Broj rada: R3-18
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-18_104

PLANIRANJE PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA VODOVA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA ZASNOVANO NA UPRAVLJANJU RIZIKOM

A RISK-BASED APPROACH FOR PREVENTIVE MAINTENANCE PLANNING OF DISTRIBUTION FEEDERS

Željko POPOVIĆ, Univezitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija*
Marko RAKIĆ, Schneider Electric LLC, Srbija
Vladan KRSMAN, Schneider Electric LLC, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad predlaže pristup zasnovan na upravljanju rizika za planiranje održavanja vodova u elektrodistributivnim mrežama, koji koristi istorijske podatke iz sistema za upravljanje prekidima (OMS) kako bi se dobio plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom. Istovremeno se razmatraju sistemski i lokalni pokazatelji pouzdanosti, po uzrocima prekida, kako bi se obezbedila konzistentnost (pravičnost) po pitanju pouzdanosti u celom sistema. Neizvesnost u pokazateljima pouzdanosti po uzrocima prekida opisana je intervalima dobijenim primenom bootstrap metode i istorijskih OMS podataka. Korišćenjem intervalne TOPSIS tehnike i intervalnih pokazatelja pouzdanosti po uzrocima prekida, vrši se rangiranje uzroka prekida prema pokazateljima pouzdanosti, u skladu sa preferencijama donosilaca odluka u pogledu rizika i pravičnosti pouzdanosti u sistemu. Rang lista se dalje procesira korišćenjem Pareto principa 80/20 kako bi se dobila lista uzroka prekida, tj. parova (uzrok prekida, vod), odgovornih za većinu prekida napajanja. Zatim se definišu preventivne akcije održavanja koje smanjuju uticaj tih uzroka na prekide napajanja. Za svaku aktivnost održavanja definišu se intervali troškova i faktora efikasnosti održavanja kako bi se uzela u obzir neizvesnost u proceni troškova i koristi. Korišćenjem intervalne TOPSIS tehnike, akcije održavanja, tj. parovi (aktivnost održavanja, vod), se rangiraju prema preferencijama donosilaca odluka u pogledu rizika, balansiranja pouzdanosti i kompromisa između koristi i troškova. Predložena procedura, koja koristi rangiranje aktivnosyi održavanja, se zatim primenjuje kako bi se dobio skup preventivnih aktivnosti održavanja koje definišu plan održavanja sa minimalnim rizikom.

Ključne reči: distributivna mreža; pouzdanost; planiranje održavanja; neizvesnost; višekriterijumsko odlučivanje; procena rizika

* Korespondirajući autor: Željko Popović, zpopovic@uns.ac.rs;

Public

ABSTRACT

This paper proposes a risk-based approach for maintenance planning of feeders in distribution networks that use Outage Management System (OMS) historical data to obtain a minimum-risk preventive maintenance plan. It considers simultaneously system-oriented and local-oriented reliability indices per interruption causes to ensure consistency (fairness) of reliability across the system. Uncertainty in reliability indices per interruption causes is described by intervals obtained using the bootstrap method and the historical OMS data. Using the interval extension of the TOPSIS technique and the interval-valued reliability indices per interruption causes, the ranking of interruption causes by the reliability indices is performed according to a decision maker's risk preferences and preferences regarding consistency (fairness) of reliability across the system. The ranking list is further assessed using the 80/20 Pareto principle to obtain a list of interruption causes, i.e., pairs (interruption cause, feeder), responsible for most power interruptions. Then, preventive maintenance actions are defined that reduce the influence of those causes on power interruptions. For a maintenance action, intervals of cost and maintenance effectiveness factors are defined to account for the uncertainty about cost and benefit estimation. Next, using the interval extension of the TOPSIS technique, maintenance actions, i.e., pairs (maintenance action, feeder), are ranked according to a decision maker's risk preference, reliability balancing preference, and the trade-off preference between benefit and cost. The proposed procedure, which employs the ranking of maintenance actions, is then applied to obtain a set of preventive maintenance actions that constitute the minimum-risk maintenance plan.

Keywords: distribution network; reliability; maintenance planning; uncertainty; multi-criteria decision making; risk assessment

UVOD

Pouzdanost distributivnog sistema je ključna za zadovoljstvo potrošača. Zbog toga održavanje i unapređenje pouzdanosti snabdevanja postaje kritično pitanje za distributivne kompanije. Jedna od najčešćih strategija za poboljšanje pouzdanosti mreže jeste smanjenje broja kvarova u mreži. To se obično postiže smanjenjem stopa otkaza elemenata mreže kroz preventivno održavanje [1], [2]. U konkurentnom okruženju, distributivne kompanije se suočavaju sa ograničenim budžetima za održavanje u cilju poboljšanja pouzdanosti sistema [2]. Zbog toga je neophodno sprovesti planiranje preventivnog održavanja koje koristi dostupne podatke i informacije u kompanijama kako bi se minimizirali finansijski rizici.

Različiti pristupi za dobijanje optimalnog plana preventivnog održavanja u distributivnim mrežama predloženi su u literaturi. Sveobuhvatan pregled pristupa za planiranje preventivnog održavanja u distributivnim mrežama može se naći u [1], [2]. Među njima, nekoliko pristupa razmatra planiranje održavanja bazirano na riziku za distributivne vodove [3]–[6]. Većina ovih pristupa ne uzima u obzir neizvesnost u indeksima pouzdanosti, koja nastaje iz mnogih razloga, npr. stope otkaza i trajanja prekida mogu se samo okvirno predvideti u planskom periodu [7], [8], [9]. Pristup predložen u [5] bavi se planiranjem održavanja u prisustvu podsticajnih (nagradnih/kaznenih) šema uzimajući u obzir

neizvesnost u SAIDI. Ova neizvesnost se dobija procenom neizvesnosti u stopama otkaza korišćenjem parametarske statistike. Međutim, pristupi koji koriste takvu procenu neizvesnosti ulaznih podataka (npr. stopa otkaza i vremena prekida) i njihovim propagiranjem procenjuju neizvesnosti u indeksima pouzdanosti putem matematičkih modela obično dovode do značajnih odstupanja između istorijskih i predviđenih verdnosti indeksa pouzdanosti [9]. To, zauzvrat, može dovesti do pogrešnih zaključaka i neefikasnog planiranja održavanja. Pored toga, predloženi pristupi ne razmatraju istovremeno sistemski i lokalno orijentisane indekse pouzdanosti pri definisanju najboljeg plana održavanja, što može dovesti do nerevnomernosti (nepravičnosti) nivoa pouzdanosti u sistemu. Naime, ne treba razmatrati samo ukupne, sistemski orijentisane (prosečne) performanse u pogledu mera pouzdanosti, npr. sistemski orijentisane SAIDI i SAIFI, već i lokalne performanse, npr. lokalno orijentisane SAIFI i SAIDI [10], kako bi se osiguralo da ne postoje korisnici čija je pouzdanost snabdevanja znatno lošija od prosečne. Stoga, kombinovana pouzdanost, koja istovremeno uzima u obzir sistemski i lokalno orijentisanu pouzdanost, treba da bude razmatrana u planiranju održavanja distributivnih vodova.

