Broj rada: R5-13
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-13_150

PRIMENA ALGORITAMA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE PRI MODELOVANJU SREDNJENAPONSKIH I NISKONAPONSKIH ELEKTRODISTRIBUTIVNIH SISTEMA

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN THE MODELING OF MEDIUM-VOLTAGE AND LOW-VOLTAGE ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Jelena KOMAD, Electroconsult d.o.o, Republika Srbija*
Nataša SAVIĆ, Electroconsult d.o.o, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Veštačka inteligencija je mašinski sistem koji je sposoban da izvršava različite zadatke koje čovek definiše, odnosno da se vrši simulacija ljudske inteligencije nad različitim zadacima pomoću unapred programiranih mašinskih sistema. Danas se veštačka inteligencija koristi u svakodnevnom životu, ali pored toga može se veoma uspešno koristi i u energetici. U ovom radu je dat primer optimizacije modelovanja srednjenaponske i niskonaponske elektrodistributivne mreže pomoću više algoritama veštačke inteligencije. Cilj primene algoritama veštačke inteligencije je poboljšanje kontinualnog snabdevanja potrošača električnom energijom. Optimizacija modelovanja podrazumeva primenu efikasnijeg modelovanja samog sistema, grafički prikaz rezultata modelovanja sistema, linearizaciju dobijenih podataka i testiranje različitih realnih situacija istovremeno. U radu je opisan način dobijanja modela koji je testiran na primeru srednjenaponskog i niskonaponskog elektrodistributivnog sistema, uz pomoć algoritama veštačke inteligencije. Važno je da se u izradi modela i testiranju dodatno ne opterećuje sistem.

Ključne reči: algoritmi veštačke inteligencije, modelovanje, optimizacija modelovanja, srednjenaponski i niskonaponski elektrodistributivni sistem, veštačka inteligencija

ABSTRACT

Artificial intelligence is a machine- based system capable of performing various tasks defined by humans, that is, simulating human intelligence across different tasks using pre-programmed machine systems. Today, artificial intelligence is used in everyday life, but it can also be used in energy. In this paper, an example of improving the modeling of medium-voltage and low-voltage electrical distribution systems using several artificial intelligence algorithms. The main goal of applying artificial intelligence algorithms is to improve the continuous supply of

* Jelena Komad, jelena.komad@electroconsult.rs; Nataša Savić, <natasa.savic@electroconsult.rs

electricity to consumers. Optimization of modeling involves applying more efficient methods to model the system itself, creating graphical representations of system modeling results, linearizing the obtained data, and testing different real-world scenarios simultaneously. The paper describes the method of obtaining the model, which was tested using artificial intelligence algorithms on the example of a medium-voltage and low-voltage electrical distribution system. It is important not to overload the system during model making and testing.

Key words: artificial intelligence, artificial intelligence algorithms, modeling, modeling optimization, medium and low-voltage electric distribution system

UVOD

Cilj ovoga rada jeste prikaz načina optimizacije modelovanja jedne srednjenaponske mreže uz pomoć algoritama veštačke inteligencije. Primer na kome je urađena jedna ovakva optimizacija jeste na distributivnoj mreži između TS Kalemegdan i TS Zeleni Venac u Beogradu.

Ideja za optimizacijom modelovanja i planiranja jedne ovakve mreže uz pomoć alata veštačke inteligencije proistekla je iz činjenice da se danas sve više i više koristi veštačka inteligencija kako u svakodnevnom životu, tako i u sferi planske energetike. U oblasti planske energetike, veštačka inteligencija se najviše koristi za predviđanje trenda potrošnje električne energije u periodu od 20 do 50 godina, zatim za optimizaciju konfiguracije mreže i predikciju kvarova i što je poslednjih godina veoma važno za integraciju obnovljivih izvora energije gde se uključuje većinska upotreba “zelene energije”, za simulaciju “scenarija” totalnog prelaska na “zelenu energiju” i sl..

