U matematičkom smislu veza struje i napona kod klasičnih DDM i TDM solarnih ćelija može se predstaviti nelinearnom funkcijom za koju ne postoji analitičko rješenje.

Zbog toga je za konkretnu vrijednost struje potrebno koristiti iterativne metode za izračunavanje vrijednosti napona ili obrnuto.

Primjena iterativnih metoda neophodna je za procjenu parametara DDM i TDM modela solarnih ćelija, bez obzira na pristup koji se koristi za procjenu parametara (metaheuristički algoritmi, hibridni algoritmi, kombinovane analitičko-iterativne metode i sl.). Međutim, vrlo često se u ovim modelima ne naglašava kako se struja izračunava kao funkcija napona, kao ni koja je tačnost proračuna struje u funkciji od napona, niti koji način tj. iterativni pristup je korišćen.

Ovaj rad se bavi poređenjem različitih iterativnih metoda za proračun struje u funkciji napona kod DDM i TDM. U tom cilju, ovaj rad testira i upoređuje tri standardne iterativne metode - Njutnov metod (NM), modifikovani Njutnov metod (MNM) i metod lažne pozicije (MLP). Stoga su glavni doprinosi ovog rada navedeni na sljedeći način:

- U radu se ukazuje na nelinearnost odnosa struje i napona kod DDM i TDM;
- U radu se porede različite iterativne metode za proračun struje kao funkcije napona za DMM i TDM;
- Na osnovu dobijenih rezultata razmatra se primjenljivost testiranih metoda;
- Posebna pažnja je posvećena uticaju početnih uslova i tačnosti proračuna na potreban broj iteracija za postizanje određene tačnosti.

Ostatak rada je organizovan na sljedeći način. Drugo poglavlje se bavi solarnom energijom, njenom primjenom u savremenim energetskim sistemima, analizom uticaja na životnu sredinu, kao i budućim inovacijama i trendovima. U trećem poglavlju je opisan princip rada solarne ćelije, a zatim su predstavljene i opisane JDM, DDM i TDM matematički modeli, gdje je ukazano na nelinearnost odnosa struje i napona. U četvrtom poglavlju razmatraju se tri odabrane iterativne metode za rješavanje nelinearnih jednačina, pri čemu je radi boljeg razumijevanja, dat primjer rješavanja za svaku od njih. U petom poglavlju se porede performanse različitih iterativnih metoda za izračunavanje struje kao funkcije napona koristeći parametre, sa dovoljno detalja, za RTC France solarnu ćeliju. Na kraju rada nalazi se zaključak u kome se ukazuje na doprinos, prednosti i rezultate rada, kao i na potencijalne pravce budućih istraživanja.

2. Solarna energija

Solarna energija je energija sunčevog zračenja koja na planetu Zemlju dolazi u vidu vidljivog svjetla, ultraljubičaste svjetlosti koja je opšte poznata kao UV i infracrvene svjetlosti. Sunčevo zračenje je direktno ili indirektno odgovorno za gotovo sve ostale oblike energije na Zemlji (isključujući nuklearnu i geotermalnu energiju), kao i za njihovo obnavljanje. Energija vjetra, vodenih tokova, morskih struja, talasa i termalnog gradijenta u okeanima zahtijevaju solarnu energiju kao primarni izvor svog generisanja. Takođe, ono direktno utiče na kompletnu klimu na Zemlji, pa samim tim uslovljava postanak i evoluciju života. Korišćenje solarne energije ima višestruke prednosti, jer je to obnovljiv, neiscrpan, čist i pouzdan izvor energije.

2.1 Istorija fotonaponske konverzije: Tehnološki razvoj fotonaponskih ćelija

Ideja da čovjek energiju sunca koristi za grijanje i osvetljenje bila je intuitivna. Pasivna sunčeva energija se koristila kao oblik svjetlosti i toplote od ranog čovječanstva. Vjerovatno najznačajniji iskorak u korišćenju solarne energije bilo je otkriće fotonaponskog efekta. Fotonaponske ćelije, koje se često nazivaju i solarne ćelije, mogu pretvoriti sunčevu svjetlost direktno u električnu energiju na osnovu principa rada koji se oslanja na fotonaponskom efektu.

Termin "fotonapon" potiče od grčke riječi "*phos*" što znači svjetlost, i od "*volta*", jedinice za elektromotornu silu. Fotonaponski efekat je prvi otkrio francuski fizičar Aleksandar-Edmon Becquerel (1820-1891). 1839. godine, sa 19 godina, eksperimentišući u laboratoriji svog oca, napravio je prvu fotonaponsku ćeliju na svijetu. U svom eksperimentu je stavio srebrni hlorid u kisjeli rastvor. Dok ga je osvjetljavao, posmatrao je napon na povezanim elektrodama od platine.

Viloubi Smit (1828-1891), engleski inženjer elektrotehnike, prvi je primijetio i objavio 1873. osjetljivost selena na svjetlost (slika 2.1). Kada je izložen sunčevoj svjetlosti njegova provodnost se povećava.



Slika 2.1: Selenske šipke korišćene u eksperimentima Viloubija Smita.

Američki pronalazač Čarls Frits (1850-1903) priznat je kao tvorac prve radne fotonaponske ćelije. On je 1883. godine stavio selen između gvozdene ploče i poluprovodnog zlatnog gornjeg sloja. Iako je ova rana solarna ćelija imala veoma nisku efikasnost (ispod 1%), ona je bila polazna tačka jedne od danas najdinamičnijih oblasti inženjeringa. Čarls Frits je takođe bio pionir korišćenja solarnih panela. Povezao je nekoliko selenskih modula i postavio testni niz na krov u Njujorku sredinom 1880-ih. Bio je veoma optimističan u pogledu smanjenja zagađenja i završetka ere parnih mašina. Ali praktična široka primjena fotonaponskih uređaja morala je da sačeka do 1950-ih godina [1].

Malo je poznato da je Albert Ajnštajn (1879-1955), čuveni teorijski fizičar i naučnik, dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1922. godine za zasluge u teorijskoj fizici, posebno za otkriće zakona fotoelektričnog efekta, a ne za svoje teorije opšte i specijalne relativnosti, jer su se u to vrijeme smatrale još uvijek donekle kontroverznim.

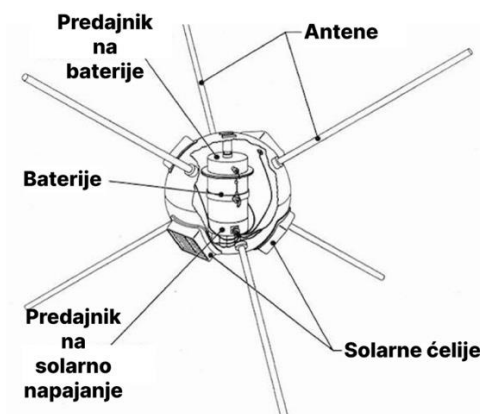
Američki inženjer Rasel Šumejker Ohl (1898-1987) patentirao je modernu poluprovodničku solarnu ćeliju sa spojem 1946. godine. On je takođe pronalazač P - N barijere (tzv. *pn* spoj) [1,2].

1954. godine, dok su eksperimentisali sa novootkrivenim silicijumskim tranzistorima, tri američka naučnika koji su radili za kompaniju *Bell Laboratories*, Deril Čepin (1906-1995), Kalvin Fuler (1902-1994) i Džerald Pirson (1905-1987) razvili su solarnu ćeliju od monokristalnog silicijuma, koja je mogla pretvoriti dovoljno sunčeve energije u električnu energiju za pokretanje bilo koje uobičajene električne opreme. Oni su predložili ćeliju zasnovanu na difuznom silicijumskom pn spoju sa efikasnošću od 6%. Njihov uspjeh je okarakterisan kao početak nove ere, koja će na kraju dovesti do ostvarenja jednog od najvećih

snova čovječanstva – iskorištavanja gotovo neograničene energije Sunca za potrebe civilizacije [1].

Efikasnost konverzije solarnih ćelija počela je polako da raste do 11% 1958. godine do 14% 1960. godine, ali njihova cijena je bila previsoka. Istraživači su 1960-ih godina otkrili i druge fotonaponske materijale, kao što je galijum-arsenid (*GaAs*). Oni su mogli da rade na višim temperaturama od silicijuma, ali su i dalje bili skupi.

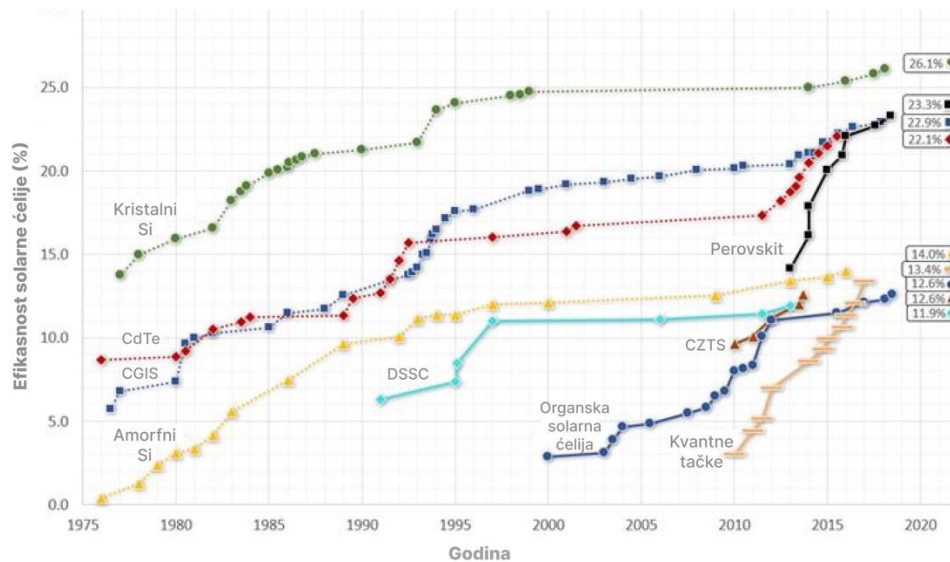
Zbog visokih troškova izrade, ali i niske efikasnosti, na početku fotonaponske ere solarne ćelije su se koristile samo u igračkama i drugim manjim uređajima. Njihove prve važne primjene bile su u istraživanju svemira. *Vanguard I*, koji su lansirale SAD 1958. godine, bio je prvi svjetski satelit na solarni pogon. Svemirska letjelica prečnika 165 mm i aluminijske sfere težine 1,47 kg imala je 6 solarnih ćelija ukupne površine od oko 100 cm², koje su proizvodile samo nekoliko desetina mW i snabdijevala je jedan od svoja dva predajnika (slika 2.2) [2]. Od tada su veliki solarni nizovi koji podsećaju na krila, tipična karakteristika satelita. U praksi su solarne ćelije bile adekvatne za ovu primjenu, jer su njihova mala efikasnost i visoki troškovi bili uravnoteženi visokim odnosom snage i težine, što je veoma važno pitanje u vazduhoplovnoj industriji [2].



Slika 2.2: Model satelita *Vanguard I*.

Uspjeh solarnih ćelija u vazduhoplovnoj fotonaponskoj tehnologiji radikalno je promijenio opštu viziju njihove primjene i na Zemlji. Značajan napredak u ovoj oblasti 1970-ih godina doprinijela je vrlo brzo rastuća industrija poluprovodnika. Kako je tehnologija evoluirala, cijena solarnih ćelija je padala zajedno sa cijenom integrisanih kola. U

međuvremenu, zbog intenzivnih istraživačkih napora širom svijeta, efikasnost solarnih ćelija se polako povećavala. Korak po korak, počevši od sredine 1980-ih, fotonaponski uređaji postaju glavni izvor električne energije za udaljene sisteme. Grafički prikaz razvoja efikasnosti solarne ćelije kroz istoriju od 1970-tih godina do danas prikazan je na slici 2.3. [2,3].



Slika 2.3: Istorija efikasnosti solarnih ćelija koje se koriste za komercijalne svrhe.

Danas, efikasnost solarnih ćelija koje se koriste za komercijalne svrhe je oko 23%, dok je u laboratorijskim uslovima postignuta efikasnost od približno 50%. Pored drastičnog povećanja efikasnosti konverzije i dalje najveći problem u rasprostranjenosti solarnih ćelija je visoka cijena u tehnologiji proizvodnje. Kad su se 1954. godine pojavile, cijena im je bila oko 10000 USD/W, 1965. godine cijena im je pala na 1000 USD/W, 1973. godine na 300 USD/W, 1975. godine na 100 USD/W, a 1977. godine na oko 15 USD/W, dok im je današnja cijena oko 2 USD/W. Opsežno istraživanje u oblasti novih materijala za izradu, uključujući polikristalne (*CdTe*) i amorfne silicijumske ćelije (*GaAs*), kao i druge poluprovodničke materijale, zajedno sa ugradnjom koncentratora u sisteme solarnih ćelija, garantuje dodatno smanjenje troškova proizvodnje solarnih ćelija [3].

2.2 Prednosti solarne energije: Osvjetljenje puta ka održivosti

Od svog nastanka, tehnologija koja solarnu energiju pretvara u električnu je prepoznata kao najbolja obećavajuća alternativa konvencionalnoj energiji dobijenoj iz fosilnih goriva. Ova energija je nezagađujuća i ima minimalan uticaj na životnu sredinu. Njena implementacija značajno doprinosi smanjenju globalnog zagrijavanja i smanjenju emisije gasova staklene

bašte. Primarni pokretač razvoja fotonaponske industrije je smanjenje troškova kako bi se na taj način takmičila sa fosilnim gorivima. Veliki broj dostupnih istraživanja su pokazala da su solarna energija i njena eksploatacija jedan od ekološki najprihvatljivijih i najodrživijih obnovljivih izvora energije danas [4]. Zbog toga je solarna energija postala jedan od najpopularnijih oblika obnovljivih izvora energije.

2.2.1 Poređenje sektora solarne energije i tradicionalnih neobnovljivih izvora energije

Zbog svoje velike gustine energije, glavni tradicionalni neobnovljivi izvori kao što su uglj, nafta, prirodni gas i nuklearna energija, zajedno predstavljaju više od 60% globalne proizvodnje električne energije. Međutim, sagorijevanje fosilnih goriva dovodi do isparavanja štetnih gasova u atmosferu. Ovi gasovi su poznati pod nazivom gasovi staklene baste, dok su problemi koje urokuju poznati kao globalno zagrijavanje. Takođe, očekuje se da će potražnja za energijom porasti za 56% do 2040. godine [5]. Da bi se postavili ispravni ciljevi za sektor održive energije, neophodno je temeljno proučiti uticaj obnovljivih i neobnovljivih izvora energije na životnu sredinu koji se odnosi na izgradnju i rad postrojenja. Još uvijek nedostaje dobro definisana komparativna analiza između ukupnog uticaja obnovljivih i neobnovljivih izvora na životnu sredinu u sličnim uslovima. Cilj ovog poglavlja je da kritički uporedi ekološke performanse solarnih elektrana i fosilna goriva, uključujući sve relevantne faze.

U istraživanju koje je sprovedla Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj (*eng. Organization for Economic Co-operation and Development*) približno 35% ukupnih gasova staklene bašte u svijetu emituju postojeće elektrane koje se baziraju na fosilnim gorivima. Kao sirovina koja se koristi u elektranama, uglj ima najveću emisiju ugljen-dioksida (CO_2), a slijede sirovine nafte i gasa. Iako je jeftin i pristupačan, upotreba uglja je ograničena zbog njegovog značajnog uticaja na životnu sredinu koji je u suprotnosti sa održivošću i energetske ciljevima koje su zemlje širom svijeta postavile kao imperativ za naredne decenije. Od ukupne emisije gasova staklene bašte svih fosilnih goriva, 70% emisija u elektroenergetskom sektoru ispuštale su elektrane na uglj. Elektrane prirodnog gasa emituju približno jednu trećinu gasova staklene baste u poređenju sa konvencionalnim postrojenjima na uglj. Svi tipovi saobraćaja, koji se uglavnom zasnivaju na nafti, bili su drugi sektor po zagađivanju u 2023. godini. Što se tiče nuklearne energije, niske cijene i niske emisije gasova staklene bašte čine je atraktivnim izvorom energije. Međutim, radioaktivni otpad i mogućnost nuklearnih katastrofa usporavaju njenu širu adaptaciju [6,7].

Studije procjene životnog ciklusa (*eng. Life Cycle Assessment*) pokazuju da je u prosjeku više od 80% uticaja solarnih fotonaponskih sistema na životnu sredinu posljedica procesa proizvodnje solarnih modula. Generalno, na rezultate snažno utiče nekoliko važnih parametara: proces proizvodnje solarne ćelije i modula, tip solarne ćelije, efikasnost solarne ćelije, sunčevo zračenje, životni vijek i reciklaža [8].

Proces proizvodnje kristalnih silicijumskih modula zahtijeva veliki utrošak energije zbog intenzivnog prečišćavanja, posebno u slučaju solarnih ćelija od monokristalnog silicijuma. Uticaj na životnu sredinu snažno zavisi od izbora električne energije na kojoj se proces proizvodnje bazira. U prosjeku, od 45% do 80% ukupnog uticaja u proizvodnom procesu jednog modula polikristalnog silicijuma posljedica je električne energije koja se dobija na bazi uglja. Preostali uticaj je vezan za aluminijumski okvir i proizvodnju polimernih slojeva koji imaju visoke emisije NO_3 , PO_3 i SO_2 . Tako solarna elektrana nominalne snage 1,8 MW u Italiji, sa modulima proizvedenim u Kini daje emisiju globalnog zagrijavanja od 88,7 g CO_2 ek/kVh. Poređenja radi, solarna elektrana od 5 MW instalisane snage u Francuskoj, sa fotonaponskim modulima evropskog porijekla, ima emisiju globalnog zagrijavanja od 37,5 g CO_2 ek/kVh. S druge strane, upoređujući dva identična solarna sistema na krovu stambenih zgrada instalisane snage 3 kW (jedan proizveden u Njemačkoj, a drugi u Kini) pokazano je da su prelaskom na evropski miks električne energije koja se koristi u proizvodnji ovih modula emisije gasova staklene bašte smanjene za 17,6% za monokristalni silicijum, odnosno 13% za polikristalni silicijum. Glavni razlog jeste činjenica da u Kini elektrane na ugalj čine 60% ukupne proizvodnje energije [9].

Izlazna snaga modula raste sa povećanjem njihove efikasnosti. Veća postrojenja solarnih izvora energije su posljedično takođe povezana sa relativno nižim emisijama gasova staklene bašte. Povećanje instalisane snage modula napravljenog od monokristalnog silicijuma sa 3 kW na 12 kW smanjuje emisiju gasova staklene bašte sa 70 g CO_2 ek/kVh na 65 g CO_2 ek/kVh. Pored toga, kada je pretpostavljeni životni vijek promijenjen sa 20 na 30 godina, emisije štetnih gasova su smanjene za 31%, jer je ukupno proizvedeno više energije iz solarnih sistema. Veće sunčevo zračenje je još jedan uticajni faktor jer dovodi do veće proizvodnje energije. Povećanje zračenja sa 963 kWh po m^2 na 1700 kWh po m^2 bi smanjilo potencijal globalnog zagrijavanja sistema instalisane snage 3 kW od monokristalnog silicijuma sa 69,6 g CO_2 ek/kWh na 45 g CO_2 ek/kWh [10].

Takođe, reciklaža ima važnu ulogu u ukupnoj analizi uticaja fotonaponskih postrojenja na životnu sredinu. Glavni materijali koji čine solarni modul (staklo, bakar, aluminijum, srebro i silicijum) se recikliraju sa prosječnom stopom od 85%. Recikliranje uključuje pretapanje, hemijske i termičke tretmane. U poređenju sa odlaganjem na deponiji, tehnologija reciklaže kristalnog silicijuma smanjuje potencijal globalnog zagrijavanja za 35% [11]. Dakle, da bi prelazak sa fosilnih goriva i tradicionalnih izvora energije na solarnu energiju bio potpuno uspješan neophodno je da se oslanja na postrojenja velikih razmjera, sa efikasnim radom i visokim stopama recikliranja na kraju što dužeg radnog vijeka.

2.2.2 Društvene koristi solarne energije

Svaki način proizvodnje i prenosa energije ima direktne posljedice na društvo, prije svega time što utiče na javno zdravlje zajednice. Konvencionalne opcije za proizvodnju energije štete i zagađuju vazduh, klimu, vodu, zemljište i dodatno povećavaju nivoe štetnog zračenja. Obnovljive tehnologije, na čelu sa solarnom energijom, su znatno sigurnije nudeći rješenje za mnoge društvene probleme povezane sa fosilnim i nuklearnim gorivima.

Različite aplikacije i razvoj tehnologije solarne energije pružaju očigledne ekološke prednosti u poređenju sa konvencionalnim izvorima energije, doprinoseći tako održivom razvoju ljudskih aktivnosti. Što se tiče javnog zdravlja upotreba tehnologija solarne energije ima dodatne pozitivne implikacije kao što su [12]:

- Smanjenje emisije gasova staklene bašte (uglavnom CO_2 , NO_3) i spriječavanje emisije toksičnih gasova (SO_2).
- Rekultivacija degradiranog zemljišta.
- Poboljšanje kvaliteta vodnih resursa.

Sa socio-ekonomskog stanovišta, koristi od eksploatacije tehnologija solarne energije su [13,14]:

- Obezbeđivanje značajnih radnih mogućnosti;
- Diversifikacija i sigurnost snabdijevanja energijom;
- Podrška demonopolizaciji tržišta električne energije;

- Ubrzanje elektrifikacije ruralnih područja u zemljama u razvoju.

Nepovoljni efekti tehnologija solarne energije su obično mali i mogu se smanjiti odgovarajućim mjerama ublažavanja. Potencijalna opterećenja sa socio-ekonomskog stanovišta i javnog zdravlja uzrokovana tehnologijama solarne energije često su specifična za različitu lokaciju, ali zavise i od veličine i prirode projekta. Ova potencijalna opterećenja i uticaji se mogu dodatno smanjiti na sljedeći način [14]:

- Odgovarajuće pozicioniranje centralnih solarnih elektrana, što uključuje pažljivu procjenu alternativnih lokacija i procjenu očekivanog uticaja, daleko od gusto naseljenih područja, daleko od zaštićenih područja ili daleko od područja značajnih prirodnih ljepota.
- Odgovarajuće operativne prakse, uključujući racionalno korišćenje vode, mjere bezbjednosti, prakse odlaganja otpada, korišćenje biorazgradivih hemikalija.
- Angažovanje javnosti i relevantnih organizacija u ranim fazama planiranja, kako bi se obezbjedilo da javnost prihvati nove tehnologije.
- Korišćenje najboljih dostupnih tehnika.
- Integracija solarnih sistema u stambene objekte u početnoj fazi izgradnje.
- Obuka radnika, upotreba specijalnih sunčanih naočara u toku rada i izgradnje, upotreba termoizolacionih uniformi.
- Ponovno uspostavljanje lokalne flore i faune, dajući životnoj sredini dovoljno vremena da ponovo dođe u prethodno stanje.
- Temeljne studije o procjeni uticaja na životnu sredinu za centralne solarne sisteme i drugo.

2.2.3 Prednosti implementacije solarne energije za elektroenergetsku mrežu

Električna energija proizvedena korišćenjem solarnih panela ima pozitivan uticaj na električnu mrežu. Ne samo da solarni paneli smanjuju potrebu za električnom energijom iz centralnih elektrana, već integracija distributivnih izvora solarne energije takođe može pomoći u stvaranju modernije, otpornije i efikasnije mreže.

Dostupnost električne energije

Električna energija proizvedena u solarnim sistemima koja se šalje u mrežu smanjuje količinu električne energije koju potrošači moraju da uzimaju od drugih elektrana ili generišu sami. Vrijednost ove izbjegnute potrošnje električne energije često je najveća u ljetnjim mjesecima, kada potražnja za električnom energijom raste zbog povećane potražnje za klimatizacijom i kada je proizvodnja električne energije proizvedene u solarnim sistemima blizu svog maksimuma [15,17]. Dodavanje solarne energije sistemu smanjuje potrebu za napajanjem skupih, često neefikasnih generatora koji rade samo nekoliko puta godišnje, ili za kupovinom skupe vršne električne energije na tržištu, smanjujući tako troškove električne energije za sve potrošače.

Smanjeni gubici u mreži

Distribuirana solarna energija takođe smanjuje količinu električne energije izgubljene kao toplotu dok se prenosi od velikih, centralizovanih elektrana do potrošača. Procjene su da na svjetskom nivou gubici u mreži čine oko 5% ukupne količine električne energije proizvedene za godinu dana. Ovi gubici uzrokuju da se proizvodi više električne energije nego što je potrebno, povećavajući troškove za sve potrošače. Na gubitke u mreži veliki uticaj ima lokacija solarnih elektrana. Fotonaponski sistemi drastično smanjuju količinu gubitaka u sistemu tako što proizvode električnu energiju na mjestu potrošnje, smanjujući na taj način količinu električne energije koja se prenosi i distribuira kroz mrežu. Solarna energija je posebno efikasna u smanjenju gubitaka u mreži, jer smanjuje potražnju za mrežnom infrastrukturom u trenucima kada su gubici u njoj najveći [16,17].

Smanjenje tržišne cijene električne energije

Distribuirana solarna energija takođe smanjuje cijenu električne energije smanjenjem ukupne potražnje u mreži, što može da potisne cijene električne energije na berzi [17]. Drugim riječima, potrošači ne samo da imaju koristi kada moraju da kupuju manje količine električne energije da bi zadovoljili potrebe, već i dobitak jer svaka kupljena količina električne energije postaje jeftinija. Ovi efekti cijena izazvani smanjenjem potražnje mogu predstavljati važnu vrijednost, tj. dobit za potrošače.

Smanjene investicije u skladištenje, prenos i distribuciju električne mreže

Proširivanje količine električne energije koja se proizvodi u solarnim sistemima može odložiti ili eliminirati potrebu za novim investicijama u kapacitet mreže, posebno zato što je potražnja za energijom iz mreže često najveća tokom dana kada sija Sunce. Smanjenjem ukupne i vršne potražnje, proširenje proizvodnje solarne energije pomaže krajnjim korisnicima da izbjegnu troškove ulaganja u nove elektrane, prenosne i distributivne vodove i druge oblike energetske infrastrukture [17].

Smanjena potreba za pomoćnim uslugama

Solarna energija može da smanji određene troškove održavanja neometanog rada mreže, uključujući regulisanje napona i smanjenje potrebe za održavanjem rezervnih elektrana u radu. Sistemi solarne energije instalirani sa pametnim inverterima i drugim tehnologijama koje povećavaju dvosmjernu komunikaciju sa mrežom imaju potencijal da poboljšaju rad mreže i smanje potrebu za centralizovanim uslugama podrške mreži. Bez takve opreme, solarna energija može povećati određene troškove podrške mreži [18].

2.3 Tipovi solarnih energetskih sistema

U praksi solarni energetski sistemi se dominantno koriste kao:

- Solarni kolektori;
- Kolektori za solarno grijanje;
- Solarni paneli za proizvodnju električne energije.