Ovaj rad predlaže pristup planiranju održavanja distributivnih vodova zasnovan na riziku, kako bi se prevazišli navedeni problemi. On istovremeno razmatra sistemski orijentisane indekse pouzdanosti i lokalno orijentisane indekse kako bi se obezbedila ravnomernost (pravičnost) nivoa pouzdanosti u čitavom sistemu. Predloženi pristup koristi bootstrap metodu i istorijske OMS podatke za procenu neizvesnosti u indeksima pouzdanosti određivanjem njihovih intervala poverenja. Na taj način se dobijaju intervali sistemski i lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti po uzrocima prekida. Ovi intervali se zatim koriste u okviru intervalne TOPSIS tehnike za rangiranje parova (uzrok prekida, vod), u daljem tekstu uzroci prekida, na osnovu intervalnih sistemskih i lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti. TOPSIS je tehnika višekriterijumske optimizacije koja omogućava balansiranje sistemski i lokalno orijentisanih indeksa podešavanjem odgovarajućih težinskih faktora u skladu sa preferencijama donosioca odluke u vezi sa pravičnošću (balansiranjem) nivoa pouzdanosti u sistemu. Klasična TOPSIS tehnika korišćena je u planiranju održavanja distributivnih vodova [11] i prenosnih vodova [12], pri čemu se ne razmatra ni pravičnost nivoa pouzdanosti u sistemu niti neizvesnost ulaznih veličina (npr. indeksa pouzdanosti). Intervalna TOPSIS tehnike koristi Hurvicov kriterijum za merenje rizika kako bi omogućila rangiranje intervala na osnovu sklonosti donosioca odluke prema riziku. Stoga, korišćenjem intervalne TOPSIS tehnike, uzroci prekida se rangiraju pomoću intervalnih indeksa pouzdanosti po uzroku u skladu sa preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika i balansiranja pouzdanosti. Dobijena rang lista uzroka prekida se dodatno procenjuje primenom Pareto principa. Ovaj princip je primenjen u različitim oblastima [13], [14], kao i za planiranje održavanja [15]. On kaže da „približno 20–30 procenata bilo kog resursa utiče na 70–80 procenata aktivnosti povezanih sa tim resursom“, odnosno da 70–80% posledica potiče od 20–30% uzroka. Pareto princip se primenjuje kako bi se odredila lista uzroka koji su odgovorni za većinu prekida u napajanju, tj. Pareto lista uzroka prekida koja će biti razmatrana u analizi koristi i troškova. Za svaki uzrok prekida, odnosno za svaki par (uzrok prekida, vod) u Pareto listi, definišu se preventivne aktivnosti održavanja koje smanjuju uticaj tog uzroka na prekide u napajanju. Zatim se procenjuju trošak i korist svake aktivnosti. Obim smanjenja indeksa pouzdanosti koji se može postići izvođenjem određene aktivnosti

održavanja opisuje korist te aktivnosti. Intervalni faktori efektivnosti se uvode radi kvantifikacije neizvesnosti u pogledu efektivnosti aktivnosti održavanja. Takođe, radi uzimanja u obzir neizvesnosti u proceni troškova, oni se opisuju intervalima. Kao rezultat, aktivnosti održavanja se rangiraju uzimajući u obzir intervalne troškove i intervalne koristi preventivne aktivnosti održavanja, kao i preferencije donosioca odluke u pogledu rizika i balansiranja nivoa pouzdanosti. Rangiranje se vrši korišćenjem intervalne TOPSIS tehnike. Na ovaj način, na najvišem mestu rang liste biće preventivna aktivnost održavanja koja obezbeđuje najbolji odnos između koristi i troškova u skladu sa preferencama donosioca odluke u pogledu rizika, preferencijama u balansiranju nivoa pouzdanosti i preferencijama kompromisa između koristi i troška. Konačno, predlaže se procedura koja koristi rangiranje aktivnosti održavanja da bi se dobio plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom, u slučajevima sa ograničenjem budžeta za održavanje i bez njega.

1 FORMULACIJA PROBLEMA

1.1 Sistemski i lokalno orijentisani indeksi pouzdanosti

Sistemski orijentisani i lokalno orijentisani indeksi pouzdanosti po uzrocima prekida uvode se kako bi se omogućilo balansiranje nivoa pouzdanosti u distributivnom sistemu u planiranju preventivnog održavanja. Ovi indeksi se izračunavaju na sledeći način:

$$\text{SAIFI}^{loc,f,c} = \frac{\sum_{i_c} N_{i_c,f}}{N_f}, \qquad f \in NF, c \in NC \tag{1}$$

$$\text{SAIDI}^{loc,f,c} = \frac{\sum_{i_c} r_{i_c,f} \cdot N_{i_c,f}}{N_f}, \quad f \in NF, c \in NC \tag{2}$$