U nastavku rada biće prikazano poređenje algoritama veštačke inteligencije u odnosu na ljudski algoritam na primeru modelovanja distributivne mreže Kalemegdan – Zeleni Venac zajedno sa grafičkim izgledom same aplikacije za modelovanje jedne takve mreže.

POJAM I OSNOVE PLANIRANJA MREŽE IZMEĐU TS KALEMEGDAN I TS ZELENI VENAC

Planiranje jedne elektrodistributivne mreže kao što je mreža područja između TS Kalemegdan i TS Zeleni Venac predstavlja proces gde je potrebno odgovoriti na pitanja: koji su optimalni naponski nivoi koji mogu da se koriste, a pri tome je važno da su gubici pri prenosu energije što manji. Ujedno za određeni naponski nivo treba odrediti tip opreme, tip vodova sa odgovarajućim poprečnim presekom, tip transforatorskih stanica, kao i strukturu mreže koju je najbolje primeniti i sl. Pored odgovara na tehnička pitanja o samoj distributivnoj mreži, potrebno je da se ispoštuje sigurnost i kvalitet električne energije koja se isporučuje potrošačima, a pri tome da su ulaganja u jedan takav sistem minimalna. Prilikom planiranja jedne distributivne mreže potrebno je da se uzmu u obzir poteškoće poput neizvesnosti u genralnom razvoju (nagli porast potrošnje električne energije u odnosu na planiran porast, nepoznata cena električne energije na duži vremenski period) i stohastička neizvesnost (ispadi i kvarovi opreme, zavisnost potrošnje od spoljašnjh uticaja poput temperature).

ALGORITMI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Algoritmi veštačke inteligencije predstavljaju skup matematičkih i statičkih metoda i modela koji omogućavaju računarima da "uče" iz podataka na način da prepoznaju obrasce kroz mašinsko učenje. Osobine ovih algoritama se zasnivaju na supervizovanom učenju, odnosno učenju iz linearne i logičke regresije, "stablo odlučivanja" (algoritam zasnovan na pitanjima koji se kroz odgovor na postavljeno pitanje grana u stablo podataka i informacija), mašina potpornih vektora (određivanje granice između različitih grupa podataka), nesupervizovano učenje gde algoritam sam traži strukture podataka na osnovu ponašanja korisnika, učenje kroz "nagradu" (sistem "uči" kroz davanje ispravnih i neispravnih odgovora i komunikaciju sa korisnikom koji kaže da li je odgovor ispravan ili neispravan), koncept dubokog učenja koji se zasniva na veštačkim neuronskim mrežama i naprednim oblicima neuronskih mreža (koriste se za prepoznavanje slika, govora, prevođenje sa jednog jezika na dtugi jezik...). Način na koji jedan algoritam "uči" se zasniva na procesu dobijanja podataka od korisnika, pronalazaka optimalnih obrazaca, pravljenja modela odgovora, testiranje odgovora na novi podacima i poboljšavanje svakog odgovora kroz optimizaciju neuronskih mreža [1]. Prilikom razvoja aplikacije za modelovanje mreže ideja je da se unese određeni broj podataka na osnovu koga će se modelovati mreža i prognozne opterećenja mreže.

"LJUDSKI ALGORITMI"

"Ljudski algoritmi" se zasnivaju na konceptima kongitivnih nauka, psihologiji i na konceptu heuristike (mentalnih "prečica" za brzo donošenje odluka sa "skraćenim koracima"). Ovi algoritmi se zasnivaju na brzini, intuiciji i iskustvu i na taj način dolazi do smanjivanja kongitivnog opterećenja, brže reagovanje na postavljeno pitanje i građenje iskustva kroz različite situacije [2], [3].