A. Solarni kolektori

U osnovi postoje tri tipa kolektora: kolektori sa ravnim pločama, koncentracioni kolektori, kolektori sa vakuumskim cijevima. Kolektori sa ravnim pločama su najčešće korišćeni tipovi.

1. Kolektori sa ravnim pločama: Osnovni princip rada ovih kolektora zasniva se na konverziji sunčeve energije u toplotnu. Pločasti kolektori su napravljeni od staklenog poklopca kao providnog materijala, upijajuće ploče i tijela. Zračenje koje prolazi kroz staklenu ploču apsorbira solarna ploča. Ova ploča je prekrivena bojama ili specijalnim površinama i ima visoke upijajuće osobine. Ove ploče apsorbiraju skoro 90% sunčevog

zračenja koje dolazi do površine. Preostali dio zračenja se vraća u vidu toplotnog zračenja i konvektivnih gubitaka [22].

2. Koncentracioni kolektori: Ovi kolektori se koriste za dobijanje vode veće entalpije ili nekih drugih radnih fluida. Koncentracioni kolektori se sastoje od dvije komponente i to od optičkog sistema i prijemnika. Funkcija optičkog sistema je da usmjeri i fokusira sunčeve zrake na prijemnik. Funkcija prijemnika je da apsorbira sunčeve zrake i pretvara ih u toplotnu energiju. Prijemnik je napravljen od apsorbera, zaštitnih i izolacionih djelova.
3. Kolektori sa vakuumskim cijevima: Vakuumske cijevi su apsorber solarnog bojlera. Oni apsorbiraju sunčevu energiju pretvarajući je u toplotu koja se dalje koristi za zagrijavanje vode [23].

B. Kolektori za solarno grijanje

Tipovi kolektora za solarno grijanje se dijele na:

1. Sisteme aktivnog grijanja: Postoje primjeri solarnih aktivnih sistema grijanja, kao što je zagrijavanje vode solarnim kolektorima i prenos zagrijane vode do postojeće instalacije centralnog grijanja, a samim tim i transport zagrijanog vazduha za potrebne prostore [24].
2. Sisteme pasivnog grijanja: Pasivni sistemi grijanja koji koriste solarnu energiju rade kao neka vrsta zamke sunčevih zraka. Sunčevo zračenje ulazi u pokrivenu zapreminu kroz staklo i slične providne materijale i apsorbiraju ga određene površine. Zagrijane površine zrače energiju, ali ova toplotna energija ne može da prođe kroz staklenu površinu. Tako se toplotna energija koju nose sunčevi zraci zadržava unutra [24].

C. Pretvarači električne energije

1. Solarne ćelije: Solarne ćelije su sistemi koji pretvaraju sunčeve zrake u električnu energiju. Energija zračenja emitovana kao elektromagnetni talasi koji dopiru do

površine solarnih ćelija izazivaju fotonaponski efekat [23]. Detaljan opis i analiza solarnih ćelija će biti dati u narednim poglavljima.

2. Termalni solarni energetske sistemi: U ovim sistemima, solarno zračenje se koncentriše u koncentratorima što dovodi do ključanja radnog fluida koji ide u termički ciklus. Rad nastao kroz termički ciklus se pretvara u električnu energiju pomoću električnog generatora. Drugi oblik toplotnog solarnog sistema može da pretvori solarnu energiju u ugljovodoničko gorivo, a uskladišteno ugljovodoničko gorivo može se ponovo pretvoriti u električnu energiju pomoću generatora motora sa unutrašnjim sagorijevanjem [24].

2.4 Budući trendovi i inovacije u solarnoj energiji

Solarna fotonaponska industrija se brzo mijenja. Posljednjih godina, glavni pokretač inovacija bio je pritisak na veću efikasnost kao i smanjenje troškova implementacije solarne tehnologije. Viši nivoi efikasnosti direktno utiču na troškove tako što smanjuju broj modula koje je potrebno transportovati do mjesta instalacije, smanjuje se neophodna površina zemljišta i dužina potrebnih vodova. Takođe, na buduće troškove solarne energije utiču tehnologija, klima i nacionalne politike. Shodno tome, sa naprednom tehnologijom povećanja efikasnosti i povoljnom politikom obnovljive energije, troškovi će nastaviti da opadaju u budućnosti.

2.4.1 Budućnost materijala za izradu solarnih ćelija

Tokom godina razvoja solarne tehnologije, napravljeni su značajni koraci u poboljšanju efikasnosti, izdržljivosti i pristupačnosti solarnih ćelija, vođeni prije svega napretkom u nauci o materijalima i inženjerstvu. Od tradicionalnih ćelija na bazi silicijuma do modernih fotonaponskih uređaja, istraživanje novih materijala i inovativnih proizvodnih tehnika definiše i oblikuje budućnost proizvodnje solarne energije.

Silicijum – konvencionalna solarna arhitektura

Solarni paneli od kristalnog silicijuma ($c-S_i$) pripadaju prvoj generaciji solarnih fotonaponskih panela i trenutno čine 95% udjela u svjetskoj proizvodnji fotonaponskih panela. Dostupnost sirovine njegovog glavnog materijala, elementarnog silicijuma, čini kristalni silicijum ($c-S_i$) pristupačnijim i visoko efikasnijim u poređenju sa drugim materijalima [30].

Silicijumske solarne ćelije sa PERC tehnologijom

Silicijumske solarne ćelije sa PERC tehnologijom (eng. passivated emitter and rear cell/contact) koriste naprednu arhitekturu silikonskih ćelija. PERC ćelije se po konstrukciji ne razlikuju mnogo od tipičnih monokristalnih PV ćelija. Međutim, ključno poboljšanje je integracija sloja pasivizacije zadnje površine, tj. dodavanje posebnog sloja na zadnjoj strani ćelije koji ne apsorbuje već reflektuje svjetlost i u stanju je da tako poboljša njenu efikasnost. PERC je tek nedavno počeo da ulazi u komercijalnu upotrebu, ali je brzo postao novi industrijski standard za monokristalne ćelije.

Tandem solarne ćelije

Tandem solarne ćelije su grupe pojedinačnih ćelija, poređane jedna preko druge, od kojih svaka selektivno pretvara određeni opseg svjetlosti u električnu energiju. Ova vrsta solarne ćelije je dizajnirana tako da gornji slojevi uvijek ostavljaju jedan dio talasne dužine svjetlosti da se apsorbuje i pretvori u električnu energiju iz donjih nivoa. Nove fotonaponske tehnologije obuhvataju nekoliko tipova tandem ćelija koje se mogu grupisati uglavnom u zavisnosti od materijala koji se koriste (npr. organski, neorganski, hibridni). Pristup tandemskim ćelijama je korišćen za proizvodnju najefikasnijih solarnih ćelija na svijetu koje mogu da pretvore 46% sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Nažalost, ovi uređaji koriste veoma skupe materijale i procese proizvodnje i još uvijek ne mogu da se efikasno probiju na tržištu [32].

“Tanak-film” tehnologija

Tehnologije “tankog filma” se često nazivaju solarnim ćelijama druge generacije. Poluprovodnički materijali koji se koriste za proizvodnju tankoslojnih ćelija su debeli samo nekoliko mikrometara. Ove tehnologije generalno uključuju dvije glavne porodice: tanki film na bazi silicijuma (amorfni silicijum [$a-S_i$] i mikromorfni silicijum [$a-S_i / c-S_i$]; i na bazi silicijuma (perovskiti, kadmijum telurid [C_dT_e] i bakar-indijum-galijumdiselenid [$CIGS$]). Ove tehnologije mogu biti jeftinije za proizvodnju, kao takve se primjenjuju u komercijalnom obimu, ali su istorijski imale niži nivo efikasnosti [33].

Trenutno, tehnologija tankog filma zauzima samo 5% globalnog tržišta solarnih fotonaponskih modula, dok solarni moduli na bazi silikona i dalje drže približno 95% globalnog tržišta fotonaponskih modula [34].

2.4.3 Napredne tehnologije fotonaponskih modula

Bifacijalne solarne ćelije

Bifacijalne solarne ćelije se razvijaju decenijama i njihov proizvodni proces se može smatrati jednim od najnaprednijih za solarne module danas. Bifacijalne ćelije su sposobne da generišu električnu energiju ne samo od sunčeve svjetlosti primljene na njihovoj prednjoj strani, već i od reflektovane sunčeve svjetlosti primljene na poleđini ćelije.

Bifacijalni rad, olakšan uzimanjem PERC tehnologije, nudi kratkoročno efektivno povećanje efikasnosti od 5 do 20% u odnosu na primjenu standardnih solarnih ćelija [35].

“Multi-busbars” solarne ćelije

Silicijumske solarne ćelije su metalizovane tankim trakama postavljenim na prednjoj i zadnjoj strani solarne ćelije. Oni se nazivaju sabirnicama i imaju svrhu da provode jednosmernu struju (DC) koju generiše ćelija. Starije solarne ćelije su obično imale dvije sabirnice, međutim, industrija je krenula ka većoj efikasnosti i sabirnice su se povećale na tri (ili više) u većini solarnih ćelija. Povećani broj sabirnica ima nekoliko prednosti: prva je veliki potencijal za uštedu zbog smanjenja potrošnje metala za metalizaciju čelone strane [36]; druga, serijski gubici otpora se smanjuju upotrebom tankih žica umjesto obične trake [35]; i treća, optimizacija širine sabirnica dovodi do dodatnog povećanja efikasnosti. Veći broj sabirnica dovodi do veće efikasnosti modula zbog smanjenih gubitaka unutrašnjeg otpora, uslijed manjeg rastojanja između sabirnica [35].

Solarne šindre

Solarne šindre su vrsta rješenja za solarnu energiju gdje su solarni paneli dizajnirani da izgledaju kao konvencionalni krovni materijali, a istovremeno proizvode električnu energiju. Solarne šindre imaju nekoliko prednosti. Prvo, ključna prednost je to što eliminišu potrebu za trakom, povezujući ćelije poput crijepova. Drugo, poboljšana je estetika modula, jer su paneli homogene boje. Treće, za razliku od standardne ćelije, ćelije za module od šindre imaju sabirnice na suprotnim krajevima i ćelije su isječene na nekoliko traka, što smanjuje struju, a samim tim i opterećenje na sabirnicama. Ovo takođe omogućava smanjenje broja sabirnica i njihove debljine, čime se smanjuju gubici uslijed pojave sjenke i poboljšava izlazna snaga ćelije [35].

2.4.4 Budućnost projekata i prototipa solarnih sistema

Plutajući fotonaponski sistemi

Plutajući fotonaponski sistemi su inspirativno tržište u nastajanju, sa potencijalom za brz rast. Potražnja za plutajućim fotonaponskim sistemima se širi, posebno na ostrvskim državama, ali i drugim zemljama koje imaju značajne vodene površine, jer je cijena vodene površine generalno niža od cijene zemljišta. Pored toga, pokrivanjem površine rezervoara za vodu, plutajuće solarne elektrane takođe mogu smanjiti isparavanje i zaštititi kvalitet vode od prekomjernog rasta algi. Međutim, kao i kod svake nove tehnologije, potrebno je prevazići nekoliko inženjerskih izazova. Na primjer, sistemi za privez (ili sidrenje) moraju biti projektovani da izdrže dinamičke sile talasa i jakih vjetrova, pa zbog novine ove tehnologije, stručnjaci za privez imaju ograničeno iskustvo u primjeni takvih sistema na plutajućim fotonaponskim postrojenjima. Kao rezultat toga, plutajuće fotonaponske instalacije se uvijek u određenoj mjeri pomjeraju, što se povećava sa neizbježnim djelovanjem sile vjetra [37].

Solarno drveće

Solarno drveće funkcioniše slično kao pravo drveće, jer ima solarne panele nalik listovima koji su povezani kroz metalne grane koristeći sunčevu svjetlost za proizvodnju električne energije. Ono je ergonomičnije od solarnih panela, u prosjeku zauzima skoro 100 puta manje prostora za proizvodnju iste količine električne energije kao horizontalna solarna elektrana i kao takvo predstavlja idealno rješenje za zemlje i ekonomije sa ograničenim zemljištem i prostorom [37].

Desalinizacija na solarni pogon

Većina postrojenja za desalinizaciju danas se pokreće na fosilna goriva, što ih čini neodrživim na duži vremenski period. Kako tehnike desalinizacije zasnovane na membrani ne zahtijevaju toplotu, one se mogu povezati sa proizvodnjom energije Sunca. Sa padom cijene fotonaponske opreme i sve većom potražnjom za desalinizacijom, u narednim godinama može se očekivati više membranskih postrojenja za desalinizaciju sa solarnim pogonom [37].

Solarni nadstrešnici

Solarni nadstrešnici za automobile su solarni paneli koji se postavljaju tako da se ispod njih mogu postaviti parkinzi i kućni prilazi, kako bi na taj način formirali nadstrešnicu za

automobil. Oni su bili veoma popularna alternativa ili dopuna klasičnim krovnim sistemima, sa prednošću što se mogu ugraditi potpuno nezavisno od ugla krova, oblika i orijentacije kuće. Osim što pružaju hlad vozilima parkiranim ispod, oni mogu efikasno da proizvode električnu energiju i na taj način nude niz prednosti. Prvo, ako je u kombinaciji sa dobro dizajniranim sistemom za punjenje, proizvedena električna energija može se koristiti za punjenje električnog vozila i na taj način smanjiti troškove upravljanja vozilom. Drugo, oni mogu da obezbijede poboljšanja u skladištenju energije tako što imaju integrisano skladište, tj. baterije. Treće, za razliku od sistema na zemlji, oni se lako prilagođavaju i mogu uštedjeti prostor jer im nije potrebna dodatna struktura ili zemljište da bi se instalirali [38].

Solarni fotonaponsko-termički (PV-T) sistemi

Solarni PV-T sistemi kombinuju proizvodnju obje vrste solarne energije u jednom kolektoru. Sastoji se od solarnog fotonaponskog panela u kombinaciji sa sistemom za hlađenje gdje rashladni agens (voda ili vazduh) cirkuliše oko fotonaponskog panela kako bi se ohladile solarne ćelije, tako da se topla voda ili vazduh koji izlaze iz panela mogu koristiti za kućne aplikacije kao što je npr. grijanje doma. Ovaj sistem hlađenja za fotonaponske panele ima dvostruku korist: značajno povećava efikasnost fotonaponskih sistema u sektoru električne energije, a takođe omogućava "hvatanje" toplote iz fotonaponskih sistema za upotrebu u prostoru, vodi i procesnom grijanju u nizu industrija i aplikacija. U stvari, fotonaponski moduli obično koriste od 15% do 20% dolazne solarne energije, dok se ostatak gubi u obliku toplote. PV-T tehnologija ima za cilj da poveća ukupnu efikasnost korišćenjem ove izgubljene energije za zagrijavanje vazduha ili vode i istovremeno hlađenje solarnih ćelija oduzimanjem toplote panelu [39].

Agro-fotosistemi

Agro-fotosistemi (eng. agrophotovoltaic) kombinuje fotonaponske sisteme i poljoprivredu na istom zemljištu. Osnova ideja sastoji se od uzgoja usjeva ispod solarnih panela postavljenih na zemlju. Iako je koncept davno predložen, godinama je dobijao malo pažnje, sve dok nekoliko istraživača nije potvrdilo prednosti uzgoja usjeva ispod sjenke koju pružaju solarni paneli. To istovremeno uključuje veću proizvodnju električne energije, veće prinose usjeva i manje utrošene vode [40,41].

3. Solarna ćelija

Fotonaponska ćelija (*eng. photovoltaic cells*), tzv. solarna ćelija, je glavna komponenta svakog solarnog sistema i najmanji je njen dio. Reaguje na direktnu i indirektnu sunčevu radijaciju, tako što pretvara energiju zračenja u električnu energiju strujanjem elektrona između dva sloja poluprovodnika [42].

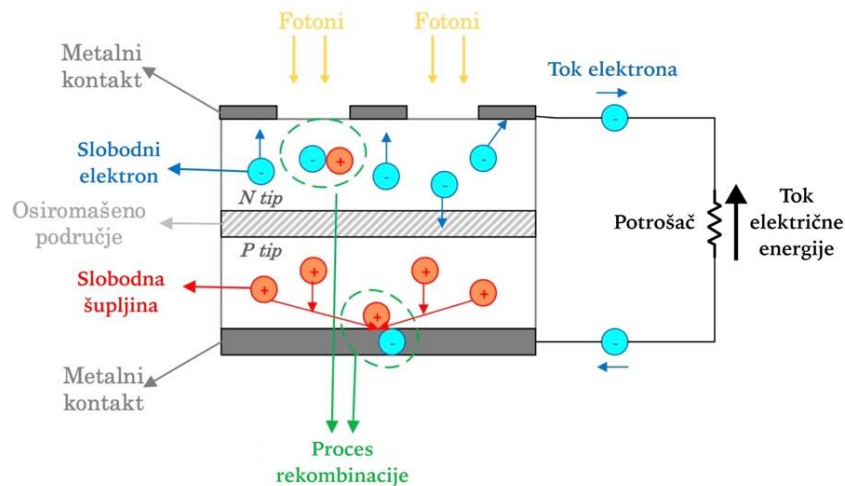
3.1 Princip rada solarne ćelije

3.1.1 Teorijski aspekt fotonaponskog efekta

Fotonaponski efekat (*eng. photovoltaic effect*) je osnovni fizički proces pretvaranja sunčeve svjetlosti u električnu energiju u fotonaponskim ćelijama. Jednostavno govoreći, fotonaponski efekat se može opisati ovako: sunčeva svjetlost, koja je čista energija, ulazi u fotonaponsku ćeliju i predaje dovoljno energije elektronima unutar nje da bi ih time oslobodila veza sa svojim atomom [43]. Potencijalna barijera u ćeliji reaguje na ove elektrone tako što generiše napon (tzv. fotonapon), koji se dalje koristi za stvaranje električne energije kroz kolo. Drugim riječima, ovim fenomenom se unutar solarne ćelije direktno, bez ikakvog posrednika, pretvara sunčeva svjetlost (fotoni) u električnu energiju [44].

Kada zraka svjetlosti (foton) „udari” u valentni elektron unutar silicijumske solarne ćelije, on mu predaje dovoljno energije da ga oslobodi veze sa svojim atomom. Time je ostavljen slobodan prostor, tj. šupljina u kristalnoj strukturi gdje se elektron nekada nalazio. Dakle, atom silicijuma apsorbuje energiju fotona i stvara se par elektron-šupljina koji počinje da se kreće kroz materijal. Kada bi se taj proces pustio da ide svojim “slučajnim” tokom, par elektron-šupljina bi se rekombinovao za otprilike milioniti dio sekunde i ne bi doprinijeli stvaranju električne struje. Da bi se ovo izbjeglo, potrebno je elementarni poluprovodnik p i n tipa dopirati elementima iz III ili V grupe periodnog sistema, respektivno. Drugim riječima, neophodno je formirati pn spoj. Kada se manjinski nosioci naelektrisanja (sa obje strane spoja) približe dovoljno da osjete privlačnu silu električnog polja u pn spoju, tada nosioci naelektrisanja koji imaju dovoljno energije prelaze na drugu stranu spoja i stvara se oblast prostornog tovara [45,46]. Većinske nosioce u oba primjesna poluprovodnika, s druge strane, odbija ovo novostvoreno električno polje. Na spoju se pojavljuje mala razlika napona, tj. potencijalna barijera. Djelujući na ovaj način, polje sortira fotogenerisane elektrone i šupljine, gurajući elektrone na jednu stranu barijere i šupljine na drugu. Dakle, na samom spoju dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina, nastaje oblast prostornog tovara unutar koje postoji

unutrašnje električno polje koje sprječava dalju rekombinaciju parova elektron - šupljina i koje drži elektrone na n -strani, a šupljine na p strani materijala. Ukoliko se električni kontakti priključe za gornji i donji dio ćelije, elektroni će se kretati od n dijela kroz opterećenje, pa nazad do p dijela. Kada dođu do p dijela, elektroni se rekombinuju sa šupljinama, pri tome zatvarajući krug. Upravo je to polje neophodno za proticanje električne struje nakon fotonaponske konverzije, a kompletan opisani fizički proces se naziva fotonaponski efekat. Ilustrovan prikaz fotonaponskog efekta je dat na slici 3.1 [47,48].



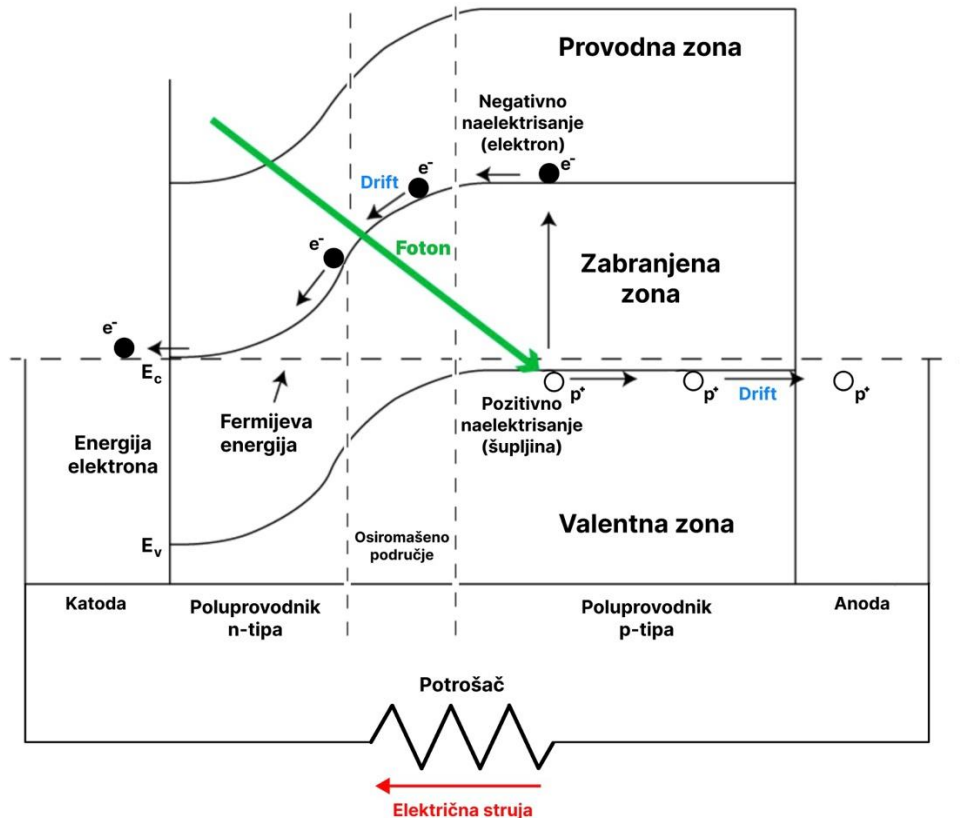
Slika 3.1: Ilustrovan prikaz fotonaponskog efekta.

Dakle, kada solarna ćelija apsorbira sunčevo zračenje, na taj način pokreće se fotonaponski efekat, stvarajući elektromotornu silu na svojim krajevima. Na taj način solarna ćelija postaje izvor električne struje. Osvjetljenje solarne ćelije dovodi do stvaranja parova elektron - šupljina kao rezultat apsorbovanih fotona. U slučajevima kada se apsorpcija odvija daleko od pn spoja, ovi parovi se brzo rekombinuju. Međutim, ako se apsorpcija dogodi unutar ili u blizini pn spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u oblasti prostornog tovara, razdvaja nastali elektron i šupljinu. Ovo razdvajanje uključuje kretanje elektrona prema n strani, a šupljina prema p strani. Akumulacija elektrona i šupljina na njihovim stranama pn spoja generiše elektromotornu silu na krajevima ćelije [49].

3.1.2 Apsorpcija svjetlosti u solarnoj ćeliji

Kada fotoni Sunčeve svjetlosti dođu u kontakt sa fotonaponskom ćelijom, samo fotoni sa određenim nivoom energije mogu da oslobode elektrone iz svojih atomskih veza kako bi kasnije generisali električnu struju. Teorija energetske zone pokazuje da je potencijalna

barijera ustvari količina energije potrebna da se elektron pomjeri iz valentnog pojasa u provodni pojas (slika 3.2). Taj nivo energije se razlikuje za svaki materijal, ali i za različite atomske strukture istog materijala. Različiti materijali fotonaponskih ćelija imaju energiju potencijalne barijere u rasponu od 1 eV do 3.3 eV.



Slika 3.2: Dijagram energetske zone solarne ćelije.

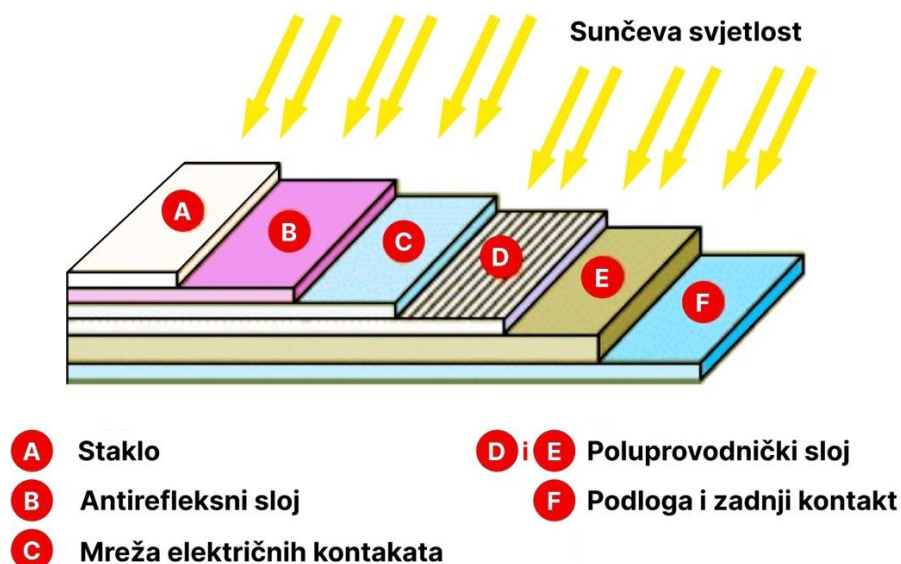
Jedan od ključnih uslova za dobijanje efikasne fotonaponske ćelije je da se što više sunčeve svjetlosti pretvori u električnu energiju. Odabir najboljeg apsorbujućeg materijala je veoma važan korak, jer energija potencijalne barijere materijala određuje koliki dio sunčevog spektra može da se apsorbuje. Silicijum zahtijeva da fotoni imaju energiju od najmanje 1.1 eV da bi se apsorbovali i stvorili parove nosilaca naelektrisanja. Fotoni sa manje energije ili prolaze pravo kroz silicijum ili se apsorbuju kao toplota. Fotoni sa previše energije se apsorbuju i doprinose slobodnim nosiocima naelektrisanja, ali takođe zagrijavaju ćeliju. Većina fotonaponskih ćelija ne može da iskoristi oko 55% energije sunčeve svjetlosti zato što je ova energija ili ispod graničnog pojasa ili nosi višak energije [50]. Materijali sa energijama manjim od potencijalne barijere mogu da iskoriste širi opseg sunčevog spektra energije, stvarajući veći broj nosilaca naelektrisanja (veća struja). Zaključak bi bio da materijal sa najmanjim razmakom u pojasu na taj način čini najbolju fotonaponsku ćeliju. Međutim, to nije baš tako jednostavno

primijeniti u praksi. Energija zabranjene zone takođe utiče na jačinu električnog polja, koje određuje maksimalni napon koji ćelija može da proizvede. Što je veća energija zabranjene zone materijala, to je veći napon otvorenog kola. Snaga električnog uređaja kao što je fotonaponska ćelija jednaka je proizvodu napona (V) i struje (I). Ćelije sa malom širinom zabranjene zone imaju veliku struju, ali nizak napon, dok ćelije sa velikom širinom zabranjene zone imaju visok napon i nisku struju. Kompromis je neophodan u dizajnu fotonaponskih ćelija. Ćelije napravljene od materijala sa širinama između 1 eV i 1.8 eV mogu se efikasno koristiti u fotonaponskim uređajima [50,51].