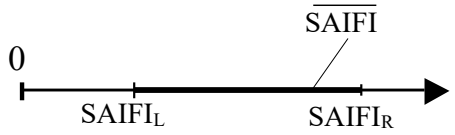
$$\text{SAIFI}^{sys,f,c} = \frac{\sum_{i_c} N_{i_c,f}}{N_{sys}} = \text{SAIFI}^{loc,f,c} \cdot \frac{N_f}{N_{sys}}, f \in NF, c \in NC \tag{3}$$

$$\text{SAIDI}^{sys,f,c} = \frac{\sum_{i_c} r_{i_c,f} \cdot N_{i_c,f}}{N_{sys}} = \text{SAIDI}^{loc,f,c} \cdot \frac{N_f}{N_{sys}}, f \in NF, c \in NC, \tag{4}$$

gde $N_{i_c,f}$ predstavlja broj korisnika pogođenih incidentom (i) usled uzroka prekida (c) na vodu (f), $r_{i_c,f}$ je trajanje prekida kod incidenta (i) usled uzroka (c) na vodu (f), N_f je ukupan broj korisnika na vodu (f), N_{sys} je ukupan broj korisnika u distributivnom sistemu, NF je skup vodova, a NC je skup uzroka. Jednačine (1) i (2) opisuju lokalno orijentisanu pouzdanost merenu indeksima SAIFI i SAIDI po vodu, izračunatu po uzrocima prekida korišćenjem broja korisnika po vodu. Jednačine (3) i (4) opisuju sistemski orijentisane indekse pouzdanosti, tj. doprinos voda ukupnoj pouzdanosti sistema. Na primer, vod sa malim brojem kupaca i visokim $\text{SAIFI}^{loc,f}$ u poređenju sa drugim vodovima može imati mali doprinos sistemskoj pouzdanosti ($\text{SAIFI}^{sys,f}$). Zbog toga, ukoliko se u planiranju preventivnog održavanja razmatra samo sistemski orijentisana pouzdanost, može doći do povećanja nekonzistentnosti (nepravičnosti) nivoa pouzdanosti u sistemu. Slično se dešava i ako se razmatra isključivo lokalno orijentisana pouzdanost. Stoga, sistemski i lokalno orijentisani indeksi pouzdanosti treba da se razmatraju istovremeno u planiranju preventivnog održavanja. Istovremenim razmatranjem indeksa pouzdanosti (1)–(4), donosilac odluke može izabrati plan preventivnog održavanja koji obezbeđuje najbolji kompromis (balans) između sistemski i lokalno orijentisane pouzdanosti, čime se osigurava da nijedan korisnik nema pouzdanost koja je znatno lošija od prosečne. Treba naglasiti da se bilo koji drugi indeksi pouzdanosti, koji se koriste u distributivnim sistemima, takođe mogu razmatrati zajedno sa indeksima SAIFI i SAIDI.

1.2 Modelovanje neizvesnosti indeksa pouzdanosti

Neizvesnost indeksa pouzdanosti, koja nastaje iz mnogih razloga [7]–[9], ovde se procenjuje korišćenjem bootstrap metode [9], [16] i istorijskih OMS podataka. Stoga se, umesto jedne precizne vrednosti, indeksi pouzdanosti opisuju intervalima, kao što je prikazano na slici 1 za SAIFI.



Slika 1 Intervalna predstava indeksa SAIFI

Intervalni sistemski i lokalno orijentisani indeksi pouzdanosti po uzrocima prekida ovde se opisuju u terminima intervalne aritmetike zasnovane na meri relativne udaljenosti (RDM) [17] na sledeći način:

$$\overline{\text{SAIFI}}^{loc(sys),f,c} = \text{SAIFI}_L^{loc(sys),f,c} + \alpha_{SF} \cdot \left(\text{SAIFI}_R^{loc(sys),f,c} - \text{SAIFI}_L^{loc(sys),f,c}\right),\ \alpha_{SF} \in [0,1] \quad (5)$$

$$\overline{\text{SAIDI}}^{loc(sys),f,c} = \text{SAIDI}_L^{loc(sys),f,c} + \alpha_{SD} \left(\text{SAIDI}_R^{loc(sys),f,c} - \text{SAIDI}_L^{loc(sys),f,c}\right), \alpha_{SD} \in [0,1] \quad (6)$$

Treba napomenuti da se promenom vrednosti α_{SF} i α_{SD} u jednačinama (5) i (6) u opsegu [0,1] mogu dobiti sve moguće vrednosti razmatranih indeksa. Posebno treba naglasiti da aritmetičke operacije nad intervalnim brojevima definisanim RDM aritmetikom, opisanim u [17], obezbeđuju da rezultati aritmetičkih operacija ne dovode do previše pesimističkih rezultata (precenjenih intervala).

Postupak za dobijanje intervala indeksa pouzdanosti korišćenjem bootstrap metode je sledeći:

1. Dobiti uzorak veličine T za indekse pouzdanosti (1)–(4) iz istorijskih OMS podataka. Treba napomenuti da je veličina uzorka T istorijskih indeksa pouzdanosti obično ograničena na deset godina zbog faktora kao što su promene topologije voda i porast broja korisnika [9], [18].
2. Iz originalnog uzorka generisati novi uzorak veličine T sa vraćanjem, za svaki od posmatranih indeksa pouzdanosti.
3. Za svaki uzorak iz koraka 2 izračunati srednju vrednost.
4. Ponoviti korake 2–3 ukupno NS puta, gde je NS broj uzoraka.
5. Rangirati srednje vrednosti iz koraka 3 po opadajućem redosledu.
6. Dobijanje intervala poverenja (CI) za svaki indeks pouzdanosti vrši se na sledeći način [16]. Prvo se pronalazi srednji CI uzorka intervala. Za to je potrebno pronaći srednje vrednosti na percentilima $(100 - \text{CI})/2$ i $\text{CI} + (100 - \text{CI})/2)$. Percentil $(100 - \text{CI})/2)$, tj. leva granica intervala, nalaziće se na poziciji $(\text{NS} + 1) \cdot (100 - \text{CI})/2 \cdot 100$ u rang listi. Percentil $\left(\text{CI} + (100 - \text{CI})/2\right)$, tj. desna granica intervala, nalaziće se na poziciji $(\text{CI}/100 + (100 - \text{CI})/2 \cdot 100) \cdot (\text{NS} + 1))$. Na primer, za interval poverenja od 95%, leva granica intervala biće na poziciji $0.025 \cdot (\text{NS} + 1)$, a desna granica na poziciji $0.975 \cdot (\text{NS} + 1)$.
7. Ponoviti korake 1–6 za svaki uzrok prekida (c) na vodu (f).
8. Ponoviti korake 1–7 za svaki razmatrani vod.

Na opisani način se dobijaju intervalne vrednosti sistemski i lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti po uzrocima prekida.