RAZVOJ APLIKACIJE ZA MODELOVANJE MREŽE

Razvoj aplikacije za modelovanje srednjenaponske mreže je implementirano u Python programskom jeziku u okviru razvojnog okruženja Visual Studio Code. Prilikom pokretanja same aplikacije otvara se prozor kao što je dat na slici 1 gde je potrebno uneti sledeće parametre:

- Tip voda: aplikacija za modelovanje je implementirana samo za uže gradsko jezgro i samim tim izbor vodova je postavljen da bude samo podzemni, bez mogućnosti izbora za nadzemni,

- Broj stanova: potrebno je uneti okviran broj stambenih jedinica (stanova) koliko ih ima na modelovanoj mreži,

- Poslovni prostor $[m^2]$: potrebno je uneti okviran broj kvdratnih metara poslovnih prostora koji se nalaze na odabranom poveznom vodu, jer potrošnja električne energije za stambene prostore nije ista kao za poslovne prostore,

- Dužina mreže $[km]$: potrebno je uneti tačnu ili približnu razdaljinu modelovane mreže od Kalemegdana do Zelenog Venca. Dužina modelovane mreže zavisi od već unapred

definisane putanje podzemnih vodova i mogućnosti opterećenja već postavljenih podzemnih vodova,

- Instalisanu snagu transformatorskih stanica na celom poveznom vodu od Zelenog Venca do Kalemegdana – s obzirom da na odabranoj deonici postoje transformatorske stanice različitih instalisanih snaga, neće biti jednako opterećenje na svakoj transformatorskoj stanici unutar odabranog poveznog voda,

- Instalisane snage TS [kVA] – s obzirom da na odabranom poveznom vodu postoje već odgovarajuće transformatorske stanice različitih instalisanih snaga, potrebno ih je poznavati i uneti u aplikaciju,

Kada se unesu potrebni parametri, potrebno je da se u aplikaciju pomoću dugmeta "Učitaj Excel" učita Excel tabela koja sadrži podatke o opterećenjima TS "Zeleni Venac" [4]. Učitavanjem Excel tabele na taj način, u aplikaciji se stvara baza podataka koja će se kasnije koristiti za prognozu opterećenja odabranog podužnog voda i same transformatorske stanice TS "Zeleni Venac" u periodu od 10 godina. Nakon unosa potrebnih podataka i učitavanjem Excel tabele, potrebno je kliknuti na dugme "IZRAČUNAJ" i aplikacija za modelovanje mreže se pokreće. Sa desne strane u polju "Rezultati" dobijaju se sledeći parametri:

- OPTEREĆENJA – pod opterećenjima se misli na opterećenje modelovane mreže u godišnjim dobima poput leta (kada dolazi do povećanje potrošnje zbog povećane upotrebe rashladnih uređaja) i zime– kada je povećana potrošnja električne energije zbog grejnih uređaja, vršno opterećenje voda odnosno najveće opterećenje između leta i zime (dan i noć za oba godišnja doba). Prilikom davanja okvirne potrošnje električne energije tokom leta i zime, uzeto je u obzir potrošnja tokom dana i noći,

- OPTIMALAN BROJ TS – prilikom modelovanja mreže, potrebno je da imamo i preporučen broj transformatorskih stanica na određenoj dužini mreže odnosno na razdaljini od početne do krajnje tačke napajanja. U situaciji kada je već poznat broj transformatorskih stanica na povezonm vodu i posle unošenja njihovih instalisanih snaga, aplikacija daju se preporuke koliko bi bilo dovoljno transformatorskih stanica na određenoj dužini,

- PAD NAPONA NA CELOM POVEZNOM VODU – podatak koji nam daje vrednost pada napona na celom poveznom vodu uključujući i padove napona između svake transformatorske stanice,

- UKUPNO OPTEREĆENJE CELOG POVEZNOG VODA – vrednost koja nam govori da li i koliko je neki povezni vod opterećen,

- PADOVI NAPONA PO SEGMENTIMA IZMEĐU DVE TS – brojčani podatak koliko iznosi pad napona između dve transformatorske stanice različitih snaga unutar jednog poveznog voda. Pored informacije o padu napona u ovom segmentu aplikacije, dobija se i vrednost struje unutar svakog segmenta i procentualna vrednost pada napona između dve transformatorske stanice,8