3.1.3 Struktura solarne ćelije

Na slici 3.3 je prikazana struktura fotonaponske ćelije, koja se sastoji iz različitih dijelova od kojih su najvažniji:

- Zaštitni providni sloj (prekrivač najčešće izrađen od plastike ili stakla);
- Providni adhezivni sloj;
- Antirefleksioni sloj;
- Mreža električnih kontakata sa prednje strane solarne ćelije;
- Aktivni poluprovodnički sloj (*pn* spoj);
- Električni provodni sloj (električni kontakt sa zadnje strane fotonaponske ćelije);
- Podloga (noseći sloj).



Slika 3.3: Tipična struktura fotonaponske ćelije.

Površinski zaštitni sloj služi za zaštitu solarnih ćelija od fizičkih uticaja i različitih vremenskih uslova. Ispod zaštitnog sloja nalazi se antirefleksioni sloj čiji značaj postaje očigledan kada se uzme u obzir da bi se bez njegovog prisustva aktivni silicijumski sloj ponašao slično reflektujućoj površini kao što je ogledalo, odbijajući više od 30% dolazne svjetlosti. Da bi se povećala efikasnost konverzije solarnih ćelija, potrebno je smanjiti procenat refleksije svjetlosti, čime se povećava dio apsorbirane svjetlosti odgovoran za generisanje slobodnih elektrona unutar aktivnog poluprovodničkog sloja. Postoje dvije osnovne metode za ublažavanje refleksije. Prva metoda podrazumijeva nanošenje tankog sloja silicijum-monoksida (SiO) ili silicijum - nitrida. Jedan sloj silicijum monoksida smanjuje stopu refleksije na 10%, dok se nanošenjem dva takva sloja dodatno smanjuje refleksija na samo 4%. U međuvremenu, antirefleksni premaz silicijum - nitrida podiže efikasnost fotonaponske ćelije za više od 15%. Druga metoda podrazumijeva modifikaciju gornje površine aktivnog sloja da bi se poboljšala hrapavost njegove površine.

Osim antirefleksionog sloja koji se nalazi na prednjoj strani solarne ćelije, provodni sloj poznat kao zadnja elektroda ima značajan uticaj na ukupnu apsorpciju svjetlosti unutar aktivnog sloja. Električni kontakti imaju ključnu ulogu u solarnim ćelijama jer uspostavljaju vezu između aktivnog poluprovodničkog sloja i spoljašnjeg električnog kola (potrošača). Tehnološki gledano, zadnji kontakt je relativno jednostavan, često uključuje metalni sloj sastavljen od aluminijuma ili molibdena. Međutim, izazov leži u kontaktu sa prednje strane. Ova elektroda mora da obuhvati maksimalnu dostupnu prednju površinu da bi uhvatila što više fotogenerisanih elektrona. Ali ovo takođe pojačava refleksiju dolazeće svjetlosti sa metalnog sloja. Tu se javljaju konfliktni zahtjevi, koji uključuju detaljnu analizu i optimizaciju korišćenjem odgovarajućih metoda. Često se prednja elektroda oblikuje kao rešetka od vitkih provodnih traka. Dimenzije i raspored ovih provodnih traka zahtijevaju optimizaciju kako bi se što je više moguće obezbjedilo sakupljanje elektrona, dok se s druge strane minimiziraju smetnje u apsorpciji svjetlosti u aktivnom sloju. Debljina ovih traka je bitan faktor, s obzirom na to da njihova električna provodnost zavisi od nje, pa je treba maksimalno povećati, dok je istovremeno poželjno da ostanu što tanje, čineći ih djelimično providnim za upadnu svjetlost [52].

Proces izrade "rešetkaste elektrode" značajno povećava ukupne troškove povezane sa proizvodnjom solarnih ćelija. Sloj provodnog oksida pronalazi čestu primjenu tokom proizvodnog procesa, posebno u proizvodnji određenih tipova solarnih ćelija sa tankim filmom

(eng. *the thin-film PV cells*), kao što su one na bazi amornog silicijuma i kadmijum-telurida. U slučaju ovih ćelija, ovaj providni zaštitni sloj služi i kao supstrat na koji se nanosi tanak sloj aktivnog poluprovodničkog materijala. Ovo čini "*upside down*" ćelijsku strukturu kod kojih nije uključena zadnja podloga. Fotonaponski aktivni sloj može se sastojati od različitih poluprovodničkih materijala, primjenjenih ili raspoređenih u različitim konfiguracijama, kako bi se obezbjedile optimalne performanse dobijene solarne ćelije. U zavisnosti od sastava materijala, mogu se identifikovati tri različita tipa fotonaponskih kola [52]:

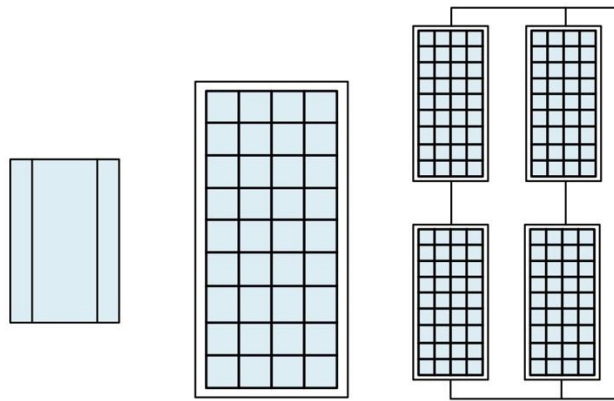
- Silicijum u monolitnoj konfiguraciji, koji može imati različite oblike (monokristalni, mikrokristalni i amorfni silicijum).
- Tanki film sa polikristalnom strukturom, gdje bakar – indijum - diselenid (CIS), kadmijum - telurid (C_dT_e) i tankoslojni silicijum nalaze čestu primjenu.
- Monokristalni tanki film (monokristalni tanki film), gdje značajnu ulogu igra galijum - arsenid (G_aA_s).

Strukturni sastav fotonaponskih kola zavisi od ograničenja koja nameću materijali koji se koriste u proizvodnji fotonaponskih ćelija. U zavisnosti od toga kako su ovi materijali integrisani za stvaranje solarne ćelije, mogu se kategorizovati četiri različite konfiguracije fotonaponskih kola [52,53]:

- homogeni spoj,
- hetero spoj,
- p - n i n - p kola,
- višespojno kolo.

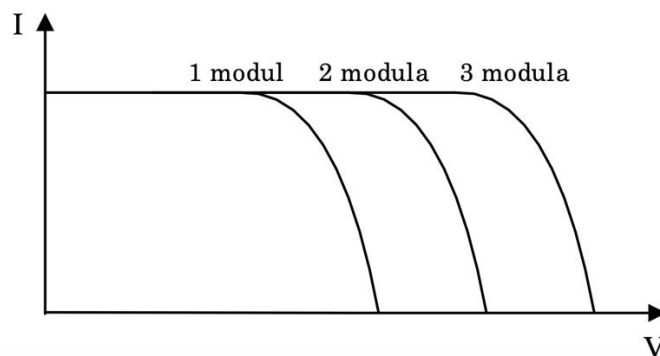
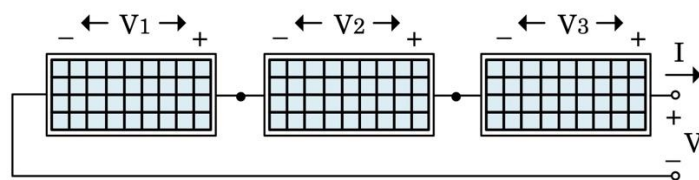
3.1.4 Fotonaponski elementi i sistemi

Solarna ćelija čini osnovnu komponentu modula i panela. Međutim, kako obično generiše samo oko 2 W energije, rijetke su aplikacije kada je samo jedna ćelija u upotrebi. Shodno tome, solarne ćelije je moguće vezati redno (serijski) ili paralelno, čime se formiraju veće jedinice koje se nazivaju fotonaponski moduli. Moduli od 12 V, koji se sastoje od 36 ćelija povezanih serijski su tradicionalno najzastupljeniji, iako danas moduli koji se sastoje od 72 ćelije takođe nalaze široku primjenu. Ovi 72-ćelijski moduli se mogu različito povezati da bi se postigao željeni izlazni napon. Povezivanje svih 72 ćelije serijski daje modul od 24 V, dok povezivanje dva paralelna niza od po 36 serijski povezanih ćelija rezultira modulom od 12 V. Slika 3.4 daje ilustraciju solarne ćelije, modula i panela, prikazujući jasnu razliku između njih.



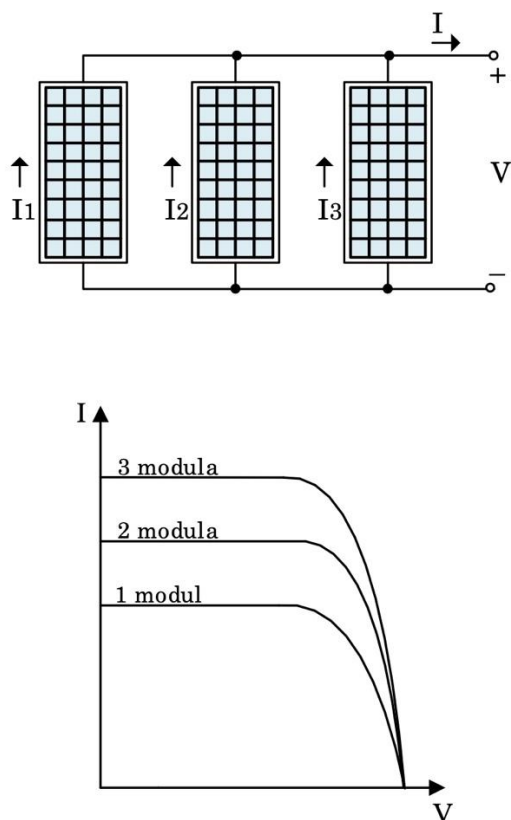
Slika 3.4: Solarna ćelija, modul i panel.

Solarni moduli se dalje povezuju u solarne panele. Ako je cilj solarnog panela postići što veći izlazni napon tada se moduli povezuju serijski, dok za slučaj kada je cilj postići veću izlaznu struju moduli se spajaju paralelno. Shodno tome, dizajn fotonaponskog sistema zaslužuje posebnu pažnju, jer je neophodno određivanje optimalne konfiguracije modula, bilo da se povezuju serijski ili paralelno, kako bi se postigla tražena izlazna snaga. Kod modula koji su povezani serijski, za konstantnu struju koja prolazi kroz sve module, kumulativni izlazni napon jednak je zbiru napona na pojedinačnim modulima. U zavisnosti od varijacija u izlaznom naponu, I - V kriva se suštinski pomjera duž V -ose, kao što je prikazano na slici 3.5 [54,55].



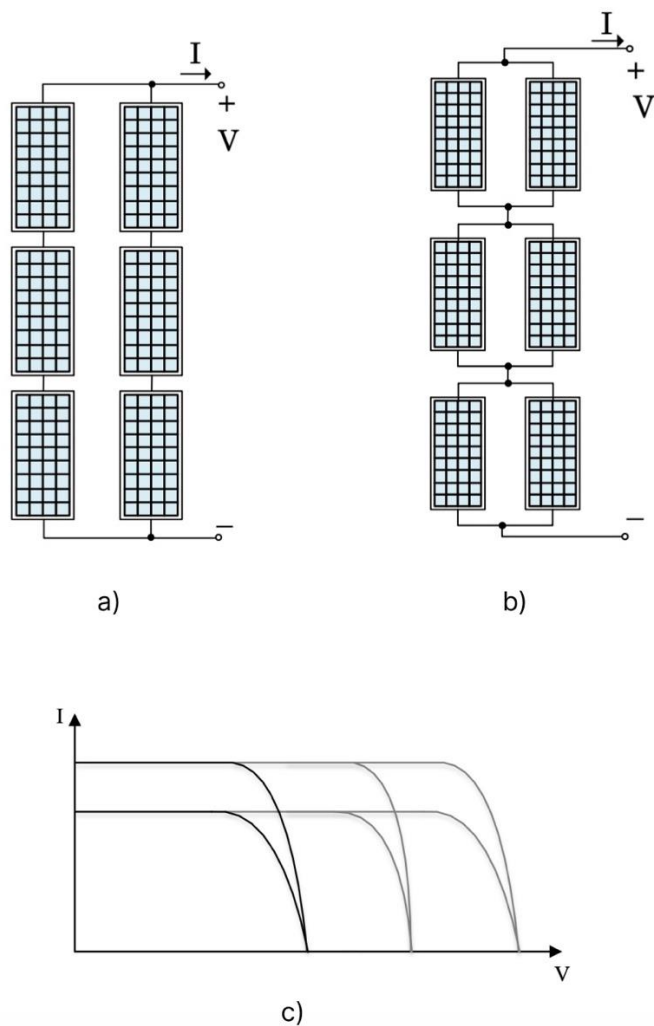
Slika 3.5: Serijski povezani moduli sa dijagramom povećanja izlaznog napona.

Nasuprot tome, kada su moduli povezani paralelno isti napon se primjenjuje na sve module, a ukupna izlazna struja je zbir struja koje prolaze kroz svaki modul pojedinačno. Shodno tome, za dati napon i različite vrijednosti izlazne struje, I - V kriva se pomjera duž I -ose, kao što je prikazano na slici 3.6 [56].



Slika 3.6: Paralelno povezani moduli sa dijagramom povećanja izlazne struje.

Kada postoji potreba za velikom izlaznom snagom, uobičajeno je kombinovati module u panelu koristeći mješavinu njihovih serijskih i paralelnih veza. Na ovaj način, rezultujuća I - V kriva je zbir I - V krivih pojedinačnog modula. Postoje dva metoda da se to postigne. Jedan metod uključuje prvo povezivanje modula serijski, a zatim paralelno povezivanje ovih serijskih konfiguracija (slika 3.7a). Drugi metod uključuje grupisanje paralelno povezanih modula u serijsku vezu (sliku 3.7b). Međutim, u praktičnim primjenama, prvi metod je pretežno favorizovan. Ova preferencija proizilazi iz fleksibilnosti koju nudi, kao što je mogućnost zamjene niza modula u slučaju kvara, dok se i dalje osigurava da panel obezbjeđuje potreban napon za opterećenje. Rezultujuće I - V krive su prikazane na slici 3.7c [57].



Slika 3.7: a) Paralelna veza serijski povezanih modula, b) Serijska veza paralelno povezanih modula, c) Rezultujuća I - V kriva.

3.2 Matematički modeli solarne ćelije

Za predviđanje ponašanja stvarne solarne ćelije u različitim okruženjima kao i za određivanje struja-napon (I - V) i snaga-napon (P - V) karakteristika, adekvatno modelovanje solarnih ćelija je neophodno. Ovi modeli omogućavaju da se analitički procijene unutrašnji parametri fotonaponske ćelije. Jedan od problema prilikom projektovanja solarnih fotonaponskih sistema je pronalaženje modela koji može da tačno i precizno reprodukuje ponašanje sistema u različitim uslovima proizvodnje.

Dakle, da bi se reprodukovalo realno električno ponašanje fotonaponskih solarnih ćelija, potreban je odgovarajući matematički model koji je relevantan i pouzdan u svim uslovima. U literaturi se predlažu različiti modeli da se ovo simulira. Svi oni najčešće imaju diodu kao

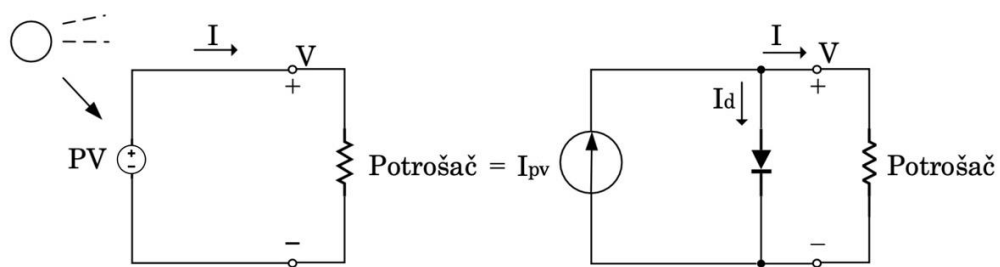
centralni element. Tri modela se uglavnom koriste u matematičkom modelovanju fotonaponskih ćelija: jednodiodni model, dvodiodni model, i nedavno uveden za industrijske primjene, trodiodni model solarne ćelije [58,59].

3.2.1 Jednodiodni model solarne ćelije

U matematičkom smislu, solarna ćelija se opisuje nelinearnim odnosom struje i napona. Najjednostavniji model solarne ćelije je model sa jednom diodom. Ovaj model se sastoji od jednog strujnog generatora I_{pv} , izvora fotostruje, dva otpornika (serijski R_s i paralelni R_p) koji predstavljaju gubitke u solarnoj ćeliji i jedne diode. Kako je dioda opisana sa dva nepoznata parametra (struja zasićenja I_0 i idealni faktor α), jednodiodni model se naziva model solarne ćelije sa pet parametara. Klasični model sa pet parametara je najšire prihvaćen, ali i najmanje tačan model solarnih ćelija [60].

3.2.1.1 Idealni model solarne ćelije

Idealni model fotonaponske ćelije ima najjednostavniju ekvivalentnu šemu. Elementi šeme su paralelno povezani strujni izvor I_{pv} i poluprovodnička dioda D . Strujni izvor generiše struju samo kada je fotonaponska ćelija izložena svjetlosti, i ista je proporcionalna sunčevom zračenju. Dioda u ekvivalentnoj šemi opisuje solarnu ćeliju formiranu od pn poluprovodničkog spoja. Idealni model solarne ćelije ima tri nepoznata parametra koji zahtijevaju proračun. Šema idealnog modela fotonaponske ćelije je data na slici 3.8 [61,62].



Slika 3.8: Idealni model solarne ćelije.

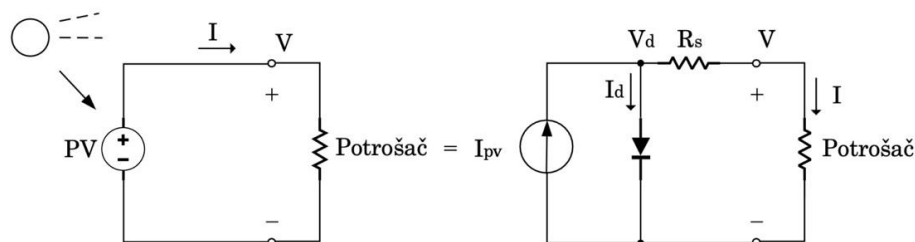
Analizirajući šemu za idealan slučaj, izlazna struja je data sljedećom relacijom:

$$I = I_{pv} - I_d = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{akT}} - 1 \right). \quad (3.1)$$

Pri čemu je I_{pv} fotonaponska struja koju generiše strujni izvor, a I_d struja koja protiče kroz diodu, I_0 inverzna struja zasićenja diode, U i I su izlazni napon i struja, respektivno, q je količina naelektrisanja elektrona koja je jednaka $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, k je Bolcmanova konstanta koja je jednaka $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, i n je faktor idealnosti diode. U praksi se uglavnom ovaj model izbjegava pri istraživanjima jer ima smanjenu preciznost u davanju rezultata [62,63].

3.2.1.2 Jednodiodni model ćelije sa rednom otpornošću

Više tačnosti se može uvesti u matematički model dodavanjem serijskog otpora R_s , koji u praksi predstavlja otpornost između p i n tipa slojeva solarne ćelije. Električna šema ekvivalentna ovom modelu prikazana je na slici 3.9 [64].



Slika 3.9: Jednodiodni model solarne ćelije sa rednom otpornošću.

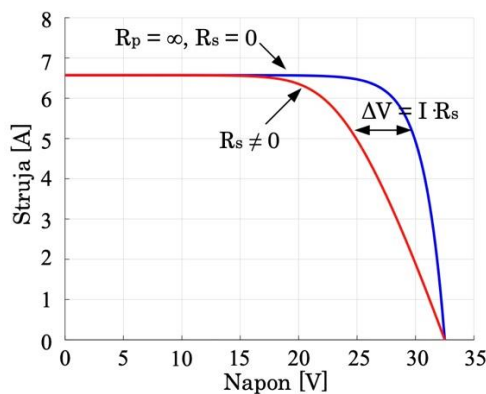
Izlazna struja ovog modela solarne ćelije ima oblik:

$$I = I_{pv} - I_d = I_{pv} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_d}{nkT_c}\right) - 1 \right], \quad (3.2)$$

gdje napon na diodi V_D predstavlja zbir izlaznog napona V i napona na dodatoj serijskoj otpornosti:

$$V_d = V + IR_s \quad (3.3)$$

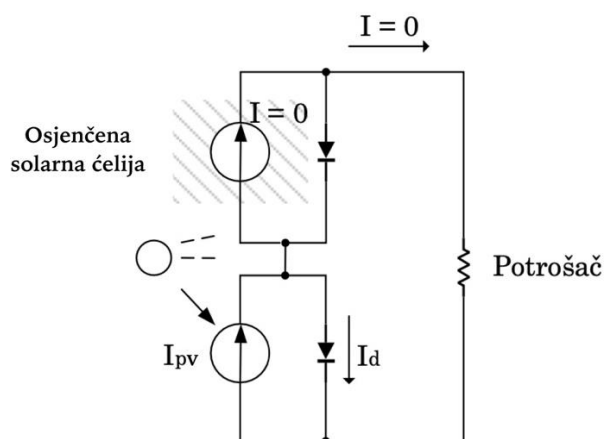
Uvođenjem redne otpornosti R_s uzrokuje pomjeranje I - V zavisnosti duž V - ose, što je predstavljeno na slici 3.10.



Slika 3.10: I - V karakteristika solarne ćelije sa dodatom rednom otpornošću.

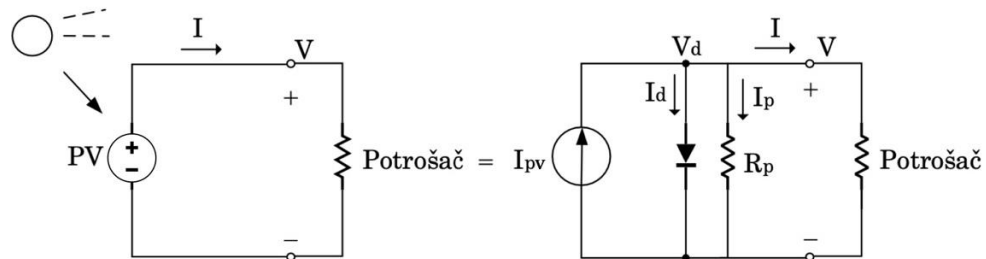
3.2.1.3 Jednodiodni model ćelije sa paralelnom otpornošću

U praktičnim uslovima, osim potrebe da se koristi složeniji model solarne ćelije da bi se povećala tačnost, mogu nastati okolnosti kada je jedna od serijski povezanih ćelija zasjenčena (direktna sunčeva svjetlost ne dopire do nje). U tom slučaju zasjenčena solarna ćelija ne generiše električnu energiju. Ako su solarne ćelije vezane serijski, i sve modelovane istim jednodiodnim idealnim modelom, generisana struja od strane drugih osvetljenih ćelija je takođe jednaka nuli, označena kao $I_{pv} = 0$, što u praksi ne može biti slučaj. Ovo se dešava zato što je nemoguće da struja I_{pv} teče kroz zasjenčenu ćeliju [65]. Dioda, postavljena u grani paralelno postavljenoj sa izvorom struje, sprječava protok struje od drugih osvetljenih solarnih ćelija povezanih serijski. Ova situacija je prikazana na slici 3.11 gdje je dat primjer dvije solarne ćelije redno povezane sa priključenim opterećenjem [65].



Slika 3.11: Redno povezane solarne ćelije, za slučaj kada je jedna od ćelija zasjenčena.

Navedeni problem se može riješiti vezivanjem otpornosti R_p paralelno sa izvorom struje. Tada struja koju generišu osvijetljene ćelije može da protекne i kroz zasjenčenu ćeliju, koristeći putanju koja uključuje otpornost R_p , prije nego što stigne do potrošača. Model solarne ćelije koji uključuje otpornost R_p prikazan je na slici 3.12 [66].



Slika 3.12: Jednodiodni model solarne ćelije sa paralelnom otpornošću.

Izlazna struja modela solarne ćelije definisanog na ovaj način sada dobija oblik jednačine:

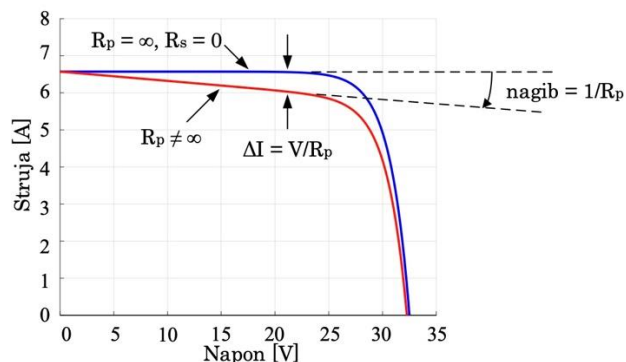
$$I = I_{pv} - I_d - I_p, \quad (3.4)$$

gdje je I_p struja koja protiče kroz paralelnu otpornost. Ova struja se definiše količnikom izlaznog napona V i otpornosti R_p :

$$I_p = \frac{V}{R_p}. \quad (3.5)$$

Istovremeno, paralelna otpornost R_p uključuje nečistoće i mikrodefekte unutar solarne ćelije, koji zavise od inherentnih svojstava ćelije.