1.3 Koristi i troškovi preventivnih aktivnosti i planova održavanja

Preventivno održavanje može poboljšati pouzdanost smanjenjem uticaja uzroka prekida na prekide u napajanju. Na primer, prekidi izazvani vegetacijom mogu se smanjiti (otkloniti) orezivanjem rastinja koje okružuje elektroenergetske vodove. Faktor efektivnosti koristi se za kvantifikovanje efektivnosti aktivnosti održavanja [15]. On opisuje efektivnost aktivnosti održavanja u sprečavanju prekida napajanja usled posmatranog uzroka. Faktori efektivnosti se opisuju intervalima, koji se mogu dobiti analizom istorijskih OMS zapisa, zapisa o održavanju, istraživanja na terenu i stručne procene. Na osnovu toga, poređenje stanja pre i posle izvođenja svake aktivnosti korišćenjem statističkih analiza, npr. bootstrap metode, može se primeniti za procenu neizvesnosti efektivnosti aktivnosti održavanja. Stoga se koristi od preventivnih aktivnosti održavanja koje odgovaraju posmatranom uzroku mogu opisati na sledeći način:

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{loc,f,m} = \overline{\mathrm{k}}^{m,c,f} \cdot \overline{\mathrm{SAIFI}}^{loc,f,c} \quad m \in NM \tag{7}$$

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{loc,f,m} = \overline{\mathrm{k}}^{m,c,f} \cdot \overline{\mathrm{SAIDI}}^{loc,f,c} \quad m \in NM \tag{8}$$

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{sys,f,m} = \overline{\mathrm{k}}^{m,c,f} \cdot \overline{\mathrm{SAIFI}}^{sys,f,c} \quad m \in NM \tag{9}$$

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{sys,f,m} = \overline{\mathrm{k}}^{m,c,f} \cdot \overline{\mathrm{SAIDI}}^{sys,f,c}, \; m \in NM, \tag{10}$$

gde NM predstavlja skup aktivnosti održavanja, $\Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{loc,f,m}$ ($\Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{loc,f,m}$) označava intervalnu korist aktivnosti održavanja (m) u smanjenju lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti po uzroku prekida (c) na vodu (f), dok $\Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{sys,f,m}$ ($\Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{sys,f,m}$ označava istu takvu korist, ali za sistemski orijentisane indekse. Ovde $\overline{\mathrm{k}}^{m,c,f}$ predstavlja intervalnu efektivnost aktivnosti održavanja (m) u sprečavanju prekida napajanja zbog uzroka (c) na vodu (f). Množenje intervalnih brojeva u (7)–(10) u terminima RDM aritmetike opisano je u [17], [19]. Intervalne koristi plana preventivnog održavanja (p), koji obuhvata više od jedne preventivne aktivnosti održavanja, mogu opisati na sledeći način:

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{loc,p} = \sum_{m\in NM(p)} \Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{loc,f,m} \tag{11}$$

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{loc,p} = \sum_{m\in NM(p)} \Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{loc,f,m} \tag{12}$$

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{sys,p} = \sum_{m\in NM(p)} \Delta\overline{\mathrm{SAIFI}}^{sys,f,m} \tag{13}$$

$$\Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{sys,p} = \sum_{m\in NM(p)} \Delta\overline{\mathrm{SAIDI}}^{sys,f,m} \tag{14}$$

gde NM(p) predstavlja skup aktivnosti održavanja, tj. parova (aktivnost održavanja, vod), koje će biti izvedene u planu održavanja (p).

Za svaki uzrok, jedinični trošak po kilometru preventivnih aktivnosti održavanja, koji uključuje procenjeno trajanje (radne sate) i trošak materijala (opreme), može se proceniti iz istorijskih zapisa o troškovima održavanja [4], [15]. Troškovi se opisuju intervalima kako bi se uzela u obzir neizvesnost u proceni troškova. Ovi intervali se mogu dobiti iz istorijskih podataka na sličan način kao intervali faktora efektivnosti održavanja. Stoga se intervalni troškovi preventivnih aktivnosti održavanja na vodu (f), $\overline{\mathrm{CPM}}^{m,f}$, mogu proceniti na sledeći način:

$$\overline{\mathrm{CPM}}^{m,f} = \overline{\mathrm{cpm}}^{m,f} \cdot \mathrm{L}_{f,m}, \tag{15}$$

gde $\overline{\mathrm{cpm}}^{m,f}$ predstavlja intervalni jedinični trošak po kilometru preventivne aktivnosti održavanja (m) na vodu (f), a $L_{f,m}$ je dužina voda (f) ili njegovog dela na kome će se

sprovesti aktivnost održavanja (m). Intervalni trošak plana preventivnog održavanja (p), $\overline{\mathrm{CPM}}^{p}$, koji se sastoji od više aktivnosti održavanja, tj. kombinacija (aktivnost održavanja, vod) iz skupa NM(p), opisuje se na sledeći način:

$$\overline{\mathrm{CPM}}^{p} = \sum_{m \epsilon NM(p)} \overline{\mathrm{CPM}}^{m,f}, \quad (16)$$

Prema tome, svaka preventivna aktivnost održavanja (m) ili plan održavanja (p) se opisuje sledećim atributima: intervalnim troškom aktivnosti održavanja (m) ili plana (p), intervalnim koristima u pogledu lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti koje proizilaze iz aktivnosti održavanja (m) ili plana (p), i intervalnim koristima u pogledu sistemski orijentisanih indeksa pouzdanosti koje proizilaze iz aktivnosti održavanja (m) ili plana (p). Ovi intervalni kriterijumi se dodeljuju svakoj preventivnoj aktivnosti održavanja (m) ili planu održavanja (p). Oni se koriste za dobijanje rešenja sa minimalnim rizikom, kao što je opisano u odeljku 1.4.

1.4 Procedura za određivanje plana održavanja sa minimalnim rizikom

Postupak za dobijanje plana preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom, u slučajevima sa ograničenjem budžeta za održavanje i bez njega, opisan je na sledeći način:

1) Odrediti intervalne vrednosti za sistemski i lokalno orijentisane indekse pouzdanosti po uzrocima prekida (1)–(4), kao što je opisano u odeljku 1.2.
2) Odrediti rang listu uzroka prekida, tj. listu parova (uzrok prekida, vod). Da bi se omogućilo rangiranje uzroka prekida prema intervalnim indeksima pouzdanosti iz koraka 1), primenjuje se tehnika višekriterijumskog odlučivanja, pri čemu je svaki indeks poseban kriterijum. Pošto su kriterijumi intervalne vrednosti, rang lista se dobija primenom intervalne TOPSIS tehnike, opisane u [20]. Ona omogućava balansiranje sistemski i lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti podešavanjem odgovarajućih težinskih faktora u skladu sa preferencijama donosioca odluke u vezi sa konzistentnošću (pravičnošću) nivoa pouzdanosti u sistemu. Takođe koristi Hurvicov kriterijum za merenje rizika kako bi se omogućilo rangiranje intervala (intervalno vrednovanih) indeksa pouzdanosti na osnovu sklonosti donosioca odluke prema riziku, kao što je opisano u [21]. Na ovaj način, na najvišim mestima liste biće uzroci sa najvećim doprinosom prekidima napajanja u skladu sa usvojenim preferencama rizika i balansiranja nivoa pouzdanosti.
3) Definisati Pareto Listu uzroka prekida na osnovu liste iz koraka 2) primenom Pareto principa, koji navodi da približno 20–30% uzroka dovodi do 80–70% posledica. Na taj način dobija se lista uzroka prekida (Pareto Lista) , npr. 20–30% uzroka, koji su odgovorni za većinu (npr. 70–80%) prekida u napajanju, mereno sistemski i lokalno orijentisanim indeksima pouzdanosti.
4) Za uzrok prekida (c) na vodu (f) iz Pareto Liste definiše se preventivna aktivnost održavanja (m) koja smanjuje uticaj tog uzroka na prekide u napajanju. Proceni se intervalna vrednost faktora efektivnosti za svaku preventivnu aktivnost održavanja (m), kao što je opisano u odeljku 1.3.
5) Definisati intervalne koristi preventivne aktivnosti održavanja (m), kao što je opisano u (7)–(10).
6) Ponoviti korake 4) i 5) dok se ne obrade svi uzroci prekida iz Pareto Liste. Na ovaj način dobija se Lista Održavanja, koja se sastoji od parova (aktivnost održavanja, vod).

7) Koristiti intervalnu TOPSIS tehnike za rangiranje parova (aktivnost održavanja, vod), u daljem tekstu preventivne aktivnosti održavanja, iz Liste Održavanja, uzimajući u obzir njihove intervalne koristi i troškove. Ovde se preventivne aktivnosti održavanja rangiraju prema sledećim kriterijumima: $\Delta\overline{\text{SAIFI}}^{loc,f,m}$, $\Delta\overline{\text{SAIDI}}^{loc,f,m}$, $\Delta\overline{\text{SAIFI}}^{sys,f,m}$, $\Delta\overline{\text{SAIDI}}^{sys,f,m}$, i $\overline{\text{CPM}}^{m,f}$. Rangiranje se vrši u skladu sa preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, preferencijama u balansiranju nivoa pouzdanosti i preferencijama kompromisa između troškova i koristi preventivnih aktivnosti održavanjan. Na ovaj način dobija se Rangirana Lista Održavanja.
8) Da bi se dobio plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom i odgovarajući interval budžeta, u skladu sa preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, preferencijama u balansiranju nivoa pouzdanosti i preferencijama kompromisa između koristi i troškova, prelazi na korak 9). Da bi se dobio plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom koji zadovoljava poznato (nametnuto) budžetsko ograničenje, prelazi se na korak 10).
9) Plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom dobija se na sledeći način:
   9.1. Formirati skup planova preventivnog održavanja na sledeći način.
      9.1.1. Prvi plan se sastoji od preventivne aktivnosti održavanja koja se nalazi na najvišoj poziciji Rangirane Liste Održavanja.
      9.1.2. Drugi plan obuhvata aktivnosti održavanja iz prvog plana i novu aktivnost održavanja. Ona se bira na sledeći način. Ukloniti aktivnosti održavanja koje postoje u prvom planu iz Liste Održavanja. Dobiti novu Rangiranu Listu Održavanja, kao što je opisano u koraku 7), i izabrati aktivnost održavanja na prvoj poziciji. Ova aktivnost, zajedno sa aktivnošću iz prvog plana, čini drugi plan.
      9.1.3. Treći plan obuhvata aktivnosti održavanja iz drugog plana i novu aktivnost održavanja. Ona se bira na sledeći način. Ukloniti aktivnosti održavanja koje postoje u drugom planu iz Liste Održavanja. Dobiti novu Rangiranu Listu Održavanja, kao što je opisano u koraku 7), i izabrati aktivnost održavanja na prvoj poziciji. Ova aktivnost, zajedno sa aktivnostima iz drugog plana, čini treći plan.
      9.1.4. Generisati ostale planove korišćenjem procedure opisane u koracima 9.1.1)–9.1.3). Na ovaj način mogu se kreirati različiti planovi čiji broj može biti jednak broju aktivnosti održavanja u Listi Održavanja.
   9.2. Planovi preventivnog održavanja iz koraka 9.1) rangiraju se uzimajući u obzir njihove ukupne intervalne troškove i koristi, dobijene na način opisan u odeljku 1.3. Rangiranje se vrši primenom intervalneTOPSIS tehnike, u skladu sa preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, preferencijama u balansiranju pouzdanosti i preferencijama kompromisa između troškova i koristi preventivnih aktivnosti održavanja. Plan održavanja koji zauzme najvišu poziciju na rang listi predstavlja rešenje sa minimalnim rizikom.
10) Plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom za poznati (nametnuti) budžet dobija se na sledeći način:
   10.1. Ako je razmatrano budžetsko ograničenje veće od ukupnog intervalnog troška plana održavanja sa minimalnim rizikom dobijenog u koraku 9), merenog Hurvicovim kriterijumom i usvojenim preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, tada

plan održavanja sa minimalnim rizikom dobijen u koraku 9) predstavlja plan preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom za zadati budžet. U tom slučaju se prelazi preći na korak 11. U suprotnom se primenjuje sledeća procedura.

10.2. Iz Rangirane Liste Održavanja izabrati najviše rangiranu preventivnu aktivnost održavanja. Izračunati kumulativni intervalni trošak uzimajući u obzir ovu aktivnost i aktivnosti iz skupa SPM, koji je u inicijalnoj iteraciji prazan skup. Ako je taj trošak jednak ili manji od budžetskog ograničenja, merenog usvojenim preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, dodati aktivnost u skup SPM i ukloniti je iz Liste Održavanja. U suprotnom, preći na korak 10.4).

10.3. Ponoviti korak 7) uzimajući u obzir Listu Održavanja iz koraka 10.2) kako bi se dobila nova Rangirana Lista Održavanja. Zatim preći na korak 10.2).

10.4. Preventivne aktivnosti održavanja iz skupa SPM predstavljaju plan održavanja sa minimalnim rizikom za nametnuti budžet. Preći na korak 11).

11) Kraj procedure.

Treba naglasiti da predložena procedura može da se primenjuje i u slučaju kada se drugi indeksi pouzdanosti razmatraju istovremeno sa SAIFI i SAIDI.