- OPTEREĆENJE PO TS – ispis unetih instalisanih snaga svake posebne transformatorske stanice,

- PROGNOZA OPTEREĆENJA VODA U PERIODU OD 10 GODINA – za prognozu opterećenja se uzima maksimalna snaga koja bi mogla da se očekuje u periodu od 10 godina, linearna snaga i procentualna vrednost porasta/smanjenja opterećenja voda. Podaci o prognozi se dobijau iz unapred učitane Excel tabele u aplikaciju koja se koristi kao baza podataka za prognoze ovakvog tipa [5],

- PROGNOZA OPTEREĆENJA TS ZELENI VENAC – za prognozu opterećenja se uzima maksimalna snaga koja bi mogla da se očekuje u periodu od 10 godina, linearna snaga i procentualna vrednost porasta/smanjenja opterećenja transformatorske stanice. Podaci o prognozi se dobijau iz unapred učitane Excel tabele u aplikaciju koja se koristi kao baza podataka za prognoze ovakvog tipa [6],

- AI PROGNOZA OPTEREĆENJA CELOG POVEZNOG VODA – Prilikom učitavanja Excel tabele u aplikaciju koja je baza podataka, uz pomoć algoritama koje koristi veštačka inteligencija i uz odgovarajuću bazu podataka se dobija prognoza opterećenja za period od 10 godina, ali i više. Parametri koji se dobijaju unutar ovakve prognoze jeste očekivanje maksimalne snage, linearne snage i procentualne vrednosti porasta/smanjenja opterećenja.

Posle unošenja potrebnih parametara za pokretanje same aplikacije za modelovanje mreže i dobijanja odgovarajućih podataka, postoji mogućnost i grafičkog prikaza izgleda modelovane mreže sa modelovanim brojem transformatorskih stanica. Pored toga, postoji mogućnost i štampanja svih podataka u PDF formatu uključujući i grafički prikaz modelovane mreže i na taj način kasnije štampanje podataka u papirni oblik, ukoliko je neophodno.

TESTIRANJE APLIKACIJE

Testiranje aplikacije za modelovanje mreže se bazira na području između TS Zeleni Venac i TS Kalemegdan, konkretno od ćelije 23 u TS 35/10 kV Zeleni Venac do ćelije 19 u TS 110/10 kV Kalemegdan (“Beograd 14”). Prilikom razvijanja i testiranja aplikacije korišćeni su podaci od već projektovane mreže i urađena je analiza opterećenja 10 kV vodova koji se napajaju iz TS 110/10 kV Kalemegdan (“Beograd 14”) za objekat TS 35/10 kV “Zeleni Venac”, koja je prikazana u tabeli 1. Podaci koji se nalaze u tabeli 1, nalaze se i u Excel fajlu koji se učitava u aplikaciju što predstavlja bazu podataka za prognozu opterećenja [7].

Kod ovakve analize opterećenja TS 110/10 kV Kalemegdan u obzir se uzima razmatranje opterećenja svake ćelije unutar trafostanice, ali najviše u obzir se uzima ćelija 19 na osnovu koje je i testirana aplikacija. Prilikom proračuna opterećenja, uzima se u obzir instalisana snaga svakog transformatora unutar transformatorske stanice, njihova maksimalna snaga i struja. Proračun je rađen za izvorišnu trafostanicu TS 35/10 kV Zeleni Venac, gde su u tabeli 2 dati

podaci pre opterećenja izvorišne trafostanice, a u tabeli 3 posle opterećenja izvorišne trafostanice [8].