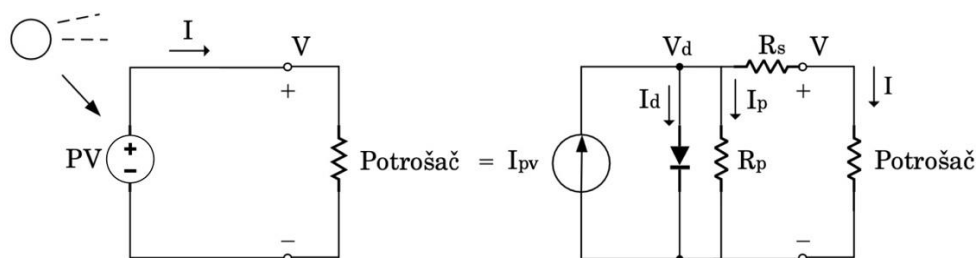
Na slici 3.13 je prikazana I - V karakteristika solarne ćelije sa dodatom paralelnom otpornošću R_p , što uvodi blagi nagib kod I - V zavisnosti.



Slika 3.13: I - V karakteristika solarne ćelije sa dodatom paralelnom otpornošću.

3.2.1.4 Kompletan jednodiodni model solarne ćelije

Istovremenim dodavanjem paralelne i redne otpornosti u kolo dobija se matematički najtačniji jednodiodni model solarne ćelije. Ekvivalentna šema kompletnog jednodiodnog modela prikazana je na slici 3.14. Ovaj model sadrži sljedeće elemente: izvor struje koji zavisi od karakteristika poluprovodničkog materijala, promjene sunčevog zračenja i temperature ćelije; dioda koja je paralelna sa izvorom struje i uzima u obzir fizičke efekte u pn -spoju; serijski otpornik (R_s) i šant otpornik (R_p). Jednodiodni model je konstruisan na osnovu kombinacije struja difuzije i rekombinacije diode, sa definisanjem nefizičkog faktora za idealnost diode [66,67].



Slika 3.14: Ekvivalentna šema jednodiodnog modela solarne ćelije.

Prema ekvivalentnom kolu sa slike 3.29 izlazna struja (I) se može zapisati na sljedeći način:

$$I = I_{pv} - I_d - I_p, \quad (3.6)$$

Struja otpora šanta (I_p) se izračunava pomoću sljedeće jednačine:

$$I_p = \frac{U + IR_s}{R_p}, \quad (3.7)$$

Struja diode (I_d) se dobija korišćenjem sljedeće jednačine:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (3.8)$$

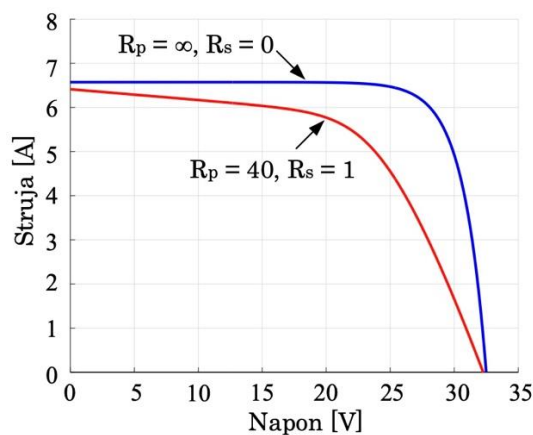
gdje je n faktore idealnosti diode, T je apsolutna temperatura pn spoja - u ovom slučaju temperatura ćelije, izražena u kelvinima [K].

Jednačina strujno (I) – naponske (V) zavisnosti solarne ćelije ima sljedeći oblik:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p}. \quad (3.9)$$

Prema tome, jednodiodni model ima 5 nepoznatih parametara $\theta = [I_{pv} R_s R_p I_0 n]$ koji se moraju estimirati.

I - V karakteristika kompletnog jednodiodnog modela solarne ćelije koja je definisana jednačinom (3.9), prikazana je na slici 3.15.



Slika 3.15: I - V karakteristika kompletnog jednodiodnog modela solarne ćelije.

Jednodiodni model se generalno smatra dobrim modelom za modelovanje fotonaponskih ćelija, upravo iz razloga što je jednostavan za implementaciju u mnogim eksperimentima optimizacije. Obično se jednodiodni model upotrebljava prilikom modelovanja amorfnih

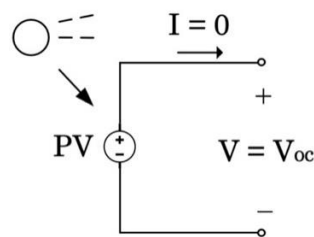
fotonaponskih ćelija. Međutim, uprkos poboljšanim performansama eksperimentalni i praktični rezultati su pokazali da se tačnost ovog modela pogoršava pri niskom zračenju [68,69].

3.2.1.5 Parametri solarne ćelije

Osnovni parametri solarne ćelije su: napon praznog hoda (V_{OC}), struja kratkog spoja (I_{SC}), maksimalna snaga (P_{mpp}), fil faktor (FF) i efikasnost (η).

Napon praznog hoda

Režim praznog hoda nastaje kada su krajevi kola otvoreni. Tada se može definisati napon praznog hoda V_{OC} (slika 3.16), koji predstavlja maksimalnu vrijednost napona na krajevima solarne ćelije u otvorenom električnom kolu.



Slika 3.16: Režim praznog hoda.

U režimu praznog hoda nema proticanja struje, pa je napon praznog hoda:

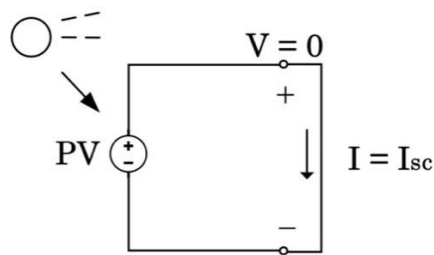
$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_f}{I_0} + 1 \right). \quad (3.10)$$

Napon praznog hoda je funkcija temperature, fotostruje (I_f) i struje zasićenja diode (I_0). Vrijednost napona praznog hoda se povećava sa porastom vrijednosti fotostruje, dok se smanjuje sa porastom temperature solarne ćelije. Takođe, njegova vrijednost se mijenja logaritamski sa promjenom intenziteta Sunčevog zračenja [70].

Struja kratkog spoja

Režim kratkog spoja nastaje kada su krajevi kola kratko spojeni, i kada kroz kolo protiče struja kratkog spoja I_{SC} . Kako u ovom slučaju ne protiče struja kroz diodu, struja I_{SC}

dobija vrijednost struje I_{pv} , koju strujni izvor predaje kolu (slika 3.17). Pri tome, struja I_{sc} predstavlja maksimalnu vrijednost struje solarne ćelije.



Slika 3.17: Režim kratkog spoja

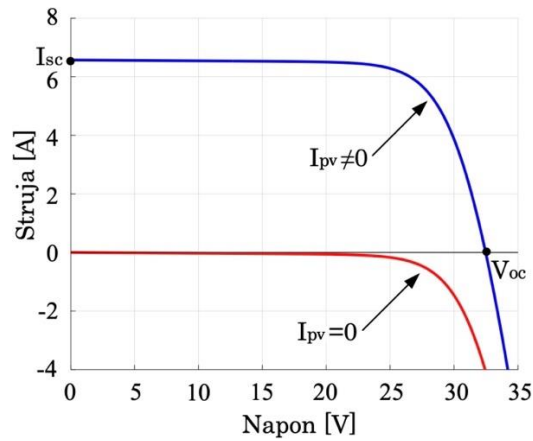
Za vrijednost $I_{oc} = 0$, dobija se struja kratkog spoja jednaka fotostruji I_f :

$$I_{sc} = I_f \quad (3.11)$$

Sa porastom temperature solarne ćelije, koja je u praksi uvijek povezana sa povećanjem intenziteta upadnog Sunčevog zračenja, neznatno se povećava struja kratkog spoja.

Vremenom na solarnim ćelijama može da se nataloži sloj prašine što za posljedicu može da ima značajno smanjenja struje kratkog spoja. Razlog tome je što je intezitet Sunčevog zračenja proporcionalan intezitetu struje kratkog spoja, pa kako se uslijed taloženja prašine na solarnim ćelijama smanjuje vrijednost intenziteta sunčevog zračenja koje dopijeva do njih, samim tim se smanjuje i struja kratkog spoja.

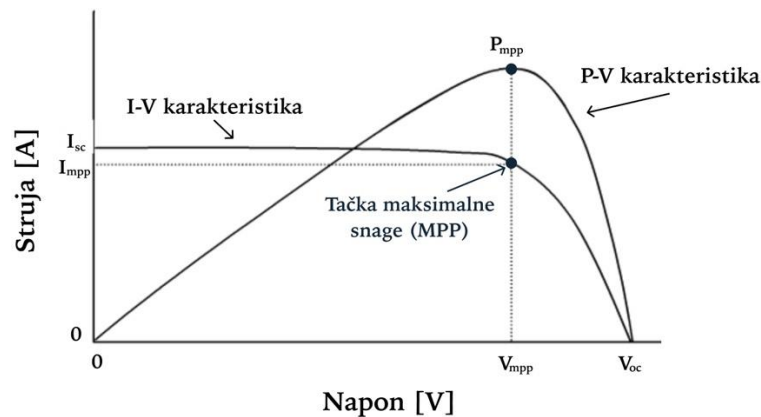
Analizom jednačine (3.1) se može izvesti zaključak o obliku I - V zavisnosti solarne ćelije. Struja I_{pv} ostaje konstanta, formirajući linearni segment. Nasuprot tome, negativan predznak struje diode I_d uzrokuje rotaciju krive opisane strujom I_d i naponom V oko x - ose. Spajanjem ove dvije zavisnosti, nastaje rezultujuća karakteristika izlazne struje solarne ćelije I u zavisnosti od izlaznog napona ćelije V , kao što je prikazano na slici 3.18. Na slici su predstavljene I - V zavisnosti osvijetljene ćelije, kada je vrijednost struje $I_{pv} \neq 0$, i zasjenčene ćelije, kada je $I_{pv} = 0$ [71].



Slika 3.18: I - V karakteristika solarne ćelije, uz prikaz njenih značajnih parametara.

Maksimalna snaga solarne ćelije

Električna snaga koju solarna ćelija može dati predstavlja proizvod napona i struje u nekoj tački strujno-naponske zavisnosti solarne ćelije. Ova vrijednost snage je uvijek manja od proizvoda U_{OC} i I_{SC} . Maksimalna radna tačka koja se nalazi na I - V karakteristici predstavlja tačku maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point* – *MPP*). Tačka maksimalne snage je definisana proizvodom maksimalne vrijednosti napona V_{mpp} i maksimalne vrijednosti struje I_{mpp} (slika 3.19).



Slika 3.19: Značajne tačke I - V i P - V zavisnosti solarne ćelije

Solarna ćelija ima maksimalnu snagu pri sljedećim uslovima:

$$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (3.12)$$

Maksimalna snaga solarne ćelije raste sa porastom inteziteta Sunčevog zračenja, a opada sa porastom njene temperature. Uzimajući u obzir da snaga solarne ćelije proizilazi iz proizvoda napona i struje, a znajući da taloženje prašine značajno umanjuje struju kratkog spoja, dolazi se do zaključka da taloženje prašine povlači sa sobom i smanjenje snage solarne ćelije [72].

Faktor popunjenosti solarne ćelije

Faktor popunjenosti (filling faktor) je mjera kvaliteta *pn* spoja i serijskog otpora solarne ćelije. Proizvod struje i napona u bilo kojoj tački strujno-naponske zavisnosti solarne ćelije uvijek je manji od proizvoda $U_{OC} \cdot I_{SC}$. U teoriji je moguće da vrijednosti V_{mpp} i U_{OC} , kao i vrijednosti I_{mpp} i I_{SC} imaju iste vrijednosti. Međutim, u praktičnim uslovima ovo je nemoguće postići. Za optimalnu radnu tačku u realnim uslovima faktor popunjenosti je manji od jedinice i obično se nalazi u granicama vrijednost od 0.7 do 0.9.

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (3.13)$$

Faktor popunjenosti pokazuje odnos realne maksimalne snage pri datim vremenskim uslovima ($V_{mpp} \cdot I_{mpp}$) i teorijske maksimalne snage ($U_{OC} \cdot I_{SC}$), tj. definiše koliko se ponašanje realne solarne ćelije približava idealnoj solarnoj ćeliji i koliki je uticaj serijskog otpora ćelije. Veće vrijednosti faktora popunjenosti odgovaraju malim vrijednostima serijskog otpora. S obzirom na to da serijski otpor zavisi od temperature, faktor popunjenosti se takođe mijenja sa promjenom temperature na način da kada temperatura solarne ćelije poraste, faktor popunjenosti se smanjuje. Ako dvije *I-V* krive dijele identične vrijednosti za struju kratkog spoja I_{SC} i napon otvorenog kola U_{OC} , solarni modul koji ima veću vrijednost faktora popunjenosti će dati veću snagu. Važno je naglasiti da svako oštećenje koja dovodi do smanjenja smanjenja faktora popunjenosti istovremeno rezultira smanjenom izlaznom snagom iz solarnog modula. Tipična vrijednost faktora popunjenosti za silicijumske ćelije je $F = 0.82$ [73].

Efikasnost solarne ćelije

Efikasnost solarne ćelije (stepen korisnog dejstva) predstavlja odnos između proizvedene snage i ulazne snage (snage sunčevog zračenja) koja pada na površinu ćelije:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{G \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{G \cdot S}, \quad (3.14)$$

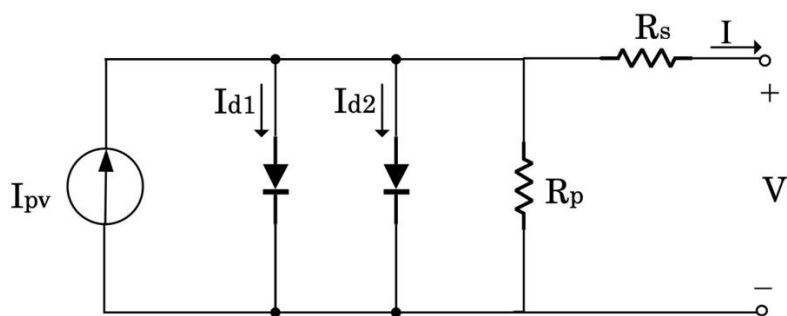
gdje je G intenzitet sunčevog zračenja, dok je S površina solarne ćelije.

Da bi efikasnost solarne ćelije bila što veća, potrebno je da proizvod U_{oc} i I_{sc} bude što veći, a sa druge strane da faktor popunjenosti bude što bliži jedinici. Efikasnost solarne ćelije zavisi i od intenziteta sunčevog zračenja i od temperature solarne ćelije. Kako se intenzitet sunčevog zračenja smanjuje ili temperatura solarne ćelije raste, efikasnost opada. Tipična vrijednost efikasnosti solarne ćelije za silicijumske ćelije je oko 10% [74].

3.2.2 Dvodiodni model solarne ćelije

Iako je struktura jednodiodnog modela jednostavna, njegova preciznost je relativno niska jer jednodiodni model ćelije suštinski zanemaruje gubitke uslijed struje rekombinacije. Uzimanjem ovih gubitka u obzir, posebno pri naponu otvorenog kola, dolazi se do preciznijeg modela. Dvodiodni model solarne ćelije, kao što je prikazano ekvivalentnom šemom na slici 3.20 koristi jednu diodu kao ispravljač dok se druga dioda primjenjuje za projektovanje rekombinacione struje.

Uvođenjem druge diode u kolo izrazi koji važe za ovaj model su nešto drugačiji u odnosu na jednodiodni model.



Slika 3.20: Ekvivalentna šema dvodiodnog modela solarne ćelije.

Model solarne ćelije sa dvostrukom diodom se sastoji od dvije diode paralelno vezane sa izvorom struje, što preciznije opisuje fizičke efekte pn spoja, posebno pri niskom nivou

zračenja. Jedna dioda modeluje difuzionu struju u pn spoju, a druga dioda predstavlja efekte rekombinacije u oblasti prostornog naboja [75].

Prema ekvivalentnom kolu dvodiodnog modela solarne ćelije, izlazna struja se može zapisati na sljedeći način:

$$I = I_{pv} - I_{d1} - I_{d2} - I_p, \quad (3.15)$$

Koristeći istu proceduru predstavljenu za kao za jednodiodni model, ova jednačina dobija oblik:

$$I = I_{pv} - I_{01} \left(e^{\frac{U+IR_S}{n_1 V_{th}}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{U+IR_S}{n_2 V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_p}, \quad (3.16)$$

U ovim jednačinama I_{02} označava inverznu struju zasićenja, dok je n_2 predstavlja faktore idealnosti druge diode. Ovaj model ima 7 nepoznatih parametara, a čiji se vektor nepoznatih parametara može definisati kao $\theta = [I_{pv} \ R_S \ R_p \ I_{01} \ I_{02} \ n_1 \ n_2]$.

Dvodiodni model solarne ćelije nema analitičko rješenje za struju u funkciji od napona niti za napon u funkciji od struje. Za dvodiodni model solarne ćelije izraz za struju kao funkciju od napona može se naći na sljedeći način:

$$I = \frac{R_p}{R_p + R_S} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} - \frac{U}{R_p} - \frac{n_1 V_{th}}{R_S} \left(1 + \frac{R_S}{R_p} \right) \cdot \Psi \right), \quad (3.17)$$

gdje ψ predstavlja rješenje transcendentne jednačine koja za dvodiodni model solarne ćelije ima oblik:

$$\alpha_D + \beta_D \cdot \exp(\delta_D \cdot \Psi) = \Psi \cdot \exp(\Psi), \quad (3.18)$$

U prethodnim jednačinama, konstante α_D , β_D i γ_D predstavljaju konstante koje zavise od parametara solarnih ćelija. Izrazi za navedene konstante su:

$$\alpha_D = \frac{\frac{R_S}{n_1 \cdot V_{th}}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_P}\right)} \cdot I_{01} \cdot \exp\left(\frac{U}{n_1 \cdot V_{th}}\right) \cdot \exp\left(\frac{\frac{R_S}{n_1 \cdot V_{th}} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} - \frac{U}{R_P}\right)}{\left(1 + \frac{R_S}{R_P}\right)}\right),$$

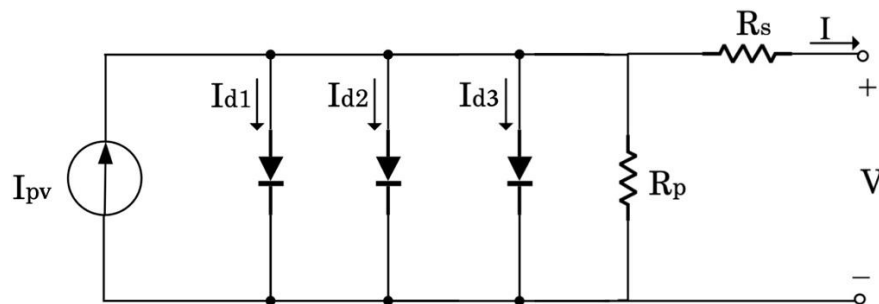
$$\beta_D = \frac{\frac{R_S}{n_1 \cdot V_{th}}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_P}\right)} \cdot I_{02} \cdot \exp\left(\frac{U}{n_2 \cdot V_{th}}\right) \cdot \exp\left(\frac{\frac{R_S}{n_2 \cdot V_{th}} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} - \frac{U}{R_P}\right)}{\left(1 + \frac{R_S}{R_P}\right)}\right), \quad (3.19)$$

$$\delta_D = 1 - \frac{n_1}{n_2}.$$

Nedostaci dvodiodnog modela u poređenju sa jednodiodnim modelom solarne ćelije jesu što je ovaj model računski zahtjevniji i neophodni su dodatni računarski resursi za njegovu simulaciju i analizu. Ovaj model se najčešće koristi prilikom modelovanja polikristalnih fotonaponskih ćelija [75].

3.2.3 Trodiodni model solarne ćelije

Trodiodni model solarne ćelije se izdvaja u ovom pogledu, obuhvatajući širi spektar mehanizama rekombinacije, što ga čini najtačnijim prikazom ponašanja solarnih ćelija. Šema ekvivalentnog kola trodiodnog modela je prikazana na slici 3.21 [75,76].



Slika 3.21: Ekvivalentna šema trodiodnog modela solarne ćelije.

Kao što je prikazano na slici 3.21, u ovom modelu se koriste tri diode paralelno povezane sa izvorom struje.

Prema ekvivalentnom kolu, odnos izlazne struje se može napisati na sljedeći način:

$$I = I_{pv} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_p, \quad (3.20)$$

Koristeći istu proceduru predstavljenu za prethodna dva modela dobija se:

$$I = I_{pv} - I_{01} \left(e^{\frac{U+IR_S}{n_1 V_{th}}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{U+IR_S}{n_2 V_{th}}} - 1 \right) - I_{03} \left(e^{\frac{U+IR_S}{n_3 V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_p}, \quad (3.21)$$

Analogno kao i za dvodiodni model, struja I_{03} označava inverznu struju zasićenja, dok n_3 označava faktor idealnosti treće diode. Dakle, dodavanjem treće diode se dodaju još dva nepoznata parametra, pa se vektor nepoznatih parametara sa 9 elemenata može definisati kao $\theta = [I_{pv} R_S R_p I_{01} I_{02} I_{03} n_1 n_2 n_3]$ [75,76].

Analogno dvodiodnom modelu solarne ćelije, ni trodiodni model nema analitičko rješenje za struju u funkciji od napona niti za napon u funkciji od struje, pri čemu je izraz za struju kao funkciju od napona dat kao [75,76]:

$$I = \frac{R_p}{R_p + R_S} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} + I_{03} - \frac{U}{R_p} - \frac{n_1 V_{th}}{R_S} \left(1 + \frac{R_S}{R_p} \right) \cdot \Psi \right), \quad (3.22)$$

gdje ψ predstavlja rješenje transcendentnih jednačina, za trodiodni model solarne ćelije:

$$\alpha_T + \beta_T \cdot \exp(\delta_T \cdot \Psi) + \gamma_T \cdot \exp(\sigma_T \cdot \Psi) = \Psi \cdot \exp(\Psi), \quad (3.23)$$

pa opet koristeći analogiju sa dvodiodnim modelom, za trodiodni model solarne ćelije konstante α_T , β_T , γ_T , i δ_T predstavljaju konstante koje zavise od parametara samih solarnih ćelija, a čiji su izrazi dati kao [75,76]:

$$\begin{aligned} \alpha_T &= \frac{\frac{R_S}{n_1 \cdot V_{th}}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)} \cdot I_{01} \cdot \exp\left(\frac{U}{n_1 \cdot V_{th}}\right) \cdot \exp\left(\frac{\frac{R_S}{n_1 \cdot V_{th}} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} + I_{03} - \frac{U}{R_p}\right)}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)}\right), \\ \beta_T &= \frac{\frac{R_S}{n_2 \cdot V_{th}}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)} \cdot I_{02} \cdot \exp\left(\frac{U}{n_2 \cdot V_{th}}\right) \cdot \exp\left(\frac{\frac{R_S}{n_2 \cdot V_{th}} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} + I_{03} - \frac{U}{R_p}\right)}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)}\right), \\ \gamma_T &= \frac{\frac{R_S}{n_3 \cdot V_{th}}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)} \cdot I_{03} \cdot \exp\left(\frac{U}{n_3 \cdot V_{th}}\right) \cdot \exp\left(\frac{\frac{R_S}{n_3 \cdot V_{th}} \left(I_{pv} + I_{01} + I_{02} + I_{03} - \frac{U}{R_p}\right)}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)}\right), \\ \sigma_T &= 1 - \frac{n_1}{n_3}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Trodiodni model solarne ćelije je znatno složeniji od modela sa jednom ili dvije diode, jer zahtijeva veći broj parametara i više računarskih resursa, i upravo zbog ove povećane složenosti ekstrakcija tačnih vrijednosti parametara može biti izazovna [75,76,77].

4. Iterativni algoritmi

Problem rješavanja jednačina je jedan od najstarijih problema u matematici. Sve jednačine koje opisuju neku fizičku veličinu najčešće nije moguće riješiti analitičkim putem. U slučaju da to jeste moguće uglavnom je ovo rješenje analitički veoma zahtjevno i glomazno. Kao alternativa, za rješavanje ovakvih i sličnih problema koriste se iterativne, tj. numeričke metode. Počevši od datog približnog rješenja, ove metode modifikuju komponente aproksimacije, jednu ili nekoliko u isto vrijeme i određenim redosljedom, sve dok se ne postigne konvergencija [78].

Ovo poglavlje pruža pregled tri iterativna metoda sa njihovim odgovarajućim algoritmima i primjerima, koji se mogu koristiti za rješavanje nelinearne strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija [78,79].

4.1 Njutnov metod

Njutnov metod je jedna od najčešće korišćenih iterativnih metoda za rješavanje složenih jednačina, najčešće nelinearnih jednačina ili sistema jednačina. Kako ne postoji opšti metod za rješavanje ovih složenih nelinearnih jednačina, ali znajući opšti metod za rješavanje linearnih jednačina, cilj je napraviti linearizaciju problema, tj. pronaći rješenje nelinearne jednačine $f(x) = 0$. Često se Njutnov metod naziva metod tangente, jer je pomenuta linearizacija predstavlja zamjenjivanje funkcije tangentnom pravom [78,79].

Jezgro ovog algoritma se oslanja na tangentni graf funkcije $y = f(x)$ koji je postavljen u tački $(x_0, f(x_0))$. Uzastopna aproksimacija je mjesto, tačka, gdje se *tangenta* siječe x - osom. Neka je x_i i-ta aproksimacija rješenja jednačine $f(x) = 0$. Jednačina tangente grafika funkcije $y = f(x)$ u tački $(x_i, f(x_i))$ je [78]:

$$y - f(x_i) = f'(x_i)(x - x_i), \quad (4.1)$$

Sukcesivna aproksimacija rješenja nalazi se iz presjeka tangente t_i i x - ose. Na taj način se dobija iterativni metod:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}. \quad (4.2)$$

4.1.1 Algoritam Njutnovog metoda

Njutnov iterativni metod ima proceduru datu u algoritmu 1.

Algoritam 1. Procedura Njutnovog iterativnog metoda.

Definisati početno rješenje x_0 i kriterijume zaustavljanja

Postaviti brojač i na vrijednost 1.