2 PRIMER PRIMENE

Predloženi pristup zasnovan na riziku primenjen je na studije slučaja kompanije Ellevio, elektrodistributivne kompanije u Švedskoj koja snabdeva oko 1 milion kupaca putem oko 3000 srednjenaponskih vodova. Analize su sprovedene nad podacima iz perioda od 2018. do 2022. godine, dobijenim iz Ellevio OMS sistema [22]. Intervali sistemski i lokalno orijentisanih SAIFI i SAIDI vrednosti dobijeni su korišćenjem bootstrap metode, kao što je opisano u odeljku 1.2. Ovde je u okviru bootstrap metode izvršeno 1000 uzorkovanja uz interval poverenja od 95% kako bi se dobili intervali indeksa pouzdanosti. Deterministične (crisp) vrednosti iz perioda 2018–2022. i dobijeni intervali lokalno orijentisanih SAIFI i SAIDI vrednosti za jedan vod, usled prekida izazvanih kvarom opreme, prikazani su u Tabeli 1. Na osnovu izračunatih intervala, sprovodi se procedura opisana u koracima 1)–3) u odeljku 1.4 kako bi se dobila (Pareto) lista indeksa pouzdanosti po uzrocima prekida primenom Pareto principa. Ovde se primenjuje intervalni TOPSIS, a koristi se Hurvicov kriterijum da bi se opisao donosilac odluke koji nije sklon prema riziku (pesimista) u procesu rangiranja. Razmatraju se identični težinski faktori za sistemski i lokalno orijentisane

Tabela 1. Primer bootstrap intervala.

	2018	2019	2020	2021	2022	Interval
$SAIFI^{loc}$ [br. prk.]	1	1	4	0	3	[0.75, 3.25]
$\mathrm{SAIDI}^{loc}[h]$	1.25	0.63	7.1	0	5.6	[0.315, 6.35]

Table 2. Poređenje različitih pristupa.

Pristup	SAIFI_R^{sys}[br. prk.]	SAIDI_R^{sys}[h]
Sistemski	0.38	1.04
Localni	0.24	0.85
Kombinovani	0.33	0.96

indekse pouzdanosti kako bi se obezbedila konzistentnost (pravičnost) nivoa pouzdanosti u čitavom sistemu. Tabela 2 prikazuje rezultate za 300 najviše rangiranih uzroka, tj. kombinacija (uzrok prekida, vod) kada se koriste različiti pristupi. Prikazane su ukupne vrednosti desne granice sistemski orijentisanih indeksa pouzdanosti za 300 najviše rangiranih uzroka u sledećim slučajevima: kada se u procesu rangiranja razmatraju samo sistemski orijentisani indeksi, kada se razmatraju samo lokalno orijentisani indeksi, kada se sistemski i lokalno orijentisani indeksi razmatraju istovremeno, korišćenjem identičnih vrednosti težinskih faktora. Rezultati pokazuju da istovremeno razmatranje sistemski i lokalno orijentisanih indeksa pouzdanosti može poboljšati balansiranje nivoa pouzdanosti u čitavom sistemu. Drugim rečima, kombinovani pristup ne favorizuje ni uzroke koji utiču na sistemski orijentisane indekse pouzdanosti, niti one koji utiču na lokalno orijentisane indekse, već uzroke koji utiču na oba tipa indeksa u skladu sa usvojenim težinskim faktorima. Opisani proces rangiranja dovodi do liste koja sadrži 2920 kombinacija (uzrok prekida, vod), što predstavlja oko 30% ukupnog broja razmatranih kombinacija. Sistemski i lokalno orijentisani indeksi pouzdanosti za te kombinacije predstavljaju više od 70% ukupnih sistemskih i lokalnih indeksa pouzdanosti. Pareto Lista obuhvata sledeće uzroke: kvar opreme, kontakt sa vegetacijom i vremenske uticaje (izloženost ledu i/ili vetru i naglom oslobađanje snega). Stoga se studija fokusira na preventivne aktivnosti održavanja koje smanjuju uticaj uzroka prekida iz Pareto Liste na prekide u napajanju. Shodno tome, u studiji su izabrane sledeće aktivnosti: inspekcija i održavanje zasnovano na stanju opereme, orezivanje rastinja oko elektroenergetskih vodova i ugradnja faznih distancera. Intervalni faktori efektivnosti, opisani u odeljku 1.3, za preventivne aktivnosti održavanja (m) koje sprečavaju prekide u napajanju usled kvara opreme, kontakta sa vegetacijom i vremenskih uticaja su sledeći: $\bar{k}^{m,oprema,f} = [0.3, 0.4]$, $\bar{k}^{m,drvo,f} = [0.4., 0.6]$, i $\bar{k}^{m,vreme,f} = [0.3, 0.5]$, respektivno. Intervalni trošak po kilometru voda za inspekciju i održavanje zasnovano na stanju iznosi $\overline{cpm}^{f,oprema,inspekcija} = [180, 230]$€. Intervalni jedinični troškovi orezivanja rastinja i ugradnje faznih distancera su $\overline{cpm}^{f,drvo,sečenje} = [200, 250]$€ i $\overline{cpm}^{f,vreme,distancer} = [190, 270]$€, respektivno. Na osnovu dobijene Pareto Liste i prethodno definisanih parametara, Lista Održavanja se formira prema koracima 2)–6) procedure predstavljenoj u odeljku 1.4. Rangiranje preventivnih aktivnosti održavanja u Listi Održavanja vrši se korišćenjem intervalnog TOPSIS-a, u skladu sa preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, preferencijama balansiranja pouzdanosti i preferencijama kompromisa između troškova i koristi preventivnih aktivnosti održavanja, kao što je opisano u koraku 7) procedure iz odeljka 1.4.

Plan održavanja sa minimalnim rizikom u slučaju neograničenog budžeta dobija se primenom postupka opisanog u koraku 9) u odeljku 1.4. Rezultati su prikazani u Tabeli 3.

Tabela 3. Planovi održavanja bez ograničenja budžeta.