Tabela I Opterećenje TS 110/10 kV Kalemegdan ("Beograd 14") po ćelijama

TS 110/10 kV Kalemegdan ("Beograd 14")			
Red. br. ćelije	Instalisana snaga - S_{inst} (MVA)	Maksimalna struja - I_{max} (A)	Koeficijent - k_u
31	5,65	167	0,511
18	1,06	35	0,571
30	5,45	151	0,479
37	2,52	60	0,412
19	5,55	145	0,452
32	4,63	90	0,336
38	3,06	104	0,588
36	3,15	75	0,590

Tabela II Prikaz parametara pre opterećenja TS 35/10 Zeleni Venac

TS 35/10 kV Zeleni Venac – pre opterećenja			
Red. br. transformatora	Instalisana snaga - S_{inst} (MVA)	Maksimalna snaga - S_{max} (MVA)	I (%)
TR1	8	7,4	92,50
TR2	12,5	7,0	56,0
TR3	12,5	9,4	75,20
TR4	12,5	7,7	61,60
Ukupno	45,5	31,5	69,23

Tabela III Prikaz parametara posle opterećenja TS 35/10 Zeleni Venac

TS 35/10 kV Zeleni Venac – posle opterećenja			
Red. br. transformatora	Instalisana snaga - S_{inst} (MVA)	Maksimalna snaga - S_{max} (MVA)	I (%)
TR1	1,5	8,76	70,08
TR2	12,5	9,12	72,96
TR3	12,5	9,04	72,32
TR4	12,5	9,06	72,48
Ukupno	50	35,98	71,96

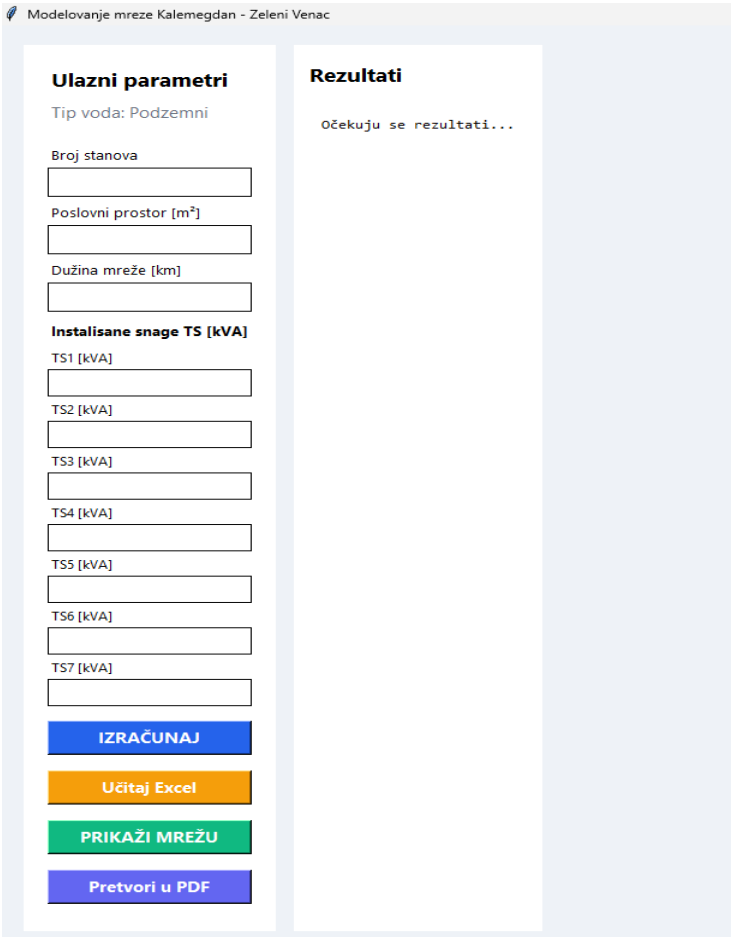
Pored prikazivanja parametara za opterećenja transformatora, potrebno je uraditi i prognozu opterećenja za transformatorske stanice za vremenski period od 10 godina. Prognoza

opterećenja za period od 10 godina je urađena za transformatorsku stanicu TS 35/ 10 kV Zeleni Venac i podaci su dati u tabeli 4 [9].