Izračunati sljedeću vrijednost rješenja $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$

while $abs(x_i - x_{i-1}) > \text{kriterijum zaustavljanja}$

$x_{add} = x_i$

$x_i = x_{add} - \frac{f(x_{add})}{f'(x_{add})}$

$x_{i-1} = x_{add}$

$i = i + 1$

end while

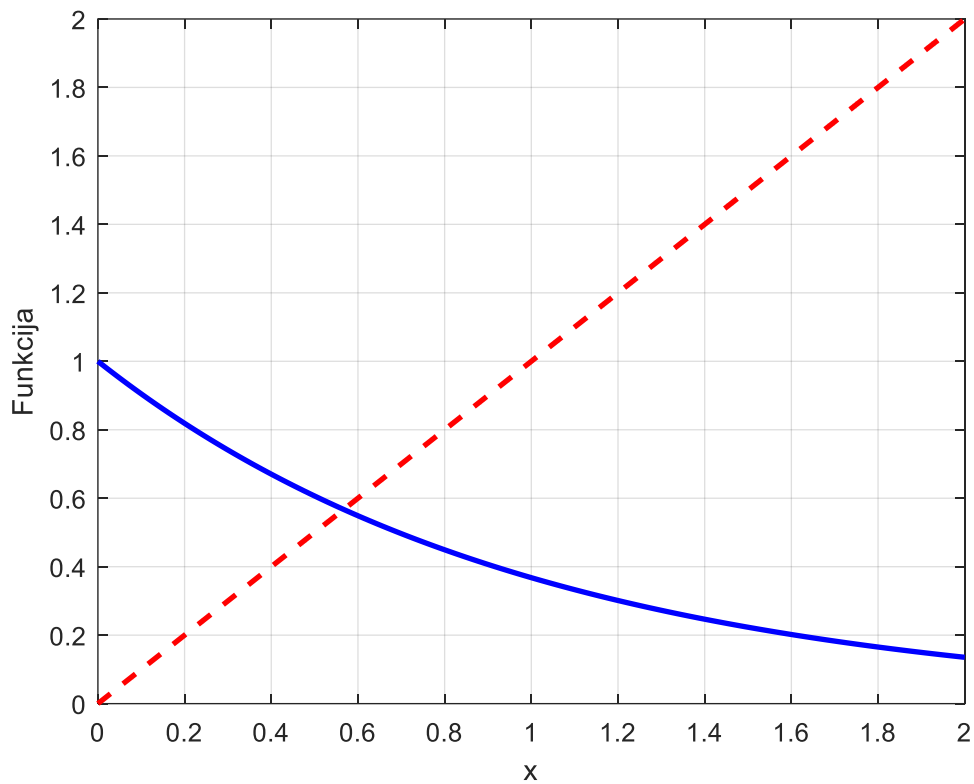
Return x_i

Primjer 1. Riješiti jednačinu $x - e^{-x} = 0$ koristeći Njutnov metod, sa tačnošću $\varepsilon = 10^{-5}$.

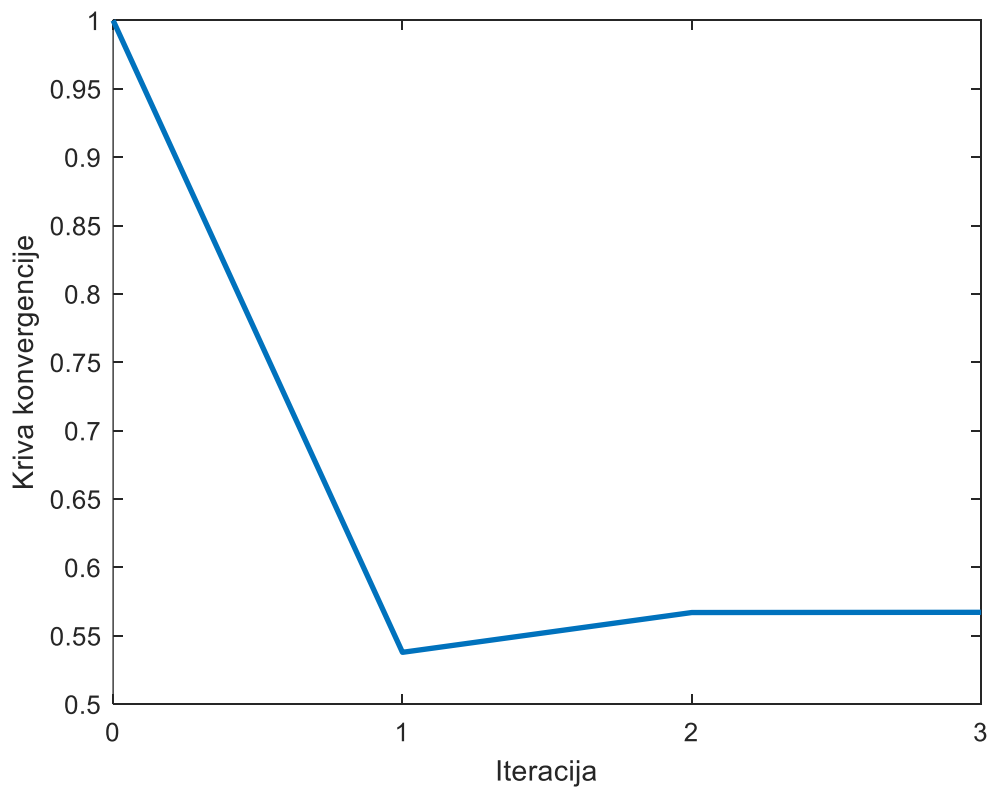
Rješenje: Neka je $f(x) = x - e^{-x} = 0$.

Grafičko rješenje jednačine $x - e^{-x} = 0$ je dato na slici 4.1. Za početnu aproksimaciju se uzima $x_0 = 1$. Na ovoj slici su pojedinačno nacrtani djelovi funkcija $y_1 = x$ i $y_2 = e^{-x}$. Presjek ove dvije prave daje rješenje jednačine. Sa slike se vidi da rješenje jednačine ima približnu vrijednost oko 0.57. Konvergencijska kriva primjene Njutnovog metoda data je na slici 4.2. Shodno Njutnovom metodu za rješavanje ove jednačine iterativni proces ima oblik:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{x_i - e^{-x}}{1 + e^{-x}}.$$



Slika 4.1: Grafičko rješenje jednačine $x - e^{-x} = 0$.



Slika 4.2: Rezultati Njutnovog metoda.

Sa slike 4.2 se vidi da iterativna procedura konvergira do konačnog rješenja za 3 iteracije. U Tabeli IV.1 dati su numerički rezultati ove konvergencijske krive.

Tabela IV.1 – Numerički rezultati konvergencijske krive Njutnovog metoda.

Iteracija	Vrijednost
0	1
1	0,537883
2	0,566987
3	0,567143

4.2 Modifikovani Njutnov metod

Glavni nedostatak Njutnovog metoda je što se u svakoj novoj iteraciji traži vrijednost izvoda funkcije u toj tački. Sljedeća modifikacija Njutnovog metoda se može koristiti tako da se ne računa vrijednost izvoda funkcije u svakoj iteraciji, već samo u prvoj.

Konkretno, u modifikovanom Njutnovom meotodu se koristi sljedeća iterativna formula:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_0)}. \quad (4.3)$$

Princip rada modifikovanog Njutnovog metoda se sastoji u tome što se tangenta postavlja samo u tački $(x_0, f(x_0))$, dok se svaka sljedeća iteracija dobija pomjeranjem tangente paralelno sa postavljenom prvom tangentom i gledanjem njenih presjeka sa x-osom [78,79].

4.2.1 Algoritam modifikovanog Njutnovog metoda

Iterativni modifikovani Njutnov meotod ima sljedeću proceduru datu u algoritmu 2. Dakle, u startu je postojala mogućnost da se zapamti vrijednost izvoda funkcije u tački x_0 i da se kasnije ova vrijednost koristi u iterativnoj proceduri. Na taj način se ne opterećuju proračuni. Ova činjenica može imati ogroman uticaj na trajanje procesa [78].

Algoritam 2. *Procedura modifikovanog Njutnovog iterativnog metoda.*

Definisati početno rješenje x_0 i kriterijume zaustavljanja

Postaviti brojač n na vrijednost 1.

Izračunati sljedeću vrijednost rješenja $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$

while $abs(x_i - x_{i-1}) > \text{kriterijum zaustavljanja}$

$x_{add} = x_i$

$x_i = x_{add} - \frac{f(x_{add})}{f'(x_0)}$

$x_{i-1} = x_{add}$

$i = i + 1$

end while

Return x_i

Primjer 2. *Riješiti jednačinu $x - e^{-x} = 0$ koristeći modifikovani Njutnov metod, sa tačnošću $\varepsilon = 10^{-5}$.*

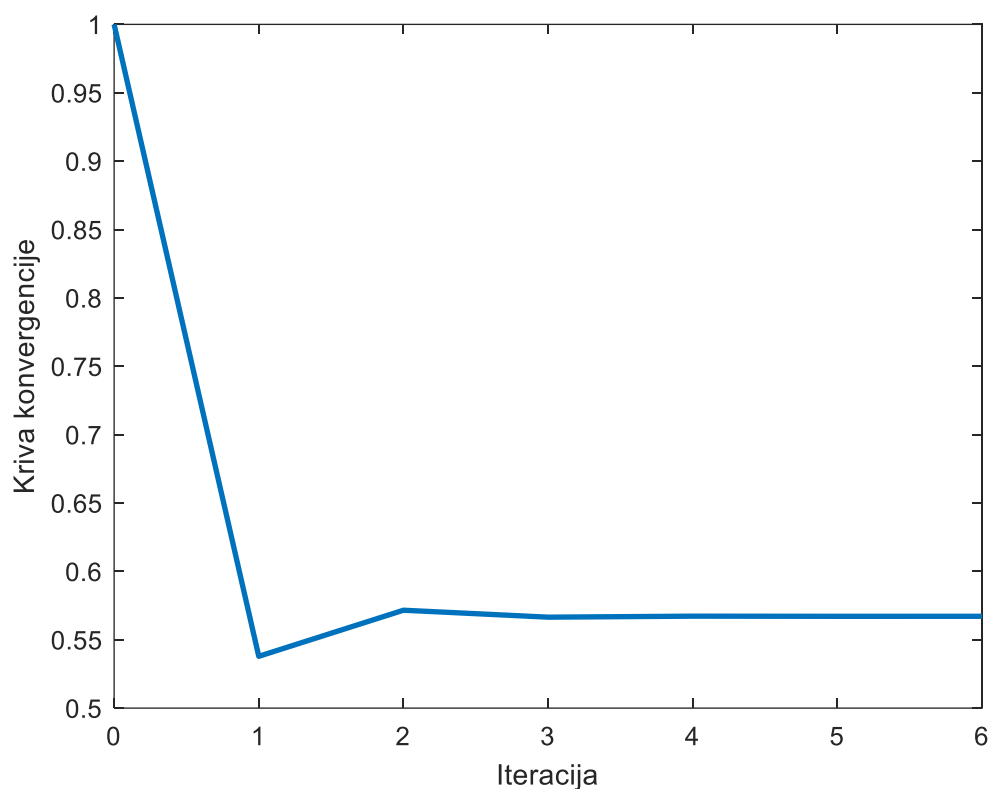
Rješenje: Neka je $f(x) = x - e^{-x} = 0$. Tada je iterativni proces definisan jednačinom:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{x_i - e^{-x_i}}{1 + e^{-x_i}}.$$

Za početnu aproksimaciju se uzima $x_0 = 1$. Rezultati dobijeni pomoću modifikovanog Njutnovog metoda prikazani su na slici 4.3.

Sa slike 4.3 se vidi da ovaj postupak konvergira za 6 iteracija za dostizanje tačnosti od 10^{-5} .

U Tabeli IV.2 dati su numerički rezultati konvergencije ove metode.



Slika 4.3: Rezultati modifikovanog Njutnovog metoda.

Tabela IV.2 – Numerički rezultati konvergencijske krive modifikovanog Njutnovog metoda.

Iteracija	Vrijednost
0	1
1	0,537883
2	0,571585
3	0,5665
4	0,567237
5	0,56713
6	0,567145

4.3 Metod lažne pozicije

Metod lažne pozicije je stari iterativni metod za rješavanje nelinearnih jednačina. Ovaj metod je sličan tehnici „pokušaja i greške“ u korišćenju testne („netačne“) vrijednosti za promjenjivu, a zatim prilagođavanju vrijednosti testa prema ishodu [79].

Vrijednost promjenjive u $i + 1$ iteraciji se računa na sljedeći način:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{x_i - x_0}{f(x_i) - f(x_0)} f(x_i). \quad (4.4)$$

Takode, poželjno je da za sve naredne aproksimacije x_i gdje je $i \in \mathbb{N}$ važi da su x_i i x_0 sa različitih strana korijena jednačine \bar{x} .

4.3.1 Algoritam metoda lažne pozicije

Algoritam metoda lažne pozicije je dat sljedećim pseudokodom:

Algoritam 4. *Procedura metoda lažne pozicije.*

Definisati početno rješenje x_0 i kriterijume zaustavljanja

Postaviti brojač i na vrijednost 1.

while abs ($x_i - x_{i-1}$) > kriterijum zaustavljanja

$$x_{i+1} = x_i - \frac{x_i - x_0}{f'(x_i) - f(x_0)} f(x_i)$$

$i = i + 1$

end while

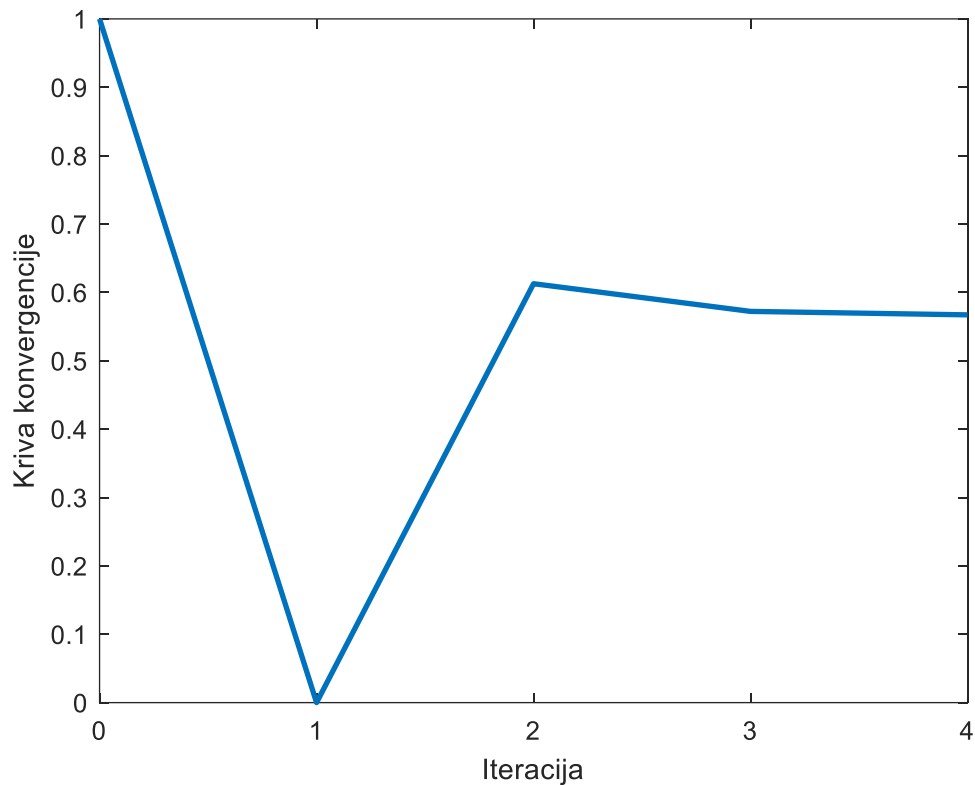
Return x_i

Primjer 3. *Metodom lažne pozicije riješiti jednačinu $x - e^{-x} = 0$, sa tačnošću $\varepsilon = 10^{-5}$.*

Shodno metodi lažne pozicije iterativni proces je definisan jednačinom:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{x_i - x_0}{x_i - e^{-x_i} - (x_0 - e^{-x_0})} \cdot (x_i - e^{-x_i}).$$

Počevši sa $x_0 = -1$ i $x_1 = -0.5$ rezultati dobijeni pomoću metode lažne pozicije prikazani su na slici 4.4.



Slike 4.4: Rezultati metoda lažne pozicije.

Sa slike 4.4 se vidi da ovaj metod konvergira za 4 iteracije za dostizanje tačnosti od 10^{-5} . Takođe, u tabeli IV.3 dati su numerički rezultati konvergencije metode lažne pozicije.

Tabela IV.3 – Numerički rezultati konvergencijske krive metoda lažne pozicije.

Iteracija	Vrijednost
0	1
1	0
2	0,6127
3	0,572181
4	0,567102

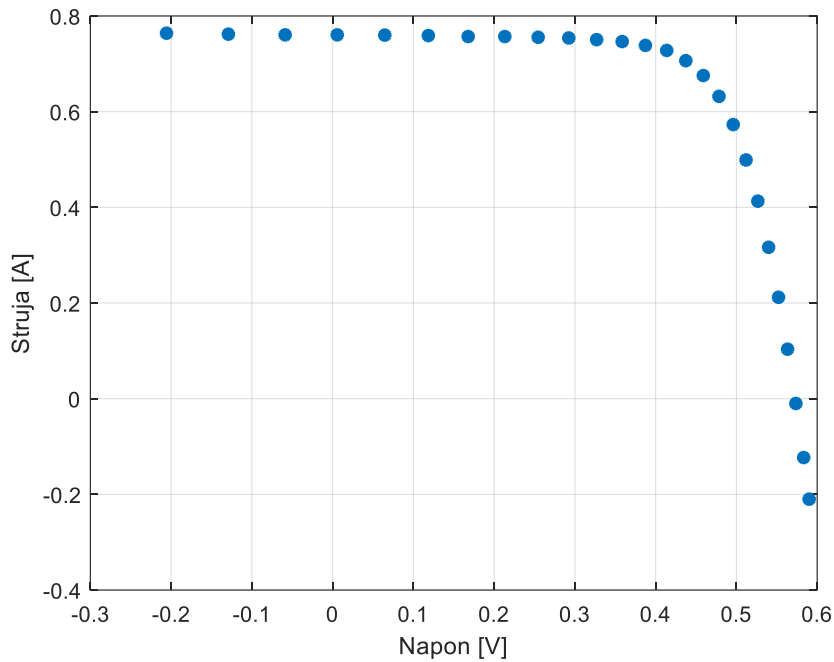
5. Numerički rezultati

U literaturi je moguće pronaći različite metode i algoritme koji se koriste za estimaciju parametara solarnih ćelija. Sve te metode se mogu podijeliti na numeričke (determinističke i metaheurističke), analitičke i hibridne. Analitičke metode su jednostavne za implementaciju, ali zahtijevaju pojednostavljena ili aproksimacije korišćenih izraza. Numeričke metode, zasnovane na iterativnim postupcima, mogu da pruže precizna rješenja, ali zahtijevaju dosta vremena za realizaciju, dok njihov učinak u velikoj mjeri zavisi od početnih vrijednosti. Metode zasnovane na primjeni metaheurističkih metoda, kao i hibridne metode, u velikoj mjeri zavise od adekvatnog prilagođavanja kontrolnih parametara samih algoritama.

Kako je već objašnjeno, postoje tri modela solarnih ćelija: jednodiodni (JDM), dvodiodni (DDM) i trodiodni (TDM) model. JDM je najprostiji model i za njegovo rješavanje, tj. za određivanje strujno-naponske zavisnosti postoji analitičko rješenje. Međutim, strujno-naponske zavisnosti DDM i TDM modela solarnih ćelija se ne mogu riješiti u analitičkoj formi, tj. ne postoji direktna veza između struje i napona, odnosno napona i struje. Samim tim za rješavanje veze između struje i napona kod ova dva modela potrebno je koristiti neki od iterativnih postupaka. Odnosno, za bilo koji algoritam koji radi estimaciju parametara solarnih ćelija mora se koristiti iterativna procedura za definisanje veze struje i napona. Za neke parametre solarne ćelije i za određenu vrijednost napona simulirana vrijednost struje se određuje primjenom nekog od iterativnih metoda kojima se određuje rješenje jednačine 3.18 ili 3.23, za dvodiodni i trodiodni model respektivno.

Radi testiranja različitih iterativnih metoda koje se koriste kod rješavanja strujno-naponske jednačine DDM i TDM posmatraće se parametri RTC France solarne ćelije. Njena odgovarajuća strujno-naponska karakteristika prikazana je na slici 5.1.

Parametri RTC France solarne ćelije dobijeni su primjenom GTO-HBA metaheurističkog algoritma predstavljenog u [80]. Parametri solarne ćelije za oba matematička modela su prikazani na Tabeli V.1.



Slika 5.1: Strujno-naponska karakteristika RTC France solarne ćelije

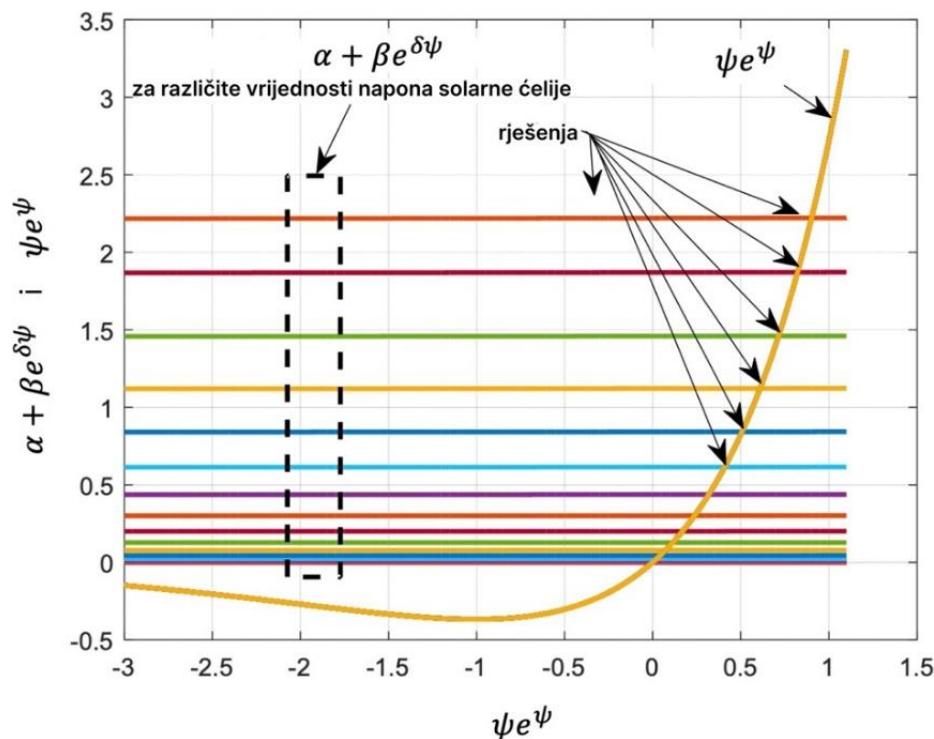
Tabela V.1 - Vrijednosti parametara RTC Solar France solarne ćelije dobijeni primjenom metaheurističkog GTO-HBA algoritma za dvodioidni i trodioidni model

Algoritam	Literatura	Godina	Matematički i model	I_{pv} [A]	I_{01} [A]	n_1	R_s [Ω]	R_p [Ω]	I_{02} [A]	n_2	I_{03} [A]	n_3
GTO-HBA	[80]	2022.	DDM	0.7607801	0.84162	1.999999	0.03679	55.73	0.2154505	1.44706	-	-
			TDM	0.7607602	0.876504	1.99504	0.0369201	55.6798	0.20441	1.442401	0.0001805	1.89001

5.1 Numerički rezultati za dvodioidni model solarne ćelije

Rješavanje I - V zavisnosti kod dvodioidnog i trodioidnog modela solarne ćelije je izuzetno komplikovano. Naime, kao što je opisano u prethodnim poglavljima, da bi se riješila struja kod dvodioidnog modela solarne ćelije potrebno je riješiti jednačinu gdje se javlja promjenjiva ψ , pri čemu je ova promjenjiva rješenje jednačine (3.17) za dvodioidni model. Rješenje ove jednačine se grafički prikazuje kao presjek krivih $\alpha + \beta e^{\delta\psi}$ i ψe^{ψ} .

Na slici 5.2. je prikazano kako za konkretne vrijednosti parametara RTC Solar France solarne ćelije izgledaju rješenja za svih 26 mjerenih tačaka. Kao što se može vidjeti, za sve vrijednosti napona rješenja ove jednačine su u opsegu od 0 do 1.



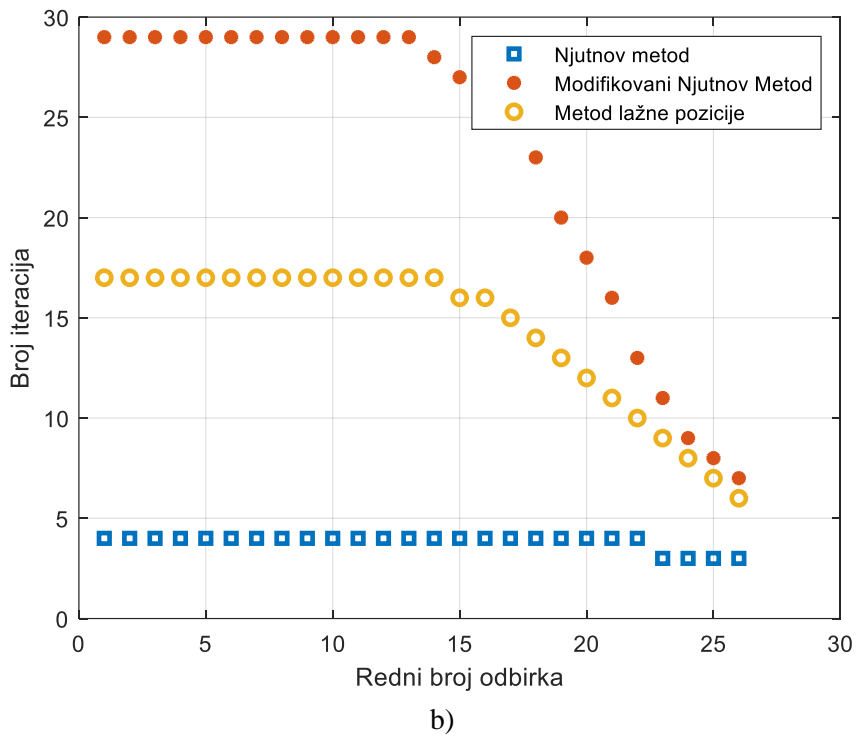
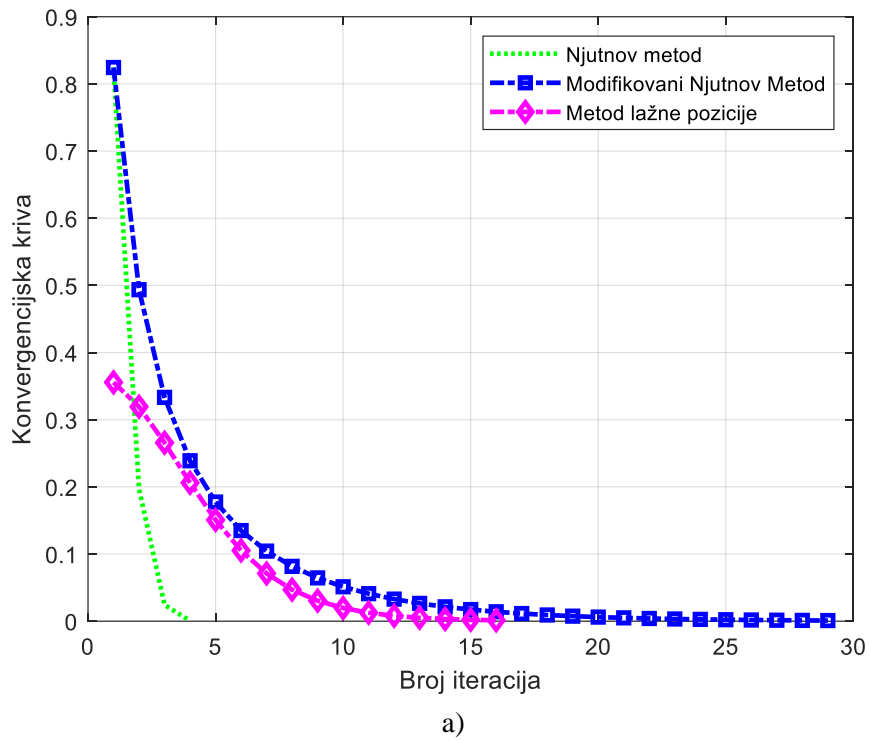
Slika 5.2: Vizualizacija jednačina $\alpha + \beta e^{\delta\psi}$ i ψe^{ψ} .