Dobiti & Trošak	P1	P2	P3	P4
$\Delta\overline{SAIFI}^{loc}$ [br. prk.]	[8.34, 207.22]	[7.95, 330.7]	[13.3, 368.7]	[7.95, 311.7]
$\Delta\overline{SAIDI}^{loc}$ [h]	[13.39, 1207.9]	[11.5, 1490]	[19.7, 1683.3]	[11.5, 1455]
$\Delta\overline{SAIFI}^{sys}$[br. prk.]	[0.00135, 0.041]	[0.00126, 0.115]	[0.004, 0.075]	[0.00126, 0.113]
$\Delta\overline{SAIDI}^{sys}$[h]	[0.0024, 0.197]	[0.0024, 0.53]	[0.005, 0.33]	[0.0025, 0.52]
$\overline{CPM}$ [k€]	[118.5, 150.1]	[122.7, 155.3]	[235.2, 297.2]	[121.1, 153.2]

Ovde P1 opisuje plan održavanja sa minimalnim rizikom koji je definisao donosilac odluke sklon izbegavanju rizika (pesimista) i koji jednako vrednuje sistemsku pouzdanost i lokalnu pouzdanost, kao i koristi i troškove. Plan P1 se sastoji od 82 aktivnosti održavanja. Među njima, devet (9) aktivnosti održavanja su inspekcije i održavanje zasnovano na stanju, devet (9) aktivnosti su ugradnja faznih distancera, a ostale aktivnosti se odnose na orezivanje rastinja. Plan održavanja P2 se dobija kada je donosilac odluke sklon riziku (optimista). U ovom planu postoji 106 aktivnosti održavanja: 23 inspekcije i održavanja zasnovana na stanju, 15 ugradnji faznih distancera, a ostalo se odnosi na orezivanje drveća. Treba naglasiti da se većina parova (aktivnost održavanja, vod) u P1 i P2 razlikuje, tj. aktivnosti održavanja se izvode na različitim vodovima. Planovi P1 i P2 naglašavaju uticaj sklonosti ka riziku donosilaca odluka na izbor plana održavanja sa minimalnim rizikom. Treba primetiti da dobijeni rezultati pokazuju da optimistični (riziku skloni) donosilac odluka očekuje niže troškove održavanja (troškove bliže levim krajevima njihovih intervala) i, istovremeno, veće koristi (vrednosti koristi bliže desnim krajevima njihovih intervala). S druge strane, pesimistični (riziku neskloni) donosilac odluka očekuje više troškove održavanja (troškove bliže desnim krajevima njihovih intervala) i manje koristi (vrednosti koristi bliže levim krajevima njihovih intervala).

Dalje se razmatra plan P3, koji je dobijen od strane donosioca odluke sklonog izbegavanju rizika, a koji više vrednuje poboljšanje indeksa pouzdanosti (koristi) nego troškove. Ovaj plan sadrži 132 aktivnosti održavanja: 16 inspekcija i održavanja zasnovanog na stanju, 13 ugradnji faznih distancera, a ostale aktivnosti odnose se na orezivanje drveća. Planovi P1 i P3 pokazuju uticaj preferencija u pogledu kompromisa između troškova i koristi na izbor najboljeg plana održavanja.

Plan P4 se dobija zanemarivanjem neizvesnosti u ulaznim veličinama. Naime, umesto intervala, ulazne veličine se opisuju njihovim srednjim (očekivanim) vrednostima. Shodno tome, koriste se srednje vrednosti posmatranih indeksa pouzdanosti zajedno sa srednjim vrednostima troškova aktivnosti održavanja i njihovih faktora efektivnosti. U ovom slučaju primenjuje se klasična TOPSIS tehnika, [15], [16], u postupku opisanom u odeljku 1.4. Preferencije izbalansiranosti pouzdanosti i odnos koristi/troškova korišćeni u P1 primenjuju se i u klasičnom TOPSIS-u. Na ovaj način se dobija plan P5 koji se sastoji od 94 aktivnosti održavanja: 20 inspekcija i održavanja zasnovanog na stanju, 10 ugradnji faznih distancera, a ostalo se odnosi na orezivanje drveća. Ako se ovaj plan primeni i pritom uzme u obzir neizvesnost ulaznih veličina, dobijaju se intervalne vrednosti ukupnih koristi i troškova prikazane u Tabeli 5. Prema donosocu odluke sklonom izbegavanju rizika i donosocu odluke sklonom riziku, koji koriste preferencije u pogledu rizika, izbalansiranosti pouzdanosti i odnosa koristi/troškova kao u slučajevima P1 i P2, planovi P1 i P2 su bolji od P5. Dakle, P5 ne predstavlja rešenje sa minimalnim rizikom ni za pesimističnog ni za optimističnog donosioca odluka. Ovaj rezultat ukazuje na značaj razmatranja neizvesnosti ulaznih parametara u planiranju održavanja distributivnih vodova.

Na kraju se razmatra dobijanje plana održavanja sa minimalnim rizikom u slučaju ograničenog budžeta. Pretpostavlja se budžetsko ograničenje od 100000 €. Plan održavanja sa minimalnim rizikom u slučaju ograničenog budžeta dobija se primenom postupka opisanog u koraku 10) u odeljku 1.4. Rezultati su prikazani u Tabeli 4. Ovde se plan PB1 dobija korišćenjem istih preferencija u pogledu rizika, izbalansiranosti pouzdanosti i odnosa koristi/troškova kao u planu P1 u Tabeli 3. PB1 sadrži 56 aktivnosti održavanja: 5 inspekcija i održavanja zasnovanog na stanju, 4 ugradnje faznih distancera, a ostalo je orezivanje drveća. Plan održavanja PB2 se dobija na isti način kao PB1, ali korišćenjem pristupa sklonog riziku (optimističnog), tj. korišćenjem preferencija u pogledu rizika, izbalansiranosti pouzdanosti i odnosa koristi/troškova kao u P2 u Tabeli 3. U ovom planu postoji 36

Tabela 4. Planovi održavanja sa ograničenim budžetom

Dobit & Trošak	PB1	PB2
$\Delta\overline{\text{SAIFI}}^{loc}$[br. prk.]	[7.28, 143.7]	[4.88, 175.2]
$\Delta\overline{\text{SAIDI}}^{loc}$[h]	[12.4, 1006]	[6.38, 1061.5]
$\Delta\overline{\text{SAIFI}}^{sys}$[br.prk.]	[0.0022, 0.021]	[0.001, 0.084]
$\Delta\overline{\text{SAIDI}}^{sys}$[h]	[0.0026, 0.14]	[0.0011, 0.42]
$\overline{\text{CPM}}$ [k€]	[80.75, 102.05]	[94.78, 119.5]

aktivnosti održavanja: 2 inspekcije i održavanja zasnovanog na stanju, 3 ugradnje faznih distancera, a ostalo je orezivanje drveća. Rezultati ukazuju na uticaj sklonosti donosilaca odluka prema riziku na izbor plana održavanja sa minimalnim rizikom kada se uzme u obzir budžetsko ograničenje

3 ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja pristup zasnovan na riziku za planiranje održavanja vodova u distributivnim kompanijama u prisustvu neizvesnosti indeksa pouzdanosti. Kako bi se obezbedila konzistentnost (pravičnost) pouzdanosti u okviru sistema, pristup istovremeno razmatra sistemski i lokalno orijentisane indekse pouzdanosti po uzroku prekida. Neizvesnost indeksa pouzdanosti po uzrocima prekida opisana je intervalima dobijenim iz istorijskih OMS podataka korišćenjem bootstrap metode. Pareto princip i intervalna TOPSIS tehnika koriste se za dobijanje Pareto liste uzroka prekida i pripadajućih aktivnosti održavanja, zajedno sa njihovim intervalnim koristima i troškovima, koji se razmatraju u analizi koristi i troškova. Ova analiza se sprovodi intervalnom TOPSIS tehnikom kako bi se aktivnosti održavanja rangirale u skladu sa preferencijama donosioca odluke u pogledu rizika, preferencijama u pogledu balansiranja pouzdanosti i preferencijama u pogledu kompromisa između koristi i troškova. Takve rang liste koriste se u okviru predložene procedure za dobijanje plana preventivnog održavanja sa minimalnim rizikom, u slučajevima sa i bez budžetskih ograničenja za održavanje. Predstavljeni numerički rezultati pokazuju da predloženi pristup ima potencijal da bude efikasan alat za dobijanje rešenja sa minimalnim rizikom u planiranju preventivnog održavanja distributivnih vodova u realnim distributivnim mrežama.

LITERATURA

[1] M. S. Alvarez-Alvarado, D. L. Donaldson, A. A. Recalde, H. H. Noriega, Z. A. Khan, W. Velasquez, C. D. Rodriguez-Gallegos, „Power System Reliability and Maintenance Evolution: A Critical Review and Future Perspectives“, *IEEE Access*, 10, 2022, 51922-51950.

[2] M. Mirhosseini, F. Keynia, „Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review“, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 15, 2021, 2287-2297.

[3] Y. Li, S. Yeddanapudi, J. D. McCalley, A. A. Chowdhury, W. Jewell, „Resource Management for Distribution System Maintenance Using Optimized Risk Reduction“, 2006 PMAPS, Stockholm, 2006, 1-6., *in Conference Proceedings*.

[4] A. D. Janjic, D. S. Popovic, „Selective Maintenance Schedule of Distribution Networks Based on Risk Management Approach“, *IEEE Trans. Power Syst*,, 22, 2007, 597-604.

[5] A. Moradkhani, M. R. Haghifam, S. M. Abedi, „Risk-based maintenance scheduling in the presence of reward penalty scheme“, *Electr. Power Syst. Res.*, 121, 2015, 126–133.

[6] T. Dokic, M. Kezunovic, „Predictive Risk Management for Dynamic Tree Trimming Scheduling for Distribution Networks“, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, 2019, 4776-4785.

[7] J. Nahman, D. Peric, „Distribution system performance evaluation accounting for data uncertainty“, *IEEE Trans. Power Del*., 18, 2003, 694–700.

[8] P. Zhang, W. Li, „Boundary analysis of distribution reliability and economic assessment“, *IEEE Trans. Power Syst*., 25, 2010, 714–721.

[9] B. Rodrigues, M. d. G. da Silva, „Confidence Intervals Estimation for Reliability Data of Power Distribution Equipments Using Bootstrap“, *IEEE Trans. Power Syst*., 28, 2013, 3283-3291.

[10] H.L. Willis, „Power Distribution Planning Reference Book“, Marcel Dekker Inc, 2004, 1242.

[11] K. Chaengakson, D. Rerkpreedapong, K. Hongesombut, „Reliability Improvement Opportunity for 115-kV Overhead Transmission Lines Using RCM Method“, IEEE PES GTD (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, 808-812, *in Conference Proceedings*.

[12] S. Bahrami, M. Rastegar, P. Dehghanian, „An FBWM-TOPSIS Approach to Identify Critical Feeders for Reliability Centered Maintenance in Power Distribution Systems“, *IEEE Syst. J.*, 15, 2021, 3893-3901.

[13] R. Koch, „The 80/20 Principle: The secret to achieving more with less“, Nicholas Brealey Publishing, 2017, 413.

[14] S. K. E. Awadallah, J. V. Milanović, P. N. Jarman, „Reliability Based Framework for Cost-Effective Replacement of Power Transmission Equipment“, *IEEE Trans. Power Syst*., 29, 2014, 2549-2557.

[15] N.Teera-achariyakul, D.Rerkpreedapong, „Optimal Preventive Maintenance Planning for Electric Power Distribution Systems Using Failure Rates and Game Theory“, *Energies*, 15(5172), 2022.

[16] K. M. Ramachandran, C. P. Tsokos, „Mathematical Statistics with Applications in R“, Academic Press, 2020, 803.

[17] A. Piegat, M. Landowski, „Is an interval the right result of arithmetic operations on intervals?“, *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*., 27, 2017, 575–590.
[18] R. E. Brown, M. V. Engel, J. H. Spare, „Making sense of worst-performing feeders“, *IEEE Trans. Power Syst*., 20, 2005, 1173–1178.
[19] Z. N. Popovic, S. D. Knezevic, B. S. Brbaklic, „A Risk Management Procedure for Island Partitioning of Automated Radial Distribution Networks with Distributed Generators“, *IEEE Trans. Power Syst*., 35, 2020, 3895-3905.
[20] Z. N. Popovic, N. V. Kovacki, M. Z. Obrenic, P. M. Vidovic, „Risk-Based Multi-Objective Approach for Improving Fairness of PV Curtailment in Low-Voltage Distribution Networks“, *Electricity*, 6(4), 2025.
[21] Z. N. Popovic, S. D. Knezevic, „Dynamic Reconfiguration of Distribution Networks Considering Hosting Capacity: A Risk-Based Approach“, *IEEE Trans. Power Syst*., 38, 2023, 3440-3450.
[22] Outage Management System. Schneider Electric LCC, Novi Sad, Serbia, dostupno na: https://www.se.com/ww/en/work/solutions/for-business/electric-utilities/outage-management-system-oms; pristupljeno: 2026-03-03.