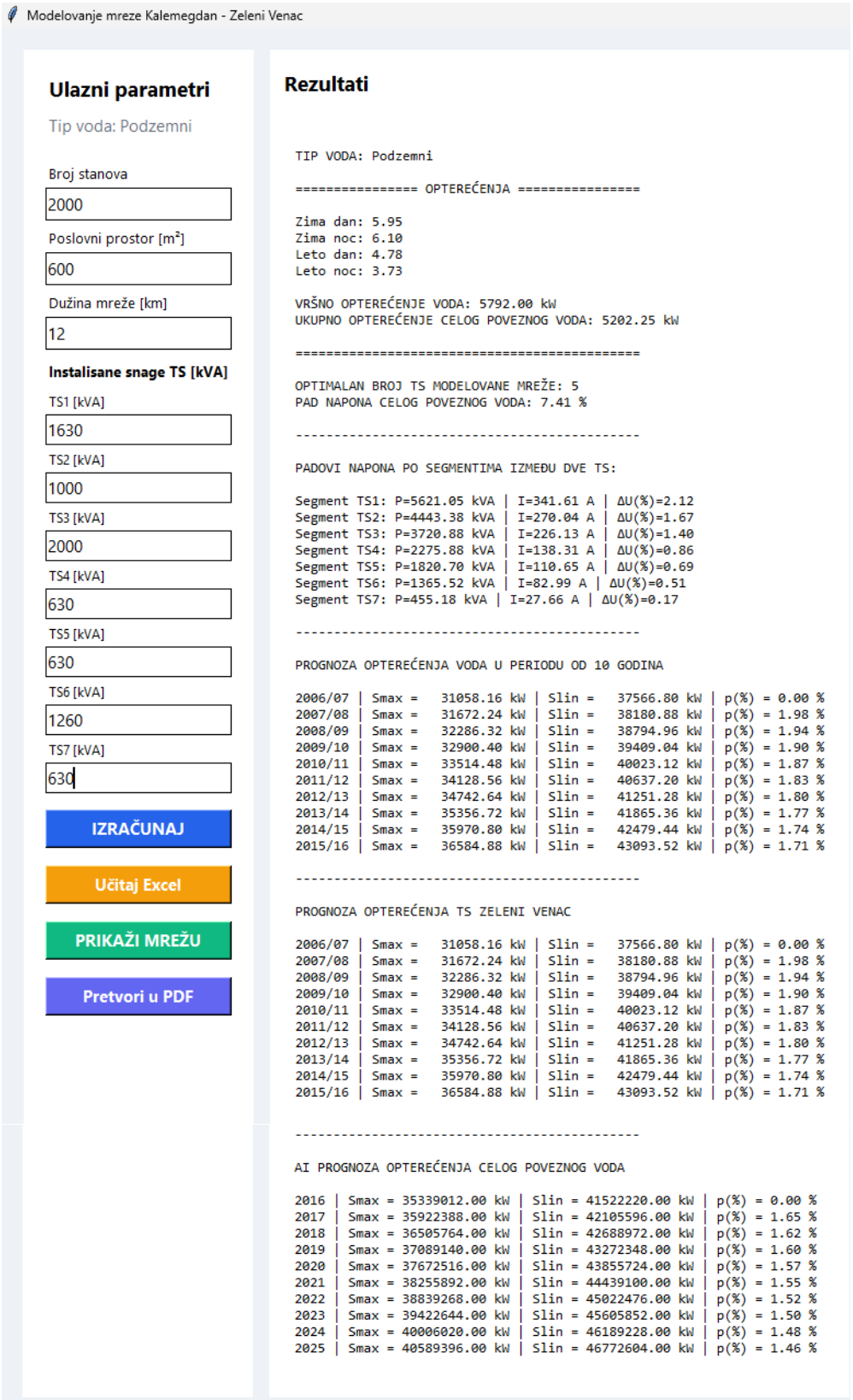
Tabela IV Prikaz prognoze opterećenja TS 35/10 Zeleni Venac za periodo d 10 godina