Da bi međusobno poređenje konvergencije odabranih iterativnih metoda bilo izvršeno precizno i efikasno, prvo je pretpostavljen kriterijum tačnosti (vrijednost greške proračuna pri kome se prekida iterativna procedura) za rješavanje jednačina u vrijednosti od 10^{-3} , dok odabrane inicijalne vrijednosti početnih uslova za svaku iterativnu metodu pri ovom kriterijumu tačnosti iznose $\psi_0 = 1$, $\psi_0 = 2$ i $\psi_0 = 5$. Zatim su u svrhu dodatnog poređenja konvergencije metoda kriterijumi tačnosti za rješavanje jednačina uzeti 10^{-5} , 10^{-10} i 10^{-15} , dok je inicijalna vrijednosti početnih uslova $\psi_0 = 1$ identična za sve tri vrijednosti.

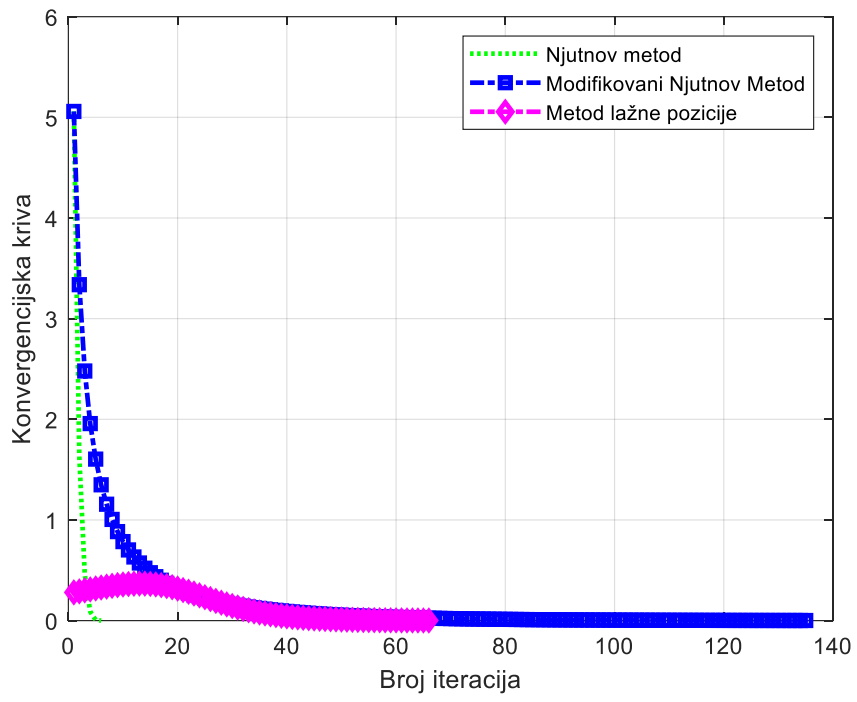
Za vrijednost kriterijuma tačnosti 10^{-3} i vrijednost početnih uslova $\psi_0 = 1$ dobijeni su rezultati prikazani na slici 5.3.

Za vrijednost kriterijuma tačnosti 10^{-3} i vrijednost početnih uslova $\psi_0 = 2$ dobijeni su rezultati prikazani na slici 5.4.

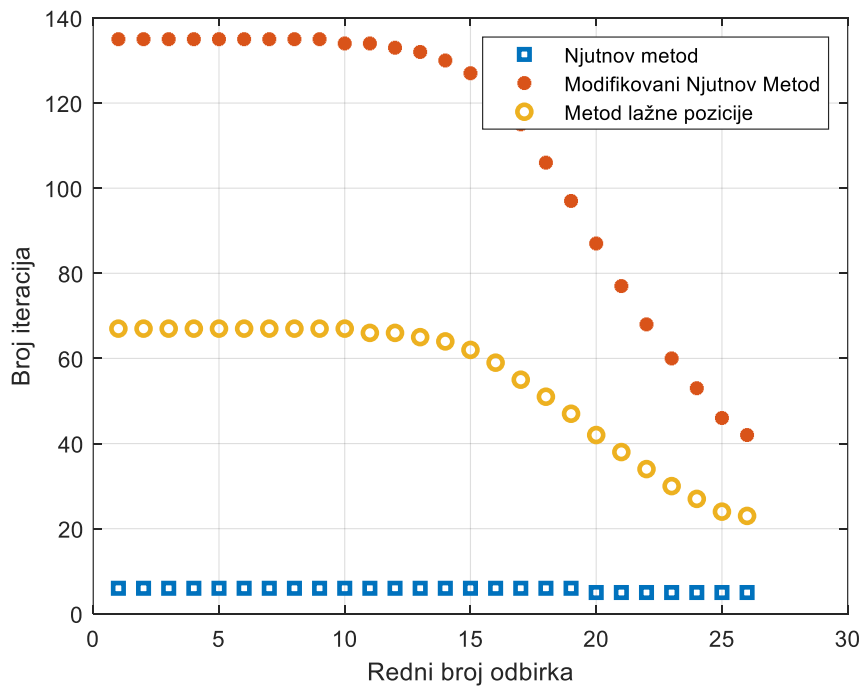
Za vrijednost kriterijuma tačnosti 10^{-3} i vrijednost početnih uslova $\psi_0 = 5$ dobijeni su rezultati prikazani na slici 5.5.



Slika 5.3: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-3}

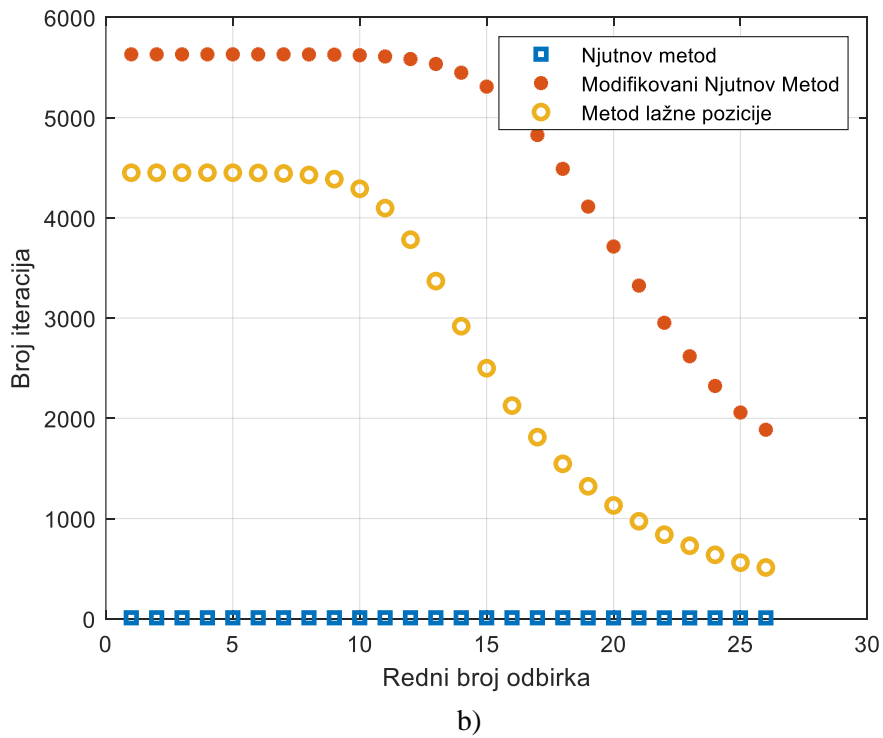
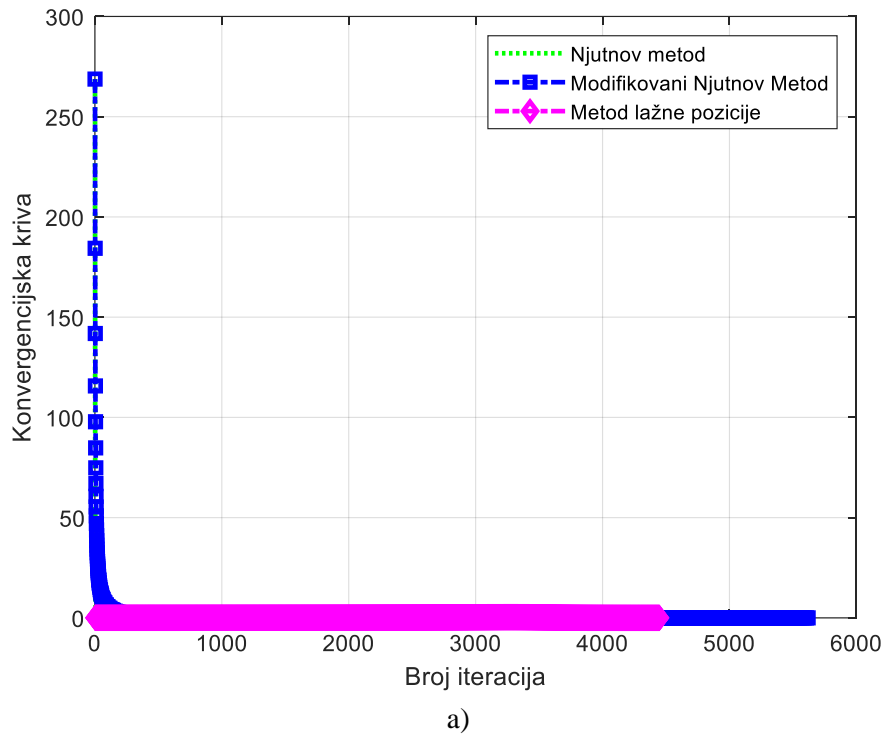


a)



b)

Slika 5.4: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 2$ i tačnost 10^{-3} .



Slika 5.5: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 5$ i tačnost 10^{-3} .

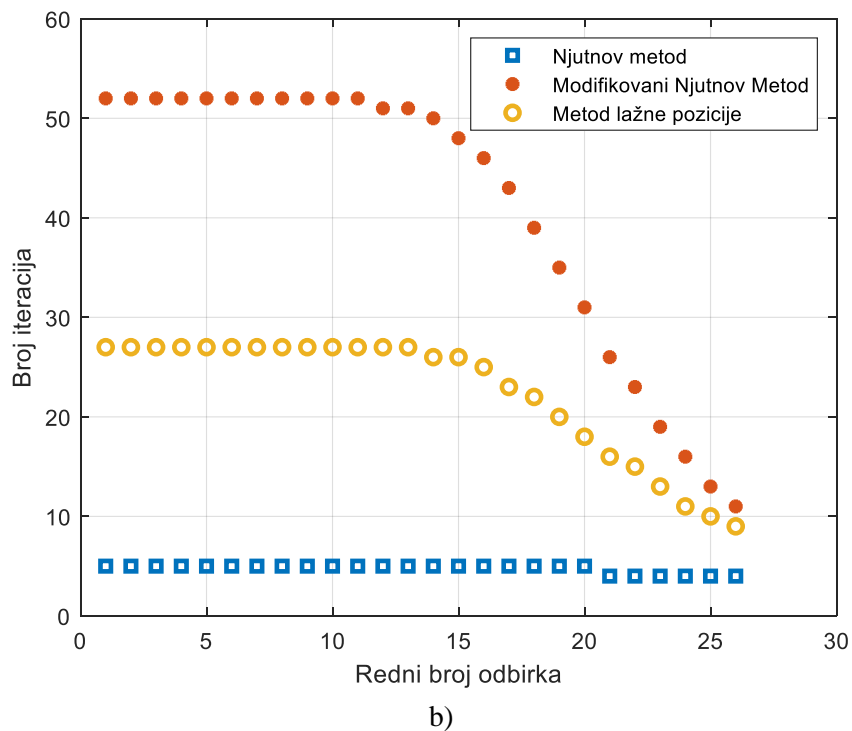
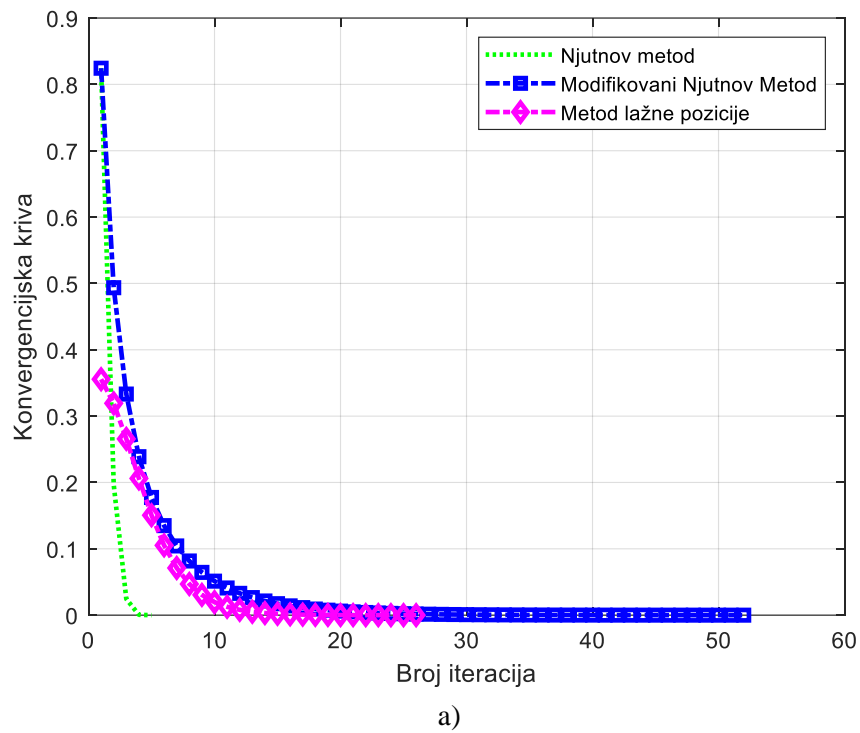
Radi preglednosti, poređenje rezultata Njutnovog metoda (NM), modifikovanog Njutnovog metoda (MNM) i metoda lažne pozicije (MLP), tj. potrebnog broja iteracija za svaku od odabranih metoda za različite početne uslove, prikazano je u Tabeli V.2.

Tabela V.2 - Potreban broj iteracija za NM, MNM i MLP za razne početne vrijednosti funkcije.

Redni broj	10^{-3}								
	$\psi_0 = 1$			$\psi_0 = 2$			$\psi_0 = 5$		
	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP
1.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
2.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
3.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
4.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
5.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
6.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4448
7.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4443
8.	4	29	17	6	135	67	10	5630	4428
9.	4	29	17	6	135	67	10	5628	4386
10.	4	29	17	6	134	67	10	5622	4290
11.	4	29	17	6	134	66	10	5610	4097
12.	4	29	17	6	133	66	10	5584	3782
13.	4	29	17	6	132	65	10	5535	3369
14.	4	28	17	6	130	64	10	5448	2919
15.	4	27	16	6	127	62	10	5309	2500
16.	4	26	16	6	122	59	10	5102	2127
17.	4	25	15	6	115	55	10	4826	1812
18.	4	23	14	6	106	51	10	4489	1546
19.	4	20	13	6	97	47	9	4112	1322
20.	4	18	12	5	87	42	9	3714	1131
21.	4	16	11	5	77	38	9	3324	973
22.	4	13	10	5	68	34	9	2953	839
23.	3	11	9	5	60	30	9	2619	729
24.	3	9	8	5	53	27	9	2323	638
25.	3	8	7	5	46	24	9	2058	560
26.	3	7	6	5	42	23	9	1886	512

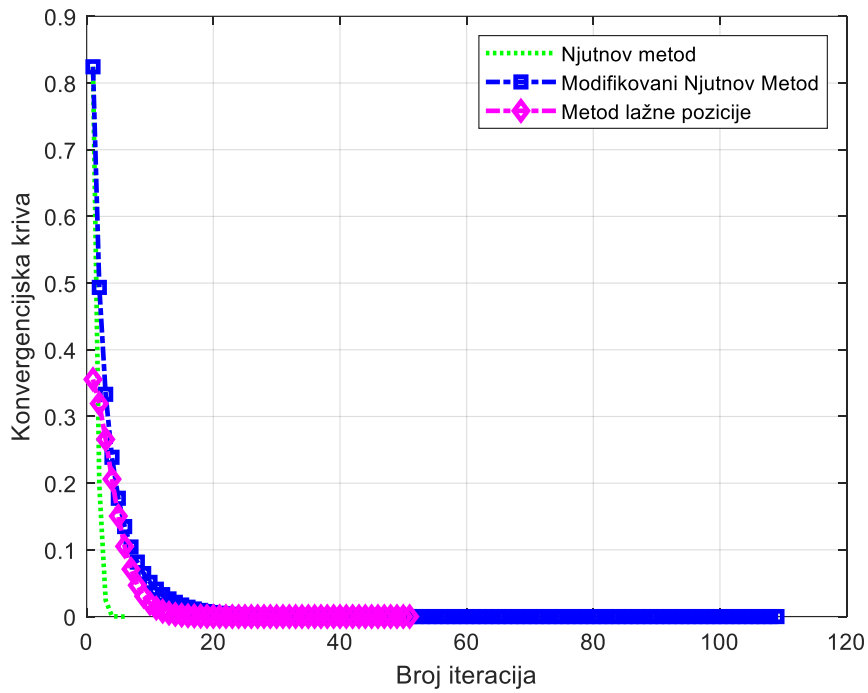
Analizirajući dobijene rezultate Iz Tabele V.2 jasno se može zaključiti da za sve početne vrijednosti NM zahtijeva najmanje iteracija, a nakon ove metode slijede MLP i MNM, respektivno.

Sada će biti analiziran slučaj kada početni uslovi imaju fiksnu vrijednost ($\psi_0 = 1$), dok se uzima druga vrijednost tačnosti proračuna. Na slici 5.6. prikazani su rezultati za tačnost primjene svih metoda od 10^{-5} .

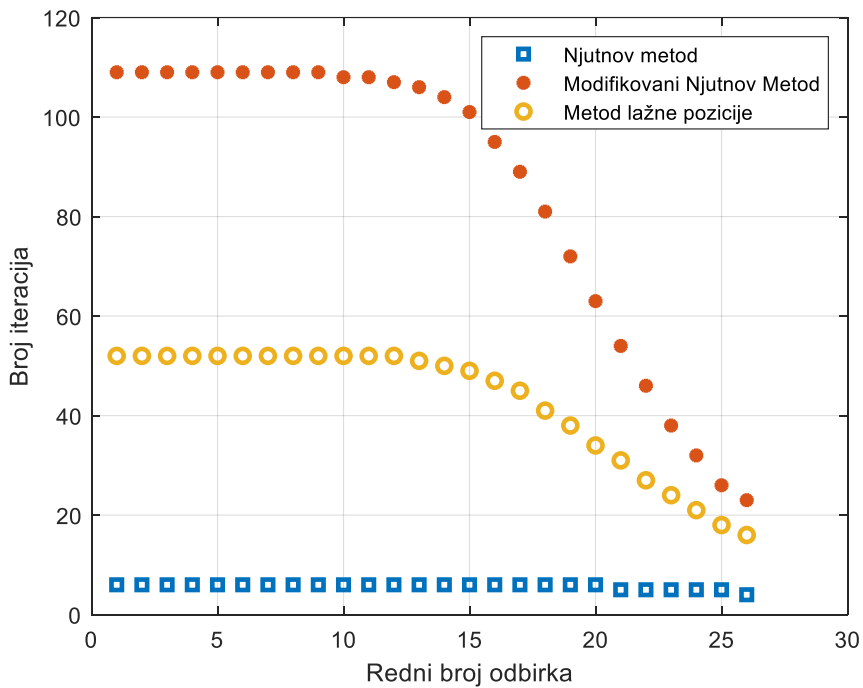


Slika 5.6: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-5} .

Korespondentni rezultati za tačnost od 10^{-10} prikazani su na slici 5.7.



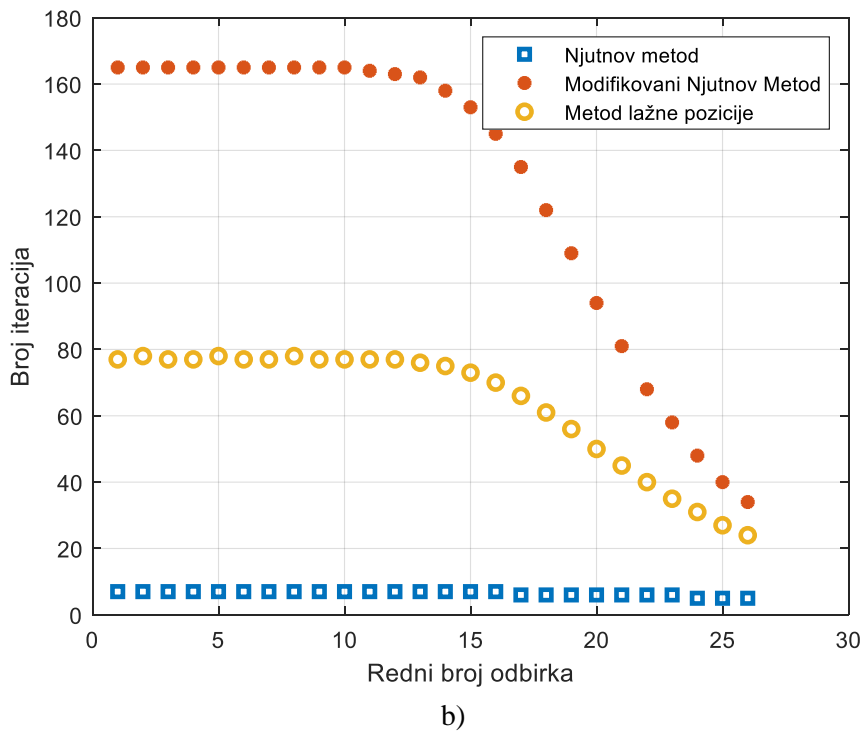
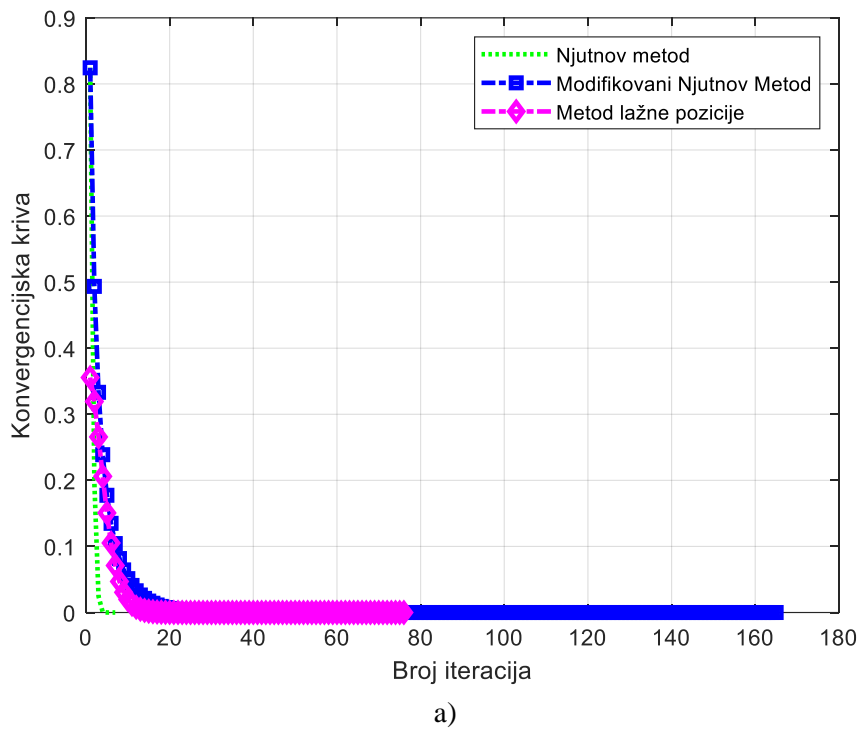
a)



b)

Slika 5.7: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-10} .

Na kraju, za tačnost 10^{-15} rezultati su prikazani na slici 5.8. Radi preglednosti sumarni rezultati poređenja metoda su dati u Tabeli V.3.



Slika 5.8: a) Konvergenzijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-15} .

Sumirano, minimalan i maksimalan broj iteracija za sve odabrane iterativne metode, i za sve tačke RTC France solarne ćelije, za istu vrijednost kriterijuma tačnosti, dat je u Tabeli V.4.

Tabela V.3 - Potreban broj iteracija za NM, MNM i MLP za razne vrijednosti kriterijuma

Redni broj	$\psi_0 = 1$								
	10^{-5}			10^{-10}			10^{-15}		
	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP
1.	5	52	27	6	109	67	7	165	77
2.	5	52	27	6	109	67	7	165	78
3.	5	52	27	6	109	52	7	165	77
4.	5	52	27	6	109	52	7	165	77
5.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
6.	5	52	27	6	109	52	7	165	77
7.	5	52	27	6	109	52	7	165	77
8.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
9.	5	52	27	6	109	52	7	165	77
10.	5	52	27	6	108	52	7	165	77
11.	5	52	27	6	108	52	7	164	77
12.	5	51	27	6	107	52	7	163	77
13.	5	51	27	6	106	51	7	162	76
14.	5	50	26	6	104	50	7	158	75
15.	5	48	26	6	101	49	7	153	73
16.	5	46	25	6	95	47	7	145	70
17.	5	43	23	6	89	45	6	135	66
18.	5	39	22	6	81	41	6	122	61
19.	5	35	20	6	72	38	6	109	56
20.	5	31	18	6	63	34	6	94	50
21.	4	26	16	5	54	31	6	81	45
22.	4	23	15	5	46	27	6	68	40
23.	4	19	13	5	38	24	6	58	35
24.	4	16	11	5	32	21	5	48	31
25.	4	13	10	5	26	18	5	40	27
26.	4	11	9	5	23	16	5	34	24

Tabela V.4 - Minimalni i maksimalni broj iteracija za korišćene iterativne metode za sve mjerene tačke tačke dvodiognog modela RTC France solarne ćelije, pri istoj vrijednosti kriterijuma tačnosti

Iterativni metod	Vrijednost	Kriterijum tačnosti		
		10^{-3}		
		$\psi_0 = 1$	$\psi_0 = 2$	$\psi_0 = 5$
Njutnov metod	Min	3	5	9
	Max	4	6	10
Modifikovani Njutnov metod	Min	7	42	1886
	Max	29	135	5631
Metod lažne pozicije	Min	6	23	512
	Max	17	67	4450

Takođe, u Tabeli V.5 su dati minimalni i maksimalni broj iteracija kod rješavanja svih tačaka RTC solarne ćelije, za korišćene iterativne metode, za istu vrijednosti početnih uslova.

Tabela V.5 - Minimalni i maksimalni broj iteracija za korišćene iterativne metode za sve mjerene tačke tačke dvodiodnog modela RTC France solarne ćelije, pri istoj vrijednosti početnih uslova

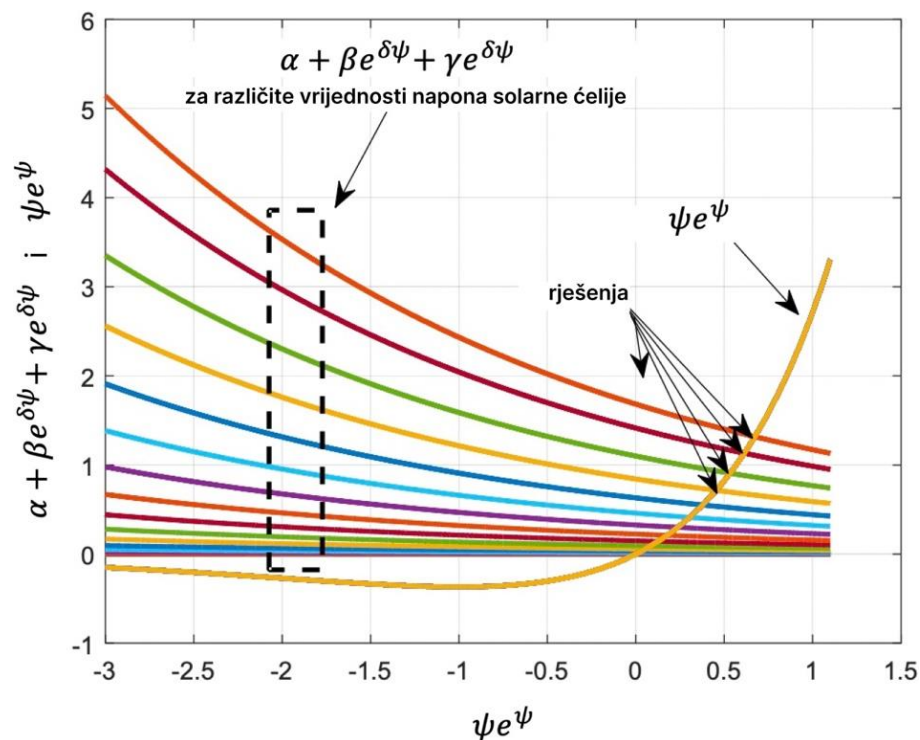
Iterativni metod	Vrijednost	Vrijednost početnih uslova		
		$\psi_0 = 1$		
		10^{-5}	10^{-10}	10^{-15}
Njutnov metod	Min	4	5	5
	Max	5	6	7
Modifikovani Njutnov metod	Min	11	23	34
	Max	52	109	165
Metod lažne pozicije	Min	9	16	24
	Max	27	52	77

Sa dobijenih slika i iz prikazanih tabela izvodi se nekoliko zaključaka:

- Njutnov metod je metod koji najbrže konvergira, tj. zahtijeva najmanji broj iteracija za postizanje definisane tačnosti.
- Ovaj zaključak važi za sve odbirke, tj. za sve izmjerene parove, strujno-naponske vrijednosti, posmatrane solarne ćelije.
- Metod lažne pozicije brže konvergira od modifikovanog Njutnovog metoda.
- Za tačnost koja je reda 10^{-3} po Njutnovoj metodu potrebno je samo nekoliko iteracija za postizanje cilja tj. zadate tačnosti.
- Za veće vrijednosti tačnosti, tj. za dobijanje tačnijih rezultata, svaka od metoda zahtijeva veći broj iteracija. Međutim i u ovom slučaju Njutnov metod je apsolutno dominantan u odnosu na modifikovani Njutnov metod i metod lažne pozicije. Taj broj iteracija za sve slučajeve je definitivno manji od 10. Modifikovani Njutnov metod i metod lažne pozicije su metodi koji izraženo zavise od tačnosti, i povećanje tačnosti značajno doprinosi povećanju zahtijevanog broja iteracija.
- Na osnovu prikazanih rezultata takođe je jasno da svaka od posmatranih metoda zavisi od početnih uslova. Najmanju zavisnost pokazuje Njutnov metod, koji na primjer za tačnost 10^{-3} i $\psi_0 = 1$ zahtijeva od 3 do 4 iteracije, ali za drugu vrijednost $\psi_0 = 5$ zahtijeva od 9 do 10 iteracija. Modifikovani Njutnov metod i metod lažne pozicije su veoma zavisne od početnih uslova, tako da zahtijevani broj iteracija je i po nekoliko stotina puta veći u zavisnosti od početnih uslova. Konkretno, ako je $\psi_0 = 1$ modifikovani Njutnov metod može da zahtijeva od 7 do 29 iteracija za sve posmatrane tačke, ali ako je $\psi_0 = 5$ ovaj metod zahtijeva od 1886 do 5631 iteracija.

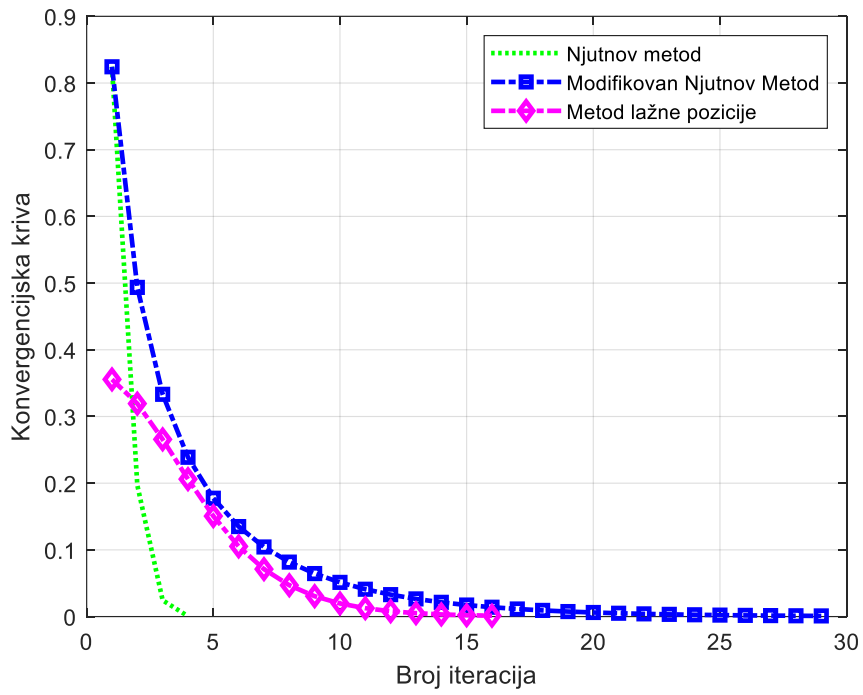
5.2 Numerički rezultati za trodiodni model solarne ćelije

Analogno prethodno sprovedenom istraživanju o uticaju vrijednosti početnih uslova i tačnosti proračuna kod Njutnovog metoda, modifikovanog Njutnovog metoda i metoda lažne pozicije testirana je i njihova primjena na trodiodnom modelu solarne ćelije. Konkretno, vizuelizacija rješenja pomenutih jednačina prikazana je na slici 5.9 gdje su pokazana rješenja za svih 26 tačaka RTC France solarne ćelije. Ono što se sa grafika jasno vidi da za konkretnu solarnu ćeliju sva rješenja se nalaze u opsegu od 0 do 1.

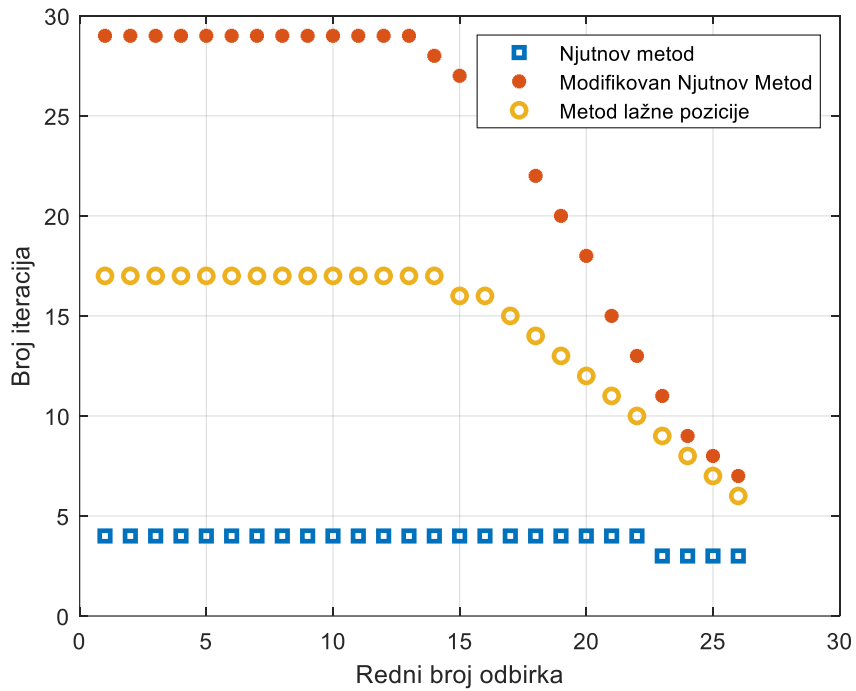


Slika 5.9: Vizualizacija jednačina $\alpha + \beta e^{\delta\psi} + \gamma e^{\delta\psi}$ i ψe^ψ .

U ovom dijelu master rada prikazani su efekti uticaja početnih uslova i tačnosti prilikom primjene svih od prethodno navedenih metoda. Na slici 5.10 a) prikazana je konvergenijska kriva za prvi odbirak strujno-naponskih vrijednosti RTC France solarne ćelije, koja se dobija primjenom Njutnovog metoda, modifikovanog Njutnovog metoda i metoda lažne pozicije kada je uzeto da je tačnost proračuna 10^{-3} i početni uslov za rješavanje jednačina $\psi_0 = 1$. Na slici 5.10 b) prikazan je potreban broj iteracija radi postizanja tačnosti od 10^{-3} za svaki odbirak strujno-naponske zavisnosti RTC France solarne ćelije. Analogni rezultati za početne uslove $\psi_0 = 2$ prikazani su na slici 5.11, a na slici 5.12 za početne uslove $\psi_0 = 5$.

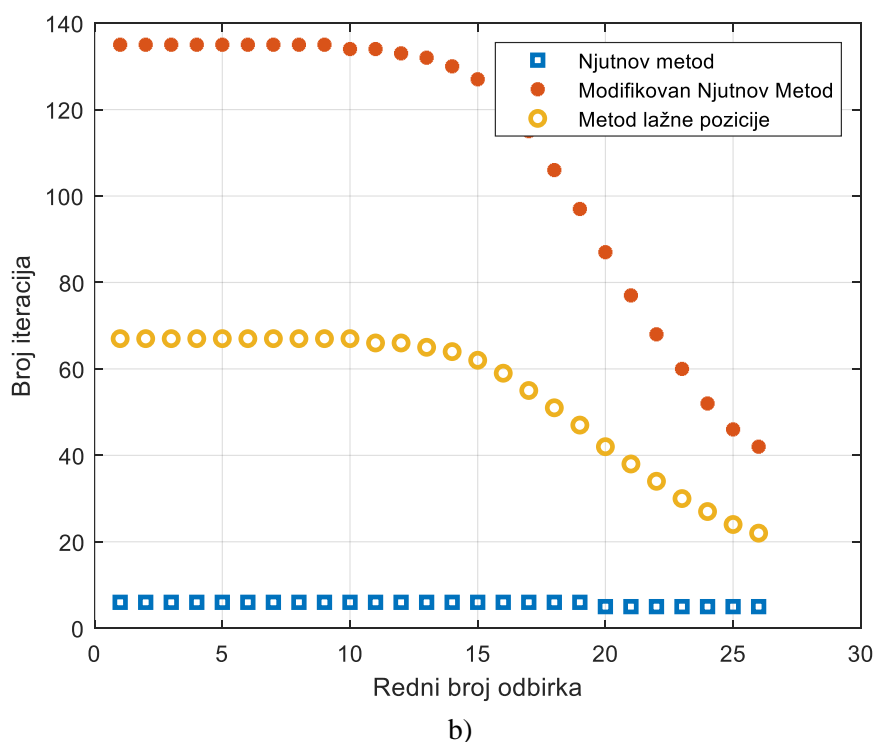
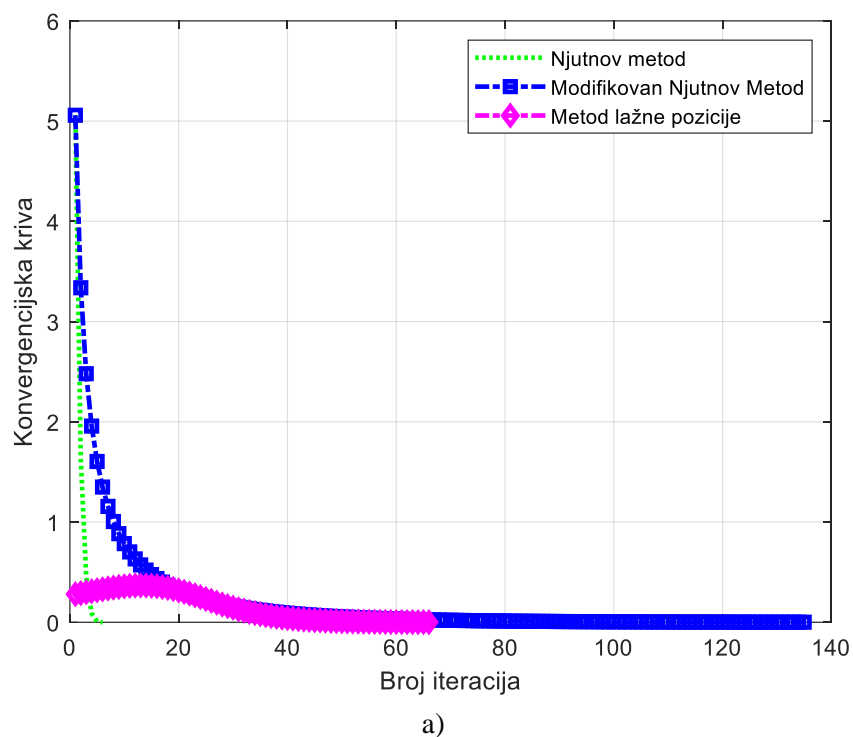


a)

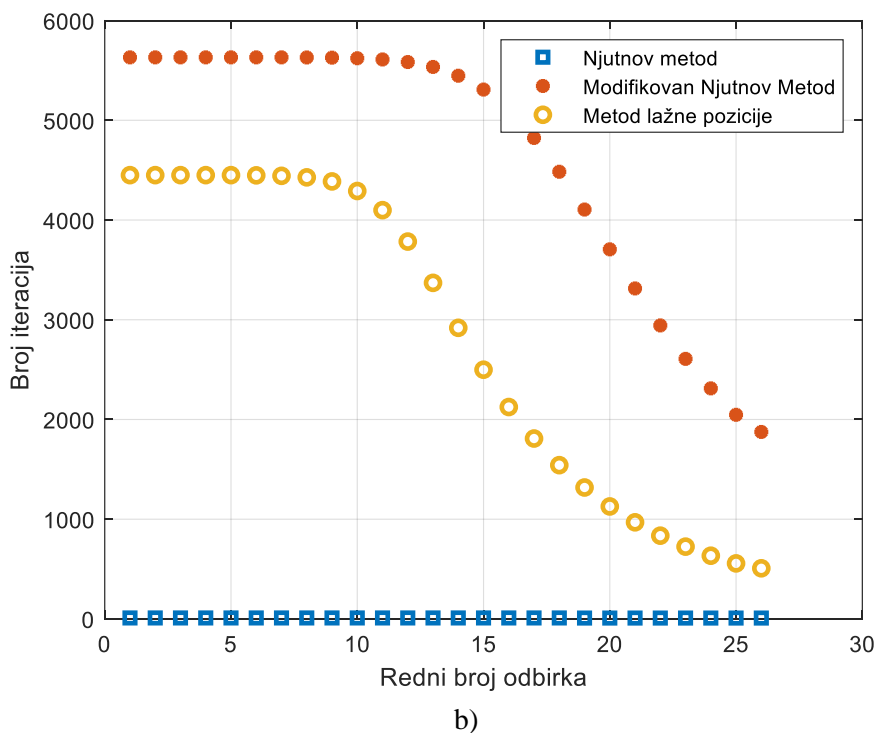
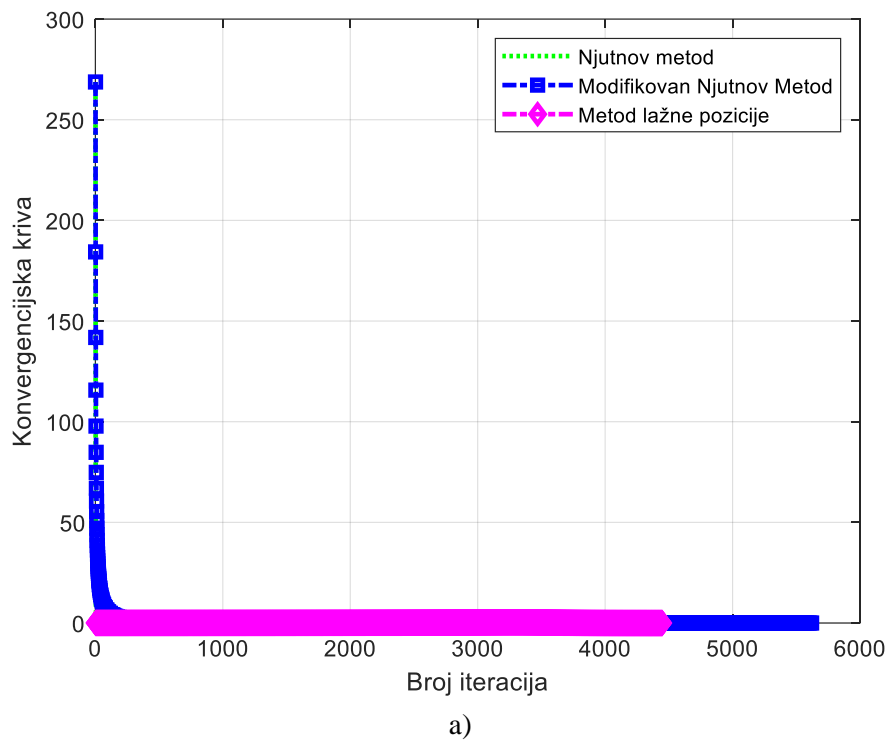


b)

Slika 5.10: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-3} .



Slika 5.11: a) Konvergencijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 2$ i tačnost 10^{-3} .



Slika 5.12: a) Konvergenijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 5$ i tačnost 10^{-3} .

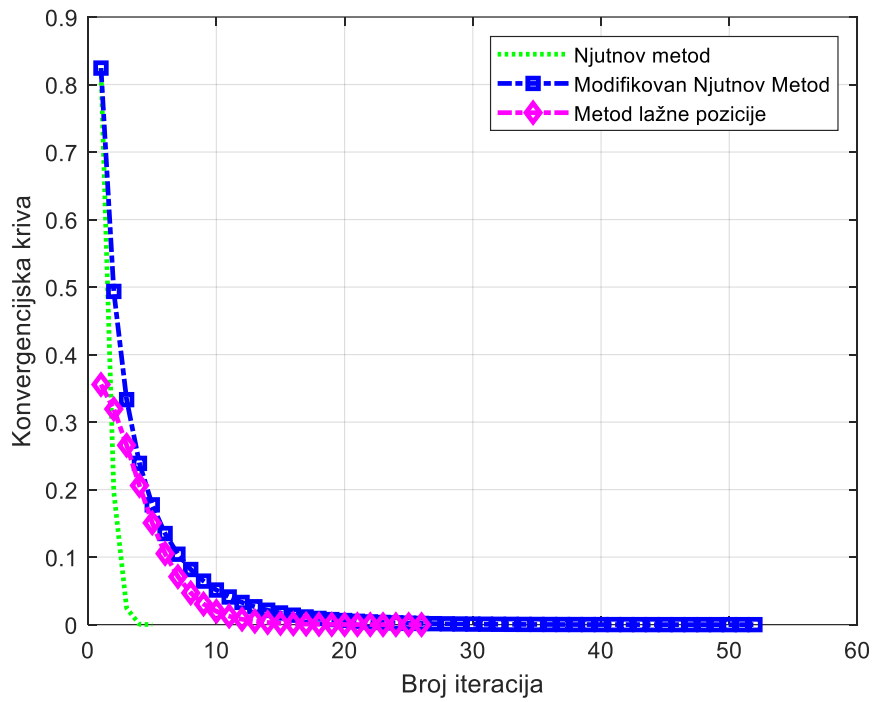
Odgovarajući rezultati za tačnost rješavanja jednačina kriterijuma tačnosti 10^{-5} , 10^{-10} , 10^{-15} , za istu vrijednosti početnih uslova $\psi_0 = 1$, prikazani su na slikama 5.13, 5.14 i 5.15, respektivno.

Sumarno poređenje uticaja početnih uslova za vrijednost tačnosti rješavanja jednačine od 10^{-3} , za svaki odbirak strujno-naponske zavisnosti, dat je u Tabeli V.6.

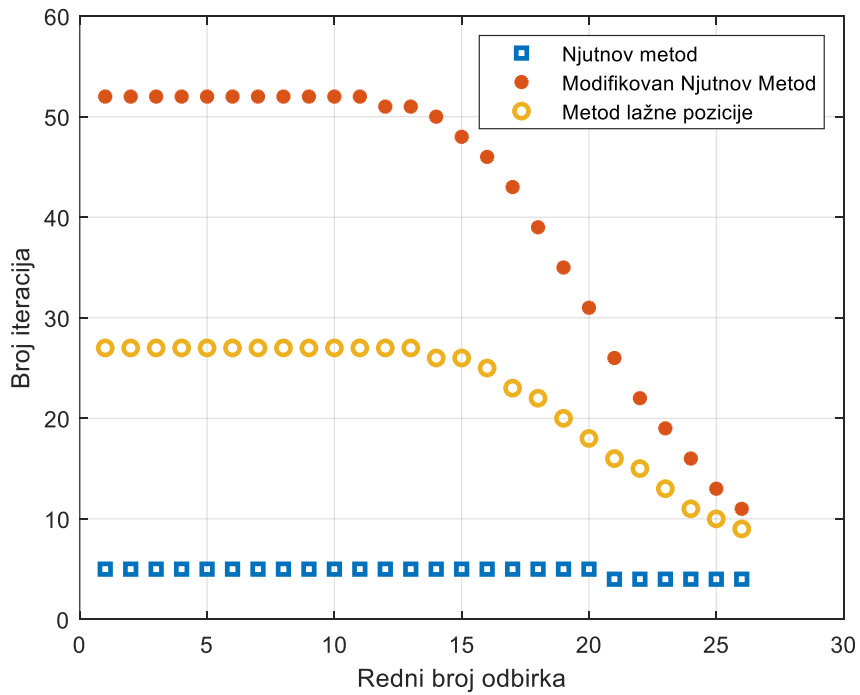
Tabela V.6 - Potreban broj iteracija za svaku metodu za slučaj različitih početnih vrijednosti funkcije i iste vrijednosti tačnosti

Redni broj	10^{-3}								
	$\psi_0 = 1$			$\psi_0 = 2$			$\psi_0 = 5$		
	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP
1.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
2.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
3.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
4.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
5.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4450
6.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4448
7.	4	29	17	6	135	67	10	5631	4443
8.	4	29	17	6	135	67	10	5630	4428
9.	4	29	17	6	135	67	10	5628	4387
10.	4	29	17	6	134	67	10	5622	4291
11.	4	29	17	6	134	66	10	5610	4099
12.	4	29	17	6	133	66	10	5584	3784
13.	4	29	17	6	132	65	10	5535	3370
14.	4	28	17	6	130	64	10	5447	2919
15.	4	27	16	6	127	62	10	5308	2499
16.	4	26	16	6	121	59	10	5100	2125
17.	4	25	15	6	115	55	10	4823	1809
18.	4	22	14	6	106	51	10	4484	1542
19.	4	20	13	6	97	47	9	4105	1318
20.	4	18	12	5	87	42	9	3706	1128
21.	4	15	11	5	77	38	9	3314	969
22.	4	13	10	5	68	34	9	2943	835
23.	3	11	9	5	60	30	9	2608	725
24.	3	9	8	5	52	27	9	2312	634
25.	3	8	7	5	46	24	9	2047	557
26.	3	7	6	5	42	22	9	1875	508

Analogno prethodnom, na slici 5.13 prikazani su konvergenijska kriva (za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti) i zahtijevani potreban broj iteracija u slučaju kada je tačnost rješavanja jednačina 10^{-5} , a početni uslov $\psi_0 = 1$. Na slici 5.14 prikazani su isti rezultati za tačnost 10^{-10} , a na slici 5.15 isti rezultati za tačnost 10^{-15} .