TS 35/10 kV Zeleni Venac – prognoza opterećenja			
Godina	Maksimalna snaga - S_{max} (MVA)	Linearna snaga - S_{lin} (MVA)	Stopa porasta - s_p (%)
2004/2005	31,4	38,3	2,06
2005/2006	32,0	38,9	2,02
2006/2007	32,7	38,5	1,98
2007/2008	33,3	40,2	1,94
2008/2009	34,0	40,8	1,90
2009/2010	34,6	41,5	1,87
2010/2011	35,3	42,1	1,83
2011/2012	35,9	42,8	1,80
2012/2013	36,6	43,4	1,77
2013/2014	37,2	44,1	1,74
2014/2015	37,9	44,7	1,71

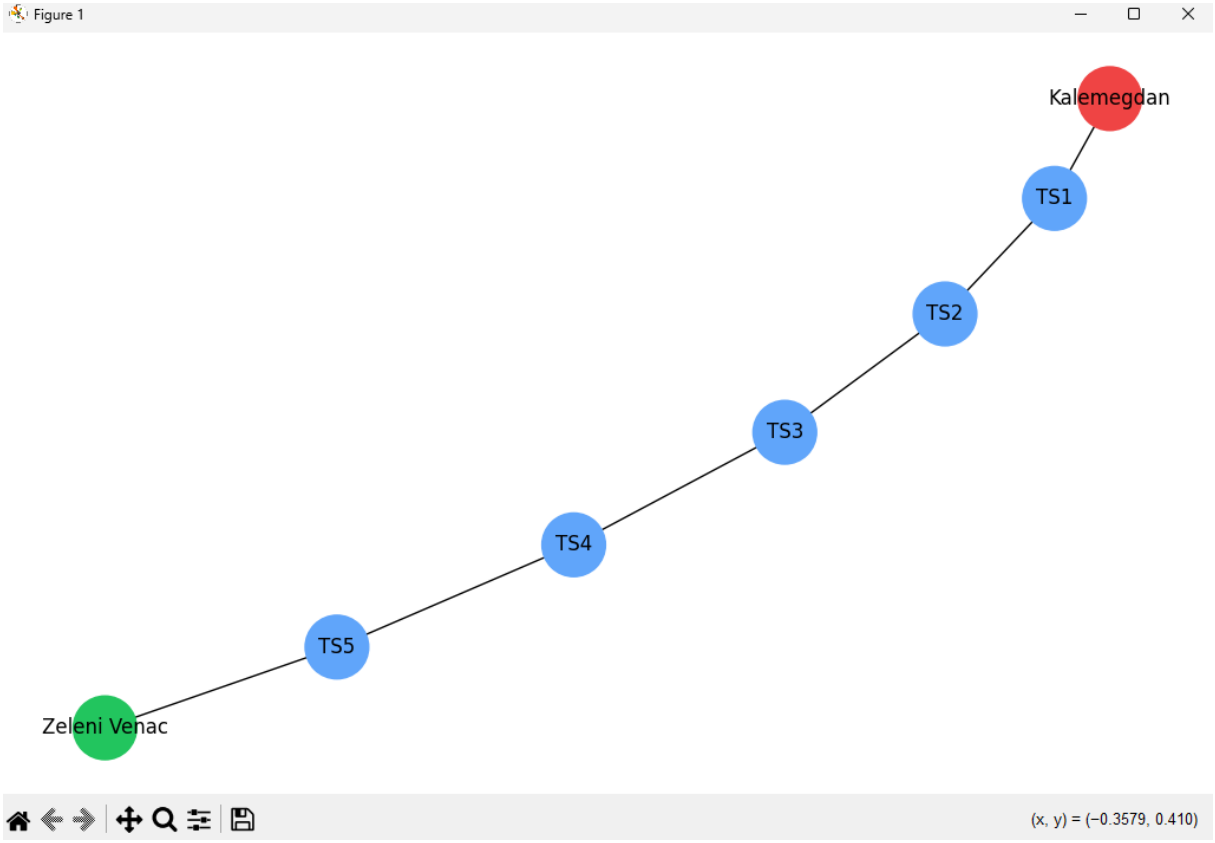
Testiranje aplikacije se sprovodi tako što se prvo unese broj stanova koji se nalaze na određenom poveznom vodu, površina poslovnih prostora, dužina mreže odnosno dužina poveznog voda od početne do krajnje tačke, instalisane snage svih transformatorskih stanica unutar jednog poveznog voda (jer instalisane snage unutar poveznih vodova su različite) i učita Excel tabela u aplikaciju pomoću dugmeta “Učitaj Excel” i klikne se na dugme “IZRAČUNAJ”. Izgled početnog ekrana aplikacije je dat na slici 1. Parametri koji su korišćeni za testiranje same aplikacije su prikazani na slici 2 zajedno sa dobijenim rezultatima nakon klika na dugme “IZRAČUNAJ”. Posle dobijanja potrebnih vrednosti u odnosu na unete podatke, moguće je napraviti izgled modelovane mreže na osnovu unetih podataka i base podataka poveznog voda što se vidi na slici 3.



Slika 1 Početni prikaz aplikacije za modelovanje mreže Kalemegdan – Zeleni Venac pomoću veštačke inteligencije



Slika 2 Prikaz modelovanja mreže pomoću aplikacije koja koristi algoritme veštačke inteligencije



Slika 3 Grafički prikaz modelovane mreže pomoću algoritama veštačke inteligencije

ZAKLJUČAK

Primena algoritama veštačke inteligencije u procesima modelovanja elektrodistributivnih sistema je značajan iskorak ka unapređenju rada u oblastima optimizacije različitih sistema i planske energetike. Na primeru distributivne mreže između TS Zeleni Venac i TS Kalemegdan dat je primer kako i na koji način pomoću algoritama veštačke inteligencije može da se prikaže prognoza opterećenja analiziranog poveznog voda i određene transformatorske stanice. Razvijena aplikacija daje mogućnost generisanja i testiranja različitih stanja i scenarija koja mogu da se dogode na jednoj mreži, analizu promene opterećenja u različitim uslovima i procenu razvoja same mreže. Rezultati testiranja pokazuju da je moguće ostvariti ravnomerniju raspodelu opterećenja po transformatorskim stanicama uz njihov manji broj i na taj način postojeći sistem iskoristiti na optimalan način. Na osnovu sprovedenih analiza i različitih testiranja, algoritmi veštačke inteligencije imaju veliku primenu u elektroenergetici, pogotovo u oblastima planiranja i optimizacije distrinbutivnih mreža i sistema. Daljim razvojem aplikacije stvara se mogućnost rada sa većim bazama podataka, obrađivanje podataka pomoću mašinskog i dubokog učenja radi dobijanja preciznijih prognoza opterećenja i pouzdanijeg elektrodistributivnog sistema.

LITERATURA

[1] https://www.pmf.ni.ac.rs/download/departman_za_racunarske_nauke/Lazar-Stamenkovic-Vestacka-inteligencija-sa-osmehom-na-licu.pdf (posećeno dana: 22.04.2026)

[2]https://inis.bg.ac.rs/lat/uploaded/DOI%20stranci/Kognitivna%20pristrasnost/01.%20MDamnjanovic.pdf (posećeno dana: 22.04.2026.)

[3] https://www.researchgate.net/profile/Milica-Popovic-Stijacic/publication/384564470_Kognitivne_pristrasnosti_i_pogreske/links/66fd6ec29e6e82486ffe6b4a/Kognitivne-pristrasnosti-i-pogreske.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19&__cf_chl_tk=utzzbgP7NhlnHtBuOoZ7caFdJl3nizd1K.VAAL2ceLE-1778500579-1.0.1.1-BMF29VKM4.ylwRfaTCZNwRGdPJz7YgSoRXh5FkEw368 (posećeno dana: 23.03.2026)

[4], [5], [6], [7], [8], [9] N. Savić, “Uklapanje rekonstruisane TS 35/10 kV “Zeleni Venac” u 10 kV mrežu”, Februar 2007, Beograd (posećeno dana: 08.05.2026.)