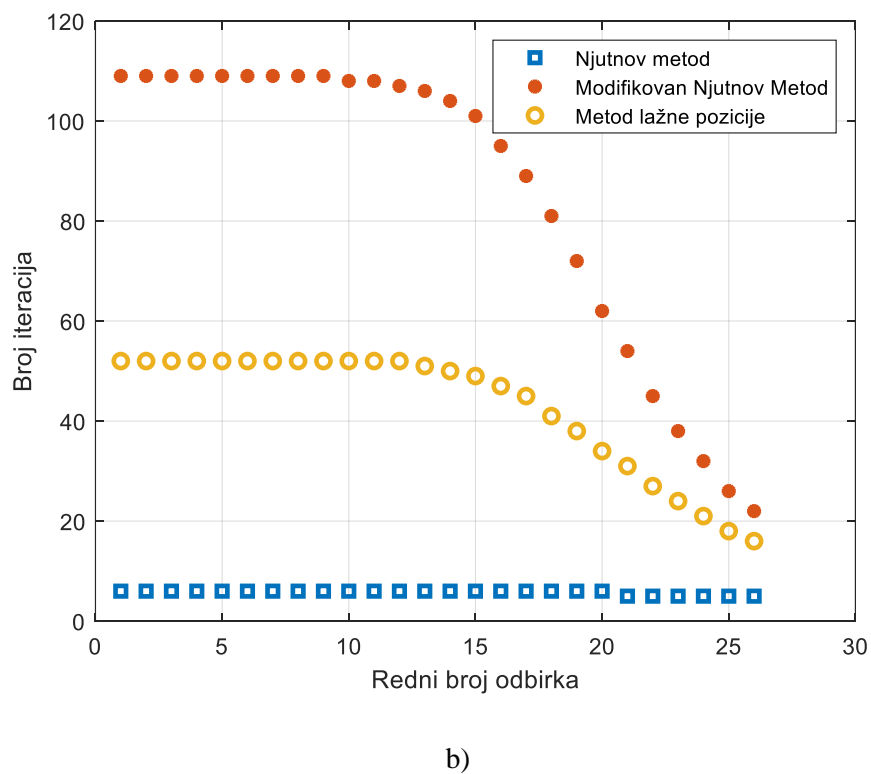
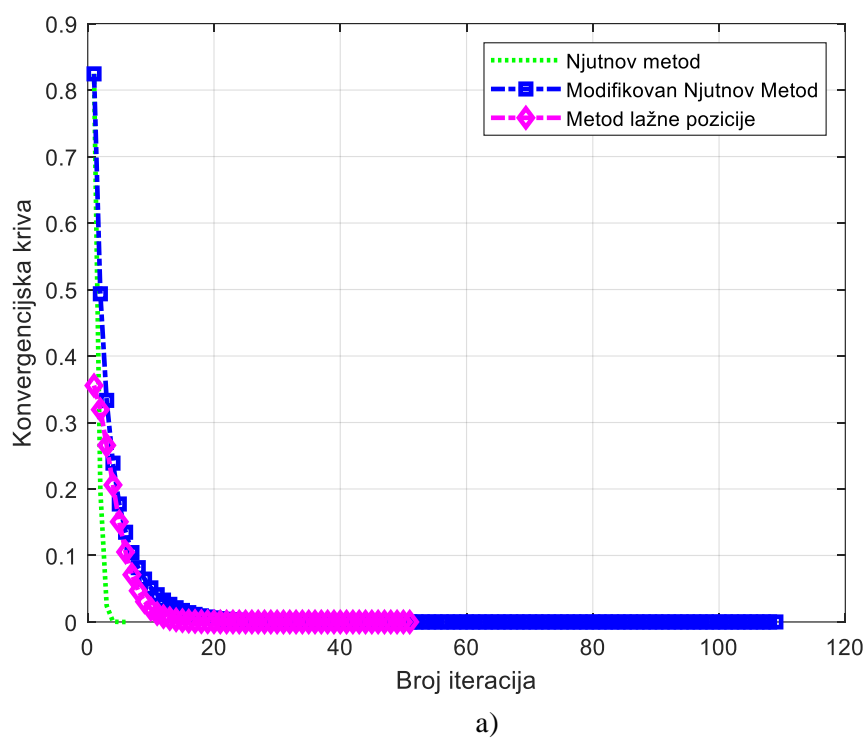


a)

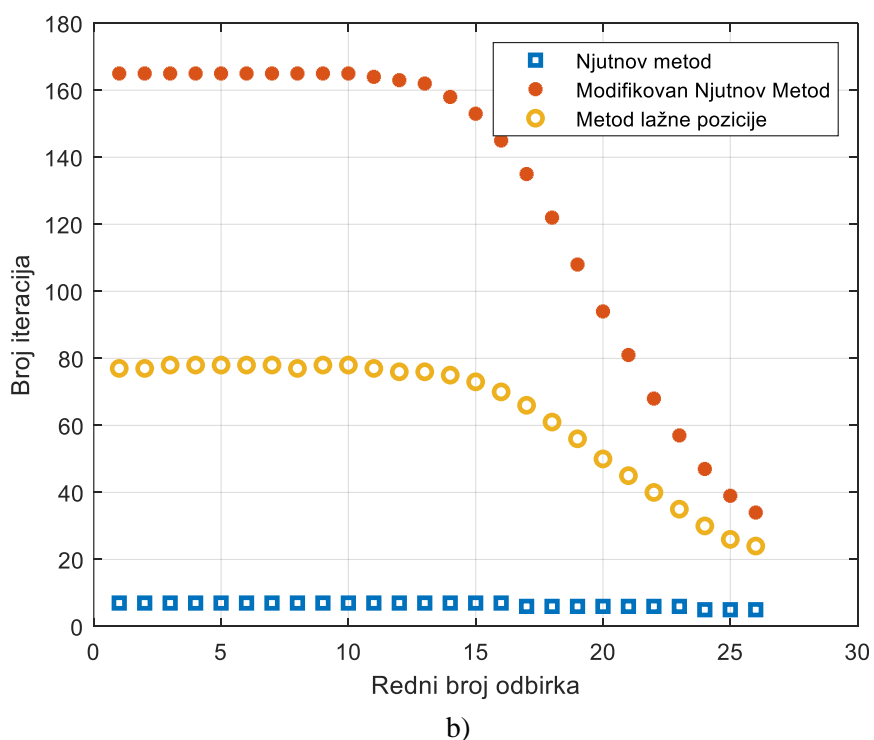
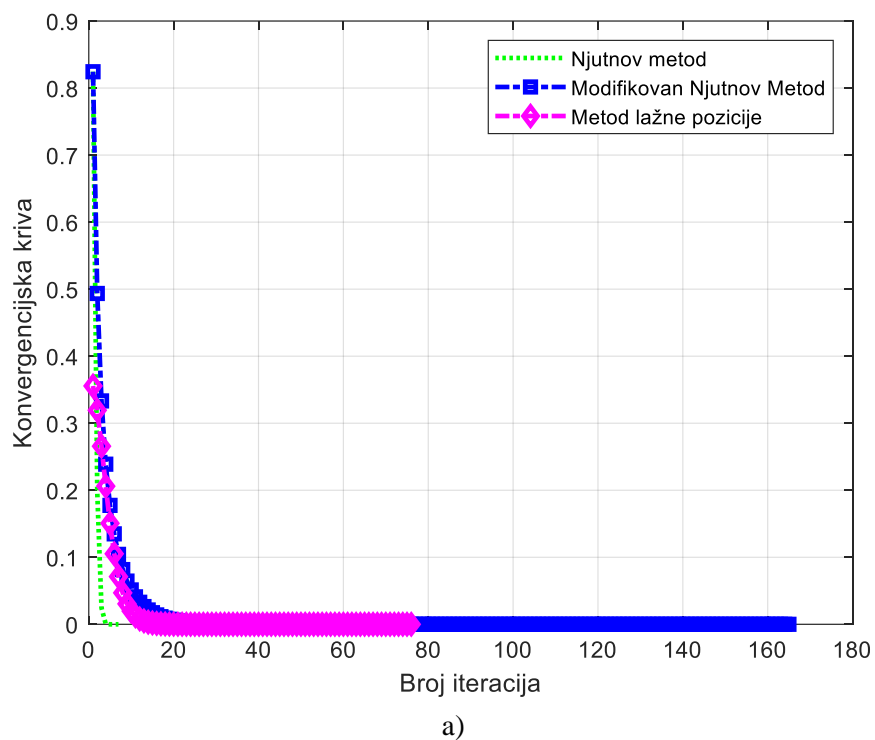


b)

Slika 5.13: a) Konvergenjska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-5} .



Slika 5.14: a) Konvergenijska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-10} .



Slika 5.15: a) Konvergenjska kriva za prvi odbirak strujno-naponske zavisnosti, b) Potreban broj iteracija u funkciji rednog broja odbirka za $\psi_0 = 1$ i tačnost 10^{-15} .

Sumarni rezultati uticaja različite tačnosti rješavanja jednačina na zahtijevani potreban broj iteracija, za svaki od odbiraka strujno-naponske zavisnosti, dat je u Tabeli V.7.

Tabela V.7 - Potreban broj iteracija za svaku metodu za slučaj kada su početni uslovi je isti, dok se faktor tačnosti mijenjanja

Redni broj	$\psi_0 = 1$								
	10^{-5}			10^{-10}			10^{-15}		
	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP	NM	MNM	MLP
1.	5	52	27	6	109	67	7	165	77
2.	5	52	27	6	109	67	7	165	77
3.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
4.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
5.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
6.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
7.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
8.	5	52	27	6	109	52	7	165	77
9.	5	52	27	6	109	52	7	165	78
10.	5	52	27	6	108	52	7	165	78
11.	5	52	27	6	108	52	7	164	77
12.	5	51	27	6	107	52	7	163	76
13.	5	51	27	6	106	51	7	162	76
14.	5	50	26	6	104	50	7	158	75
15.	5	48	26	6	101	49	7	153	73
16.	5	46	25	6	95	47	7	145	70
17.	5	43	23	6	89	45	6	135	66
18.	5	39	22	6	81	41	6	122	61
19.	5	35	20	6	72	38	6	108	56
20.	5	31	18	6	62	34	6	94	50
21.	4	26	16	5	54	31	6	81	45
22.	4	22	15	5	45	27	6	68	40
23.	4	19	13	5	38	24	6	57	35
24.	4	16	11	5	32	21	5	47	30
25.	4	13	10	5	26	19	5	39	26
26.	4	11	9	5	22	18	5	34	24

Na bazi svih prethodnih rezultata u Tabeli V.8 sumiran je minimalni i maksimalni broj iteracija koji je potreban za rješavanje strujno-naponskih parova RTC France solarne ćelije za različite početne vrijednosti pri tačnosti 10^{-3} .

Sažetak minimalnog i maksimalnog broja iteracija za odabrane iterativne metode, posmatrajući sve mjerene tačke trodiodnog modela RTC France solarne ćelije i za istu vrijednost kriterijuma tačnosti, dat je u Tabeli V.8.

U Tabeli V.9 prikazan je minimalni i maksimalni broj iteracija koji je potreban za svaku od metoda za različite vrijednosti tačnosti (10^{-5} , 10^{-10} , 10^{-15}), pri početnom uslovu $\psi_0 = 1$.

Tabela V.8 - Minimalni i maksimalni broj iteracija za korišćene iterativne metode posmatrajući sve mjerene tačke trodiodnog modela RTC France solarne ćelije, pri istoj vrijednosti kriterijuma tačnosti

Iterativni metoda	Vrijednost	Kriterijum tačnosti		
		10^{-3}		
		$\psi_0 = 1$	$\psi_0 = 2$	$\psi_0 = 5$
Njutnov metod	Min	3	5	9
	Max	4	6	10
Modifikovani Njutnov metod	Min	7	42	1875
	Max	29	135	5631
Metod lažne pozicije	Min	6	23	508
	Max	17	67	4450

Tabela V.9 - Minimalni i maksimalni broj iteracija za korišćene iterativne metode posmatrajući sve mjerene tačke trodiodnog modela RTC France solarne ćelije.

Iterativni metod	Vrijednost	Vrijednost početnih uslova		
		$\psi_0 = 1$		
		10^{-5}	10^{-10}	10^{-15}
Njutnov metod	Min	4	5	5
	Max	5	6	7
Modifikovani Njutnov metod	Min	11	22	34
	Max	52	109	165
Metod lažne pozicije	Min	9	19	24
	Max	27	52	77

Posmatrajući sve prethodne rezultate mogu se izvesti apsolutno identični zaključci koje su dobijeni pri rješavanju nelinearne jednačine kod DDM. Naime, sa prikazanih grafika jasno se vidi da je Njutnov metod taj koji najbrže konvergira za definisanu tačnost. Štaviše, za sve vrijednosti tačnosti (10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-10}) ovaj metod konvergira za sve posmatrane tačke veoma brzo, reda do 10 iteracija. Međutim, modifikovani Njutnov metod i metod lažne pozicije su itekako zavisni kako od početnih uslova, tako i od zadate tačnosti. Zahtijevani broj iteracija kod ovih metoda može da se razlikuje i po nekoliko stotina puta jedne u zavisnosti od početnih uslova. Prema tome, definitivno se može zaključiti da za rješavanje strujno-naponske jednačine, kako kod DDM, tako i kod TDM, najekonomičnije koristiti Njutnov metod koji garantuje najbržu konvergenciju ka tačnom rješenju, i konvergenciju koja gotovo ili veoma malo zavisi od početnih uslova.

6. Zaključak

Solarna energija je jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora energije, a značajan globalni trend ka solarnoj energiji doveo je do razvoja studija o proizvodnji solarnih ćelija visokih performansi. Zbog toga je od suštinskog značaja pouzdano, efikasno, tačno i brzo modelovanje solarnih sistema i njihovih komponenti. U ovom radu su opisana tri osnovna matematička modela solarnih ćelija, gdje je pokazano da su strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija nelinearne funkcije. Zatim su predstavljene iterativne metode i ispitana je efikasnost njihove primjene i njihovo međusobno poređenje za rješavanje strujno-naponskih zavisnosti u modelima solarnih ćelija sa dvije i tri diode.

U radu je prikazano ispitivanje efikasnosti primjene tri iterativne metode: Njutnov metod, modifikovani Njutnov metod i metod lažne pozicije. Simulacija rada solarne ćelije sa parametrima datim od strane proizvođača je izvršena u softverskom paketu Matlab R2020a/Simulink. Svi testovi su izvedeni korišćenjem kombinacije različitih kriterijuma tačnosti za rješavanje nelinearne jednačine koja izražava zavisnost struje i napona, kao i korišćenjem različitih početnih uslova. Sva ispitivanja su obavljena za parametre dobro poznate RTC France solarne ćelije koja se koristi u mnogim istraživačkim radovima.

Analizom dobijenih rezultata je pokazano da su sve metode u nekoj mjeri zavisne od vrijednosti početnih uslova i definisane tačnosti. Međutim, primjenom Njutnovog metoda za specifične vrijednosti početnih uslova, dolazi se do drastično veće efikasnosti u rješavanju strujno-naponske zavisnosti, u poređenju sa ostalim metodama. Time je pokazano da ova metoda predstavlja odličan izbor za rješavanje nelinearnih matematičkih modela kakvi su DDM i TDM. S tim u vezi, pokazano je da je iterativni Njutnov metod skoro nezavisan od početnih uslova, što je odlična prednost u odnosu na ostale metode. U poređenju sa ovom metodom pokazano je da modifikovani Njutnov metod i metod lažne pozicije značajno zavise od početnih uslova, sa izrazito slabijom konvergencijom.

Cilj narednih istraživanja iz ove oblasti će nedvosmisleno biti usmjeren na praktičnu realizaciju analiziranih metoda tj. kroz njihovu implementaciju u optimizacionim metodama za estimaciju parametara solarnih ćelija. Takođe, u budućim radovima fokus će biti stavljen na razvoj novih iterativnih algoritama koji kombinuju dobra svojstva istraživanih metoda.

Literatura

- [1] Szabó, L. The history of using solar energy. In Proceedings of the 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 6–9 June 2017; Library, New York, NY, USA; pp. 1–8.
- [2] IKumar, Karthik, et al. "A History of the Solar Cell, in Patents." *Intellectual Property Magazine* (2020).
- [3] Jones, Geoffrey G., and Loubna Bouamane. "' Power from Sunshine": A Business History of Solar Energy." *Harvard Business School Working Paper Series* (2012).
- [4] Hernandez, Rebecca R., et al. "Environmental impacts of utility-scale solar energy." *Renewable and sustainable energy reviews* 29 (2014): 766-779.
- [5] International Energy Agency, The role of CCUS in low-carbon power systems. Technical Report, 2020.
- [6] International Energy Agency, Key electricity trends 2020 – Analysis. Paris, 2020.
- [7] Izam, Najwa Syahirah Mohamed Nor, et al. "Sustainable development perspectives of solar energy technologies with focus on solar Photovoltaic—A review." *Energies* 15.8 (2022): 2790.
- [8] Ludin, Norasikin Ahmad, et al. "Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (2018): 11-28.
- [9] Desideri, Umberto, et al. "Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems." *Applied Energy* 97 (2012): 930-943.
- [10] Huang, Beijia, et al. "Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process." *Solar Energy* 143 (2017): 132-141.
- [11] Torres, Jaime Fernández, and Fontina Petrakopoulou. "A Closer Look at the Environmental Impact of Solar and Wind Energy." *Global Challenges* 6.8 (2022): 2200016.
- [12] Karapanagiotis, N. "Environmental impacts from the use of solar energy technologies." *THERMIE* (2000).
- [13] Energy, Wind. "The Socio-economic Benefits of Solar and Wind Energy." (2014).
- [14] Tsoutsos, Theocharis, Niki Frantzeskaki, and Vassilis Gekas. "Environmental impacts from the solar energy technologies." *Energy policy* 33.3 (2005): 289-296.
- [15] Abid, Mohammed Kadhem, et al. "Environmental Impacts of the Solar Photovoltaic Systems in the Context of Globalization." *Ecological Engineering & Environmental Technology (EEET)* 24.2 (2023).
- [16] Rončević, Tihana. *Obnovljivi izvori energije: fotonaponska elektrana*. Diss. Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Department of Physics. Division of Experimental Physics. Division Chair of Condensed Matter Physics, 2018.
- [17] Weissman, G., E. Searson, and R. Sargent. "The true value of solar. Measuring the benefits of rooftop solar power." (2019): 1-16.
- [18] Scheer, H. "Solar energy's economic and social benefits." *Solar energy materials and solar cells* 38.1-4 (1995): 555-568.
- [19] Sharif, Arshian, et al. "Role of solar energy in reducing ecological footprints: An empirical analysis." *Journal of Cleaner Production* 292 (2021): 126028.
- [20] Osman, Ahmed I., et al. "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review." *Environmental Chemistry Letters* 21.2 (2023): 741-764

- [21] Al, S. "Visual impacts of the solar collectors and water tanks." *Second National Congress of Engineering of Installation Announcement Book*. Vol. 2. 1995.
- [22] Atagunduz, G. "Fundamentals of the Solar Energy and Its Applications." *Solar Energy Institute Publication 2* (1989).
- [23] Starks, Garrett. *Comparative Performance Analysis of Mod 303 Evacuated Tube and Flat Plate Solar Thermal Collectors*. Diss. Evergreen State College, 2015.
- [24] Gunerhan, Huseyin, Arif Hepbasli, and U. Giresunlu. "Environmental impacts from the solar energy systems." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 31.2 (2008): 131-138.
- [25] Russo, M. A., et al. "Forecasting the inevitable: A review on the impacts of climate change on renewable energy resources." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 52 (2022): 102283.
- [26] De Jong, P., et al. "Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013): 526-535.
- [27] Bichet, Adeline, et al. "Potential impact of climate change on solar resource in Africa for photovoltaic energy: analyses from CORDEX-AFRICA climate experiments." *Environmental Research Letters* 14.12 (2019): 124039.
- [28] Losada Carreño, Ignacio, et al. "Potential impacts of climate change on wind and solar electricity generation in Texas." *Climatic Change* 163 (2020): 745-766.
- [29] Osman, Ahmed I., et al. "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review." *Environmental Chemistry Letters* 21.2 (2023): 741-764.
- [30] Fraunhofer ISE, Photovoltaics report, Fraunhofer ISE and PSE Conferences & Consulting GmbH, Freiburg, (2019).
- [31] Shravan, K., Chunduri, K., "PERC solar cell technology- 2018 Edition", TaiyangNews, China, (2018).
- [32] Cherradi, Nabih. "Solar PV technologies what's next?" *Becquerel Institute, Brussels, Belgium* (2019).
- [33] IRENA (2016), *The power to change: Cost reduction potential for solar and wind*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [34] GlobalData, *Solar PV module: Global market size, competitive landscape and key country analysis to 2022*, GlobalData, London (2018).
- [35] Shravan, K., Chunduri, K., "Advanced solar module technology – The time for a new generation of solar modules has come", TaiyangNews, China (2019).
- [36] Braun, Stefan, et al. "The multi-busbar design: an overview." *Energy Procedia* 43 (2013): 86-92.
- [37] IRENA, C. "The Socio-Economic Benefits of Large-Scale Solar and Wind: An econValue Report." *International Renewable Energy Agency (IRENA): Abu Dhabi, UAE* (2014).
- [38] Thurstom, C.,W. "Solar carports thrive on dual-use concept", *PV Magazine Photovoltaic markets and technology*, (2019).
- [39] Moharram, Khaled A., et al. "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling." *Ain Shams Engineering Journal* 4.4 (2013): 869-877.
- [40] Irena, I. R. E. A. "Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects." *Abu Dhabi* (2019).
- [41] Asonja, Aleksandar. "The Justification and Efficiency of Solar Photovoltaic Panels Application in Agricultural Production." (2015).
- [42] Zaidi, Beddiaf. "Introductory chapter: Introduction to photovoltaic effect." *Solar Panels and Photovoltaic Materials* (2018): 1-8.

- [43] Matthew Schwartz. *Semiconductors*. Statistical Mechanics. 2021.
- [44] Hersch, Paul, and Kenneth Zweibel. *Basic photovoltaic principles and methods*. No. SERI/SP-290-1448. Solar Energy Research Inst.(SERI), Golden, CO (United States), 1982.
- [45] Gajović, J. *Optimalna koordinacija radnih parametara mikro PV sistema u cilju postizanja efikasne regulacije napona u niskonaponskoj mreži*. Magistarski rad. Univerzitet Crne Gore. Elektrotehnički fakultet. 2017.
- [46] Işık, Tunahan. "Solar Cells Review." (2015): 28-33.
- [47] Tadić Nikša. *Predavanje iz Osnova elektronike*. Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore.
- [48] Guerra, Noemi, et al. "Operation and physics of photovoltaic solar cells: an overview." *I+ D Tecnológico* 14.2 (2018): 84-95.
- [49] Jeremić U. *Fotonaponsko pretvaranje energije*. Diplomski rad. Univerzitet u Prištini. Prirodno-Matematički fakultet. 2007.
- [50] Cook, Gary. *Photovoltaic fundamentals*. Solar Energy Research Institute, 1991.
- [51] Čus, P. *Strujno-naponska karakterizacija solarnih ćelija*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu. Prirodno-matematički fakultet. (2021)
- [52] Đurić, R. *Solarna energija i fotonaponski sistemi*. Elektrotehnički fakultet u Beogradu. 2020.
- [53] Gray, Jeffery L. "The physics of the solar cell." *Handbook of photovoltaic science and engineering* 2 (2011): 82-128.
- [54] Masters, Gilbert M. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [55] Hadjab, Moufdi, Smail Berrah, and Abid Hamza. "Neural network for modeling solar panel." *International journal of energy* 6.1 (2012): 9-16.
- [56] Villalva, Marcelo Gradella, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays." *2009 Brazilian Power Electronics Conference*. IEEE, 2009.
- [57] Rolevski, M. *Modelovanje i praćenje tačke maksimalne snage fotonaponskog panela primjenom neuralnih mreža*. Magistarski rad. Univerzitet Crne Gore. Elektrotehnički fakultet. 2020.
- [58] Ndi, Francelin Edgar, et al. "Estimation of single-diode and two diode solar cell parameters by equilibrium optimizer method." *Energy Reports* 7 (2021): 4761-4768.
- [59] Moshksar, Ehsan, and Teymoor Ghanbari. "Adaptive estimation approach for parameter identification of photovoltaic modules." *IEEE Journal of Photovoltaics* 7.2 (2016): 614-623.
- [60] Humada, Ali M., et al. "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016): 494-509.
- [61] Keita, E. H. M. Mbaye, F. Correa, A. A. Dia, M. Sene, C. Mbow, B. – Ideal Solar Cell Electrical Parameters and Ideality Factor Effect on the Efficiency – International Journal of Energy and Power Engineering, Science Publishing Group, 2023.
- [62] Shockley, W.; Queisser, H. J. – *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells* – Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, New York, USA, 1961.

- [63] Laudani, Antonino, Francesco Riganti Fulginei, and Alessandro Salvini. "Identification of the one-diode model for photovoltaic modules from datasheet values." *Solar energy* 108 (2014): 432-446.
- [64] Biswas, Partha P., et al. "Parameter estimation of solar cells using datasheet information with the application of an adaptive differential evolution algorithm." *Renewable energy* 132 (2019): 425-438.
- [65] Laudani, Antonino, Francesco Riganti Fulginei, and Alessandro Salvini. "High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms." *Solar Energy* 103 (2014): 316-326.
- [66] Chatterjee, Abir, Ali Keyhani, and Dhruv Kapoor. "Identification of photovoltaic source models." *IEEE Transactions on Energy conversion* 26.3 (2011): 883-889.
- [67] Rawa, M., Čalasan, M., Abusorrah, A., Alhussainy, A. A., Al-Turki, Y., Ali, Z. M., Sindi, H., Mekhilef, S., Aleem, S. H. E. A., Bassi, H., Single Diode Solar Cells — Improved Model and Exact Current–Voltage Analytical Solution Based on Lambert’s W Function, *Sensors*, 2022, 22(11), 4173.
- [68] Andreea Sabadus, Marius Paulescu, On the Nature of the One-Diode Solar Cell Model Parameters: *Energies*, 2021, 14(13), 3974.
- [69] Tanvir Ahmad, Sharmin Sobhan, Md. Faysal Nayan, Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2016.
- [70] Ali, M. S. Kazmi, S. M. R. – An Accurate Analytical Approach for the Parameterization of the Single Diode Model of Photovoltaic Cell – Cornell University Library, Ithaca, USA, 2020.
- [71] Simulation of Single-Diode Equivalent Model of Polycrystalline Silicon Solar Cells, *International Journal of Materials Science and Applications*, 2017.
- [72] Constantine, P. G. Zaharatos, B. Campanelli, M. – Discovering an Active Subspace in a Single-Diode Solar Cell Model – Cornell University Library, Ithaca, USA, 2014.
- [73] Sabadus, A. Paulescu, M. – On the Nature of the One-Diode Solar Cell Model Parameters – *Energies*, MDPI, Basel, Switzerland, 2021.
- [74] Raya Armenta, J. M. – An Accurate Physical Model for PV Modules with Improved Approximations – UPC Institutional Repository, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2021.
- [75] Čalasan, Martin, Shady HE Abdel Aleem, and Ahmed F. Zobaa. "A new approach for parameters estimation of double and triple diode models of photovoltaic cells based on iterative Lambert W function." *Solar Energy* 218 (2021): 392-412.
- [76] Khanna, V. Das, B. K. Bisht, D. Singh, P. K. – A three-diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm – *Renewable Energy*, Elsevier, 2015.
- [77] Aoun, N.; Chenni, R.; Nahman, B.; Bouchouicha, K. – Three-diode model for polysilicon solar cells – *Energy and Power Engineering*, Scientific Research Publishing, 2014.
- [78] Krstic, Mihailo. "Iterativni algoritmi za rešavanje nelinearnih jednačina i sistema." (2016)
- [79] Čalasan, Martin, et al. "Comparative analysis of different iterative methods for solving current–voltage characteristics of double and triple diode models of solar cells." *Mathematics* 10.17 (2022): 3082.

- [80] Rawa, Muhyaddin, et al. "Estimation of parameters of different equivalent circuit models of solar cells and various photovoltaic modules using hybrid variants of honey badger algorithm and artificial gorilla troops optimizer." *Mathematics* 10.7 (2022): 1057.

**IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE
MASTER RADA**

Kandidat: Milan Ružić

Naslov rada: Poređenje iterativnih algoritama za rješavanje strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija

Mentor: prof. dr Martin Čalasan

Ja, dolje potpisan, izjavljujem da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem titule Master of Science, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv i odbrane master rada.

U Podgorici, 2025. godine

Potpis studenta



IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

"Poređenje iterativnih algoritama za rješavanje strujno-naponske zavisnosti dvodiodnog i trodiodnog modela solarnih ćelija"

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim prilogima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

U Podgorici, 25.11.2025. godine

Potpis magistranda



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
6. Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda