

POUZDANOST SLOŽENIH VODOVODNIH SISTEMA NA PRIMERU RVS DUBOVAC-ZRENJANIN-KIKINDA*

Nenad RADIĆ*, Dušan ĐURIĆ*, Nenad MILENKOVIĆ*,
Milica MILOVANOVIĆ*, Tina DAŠIĆ**

* Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi"

** Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Vodovodni (distributivni) sistemi imaju jednu specifičnost koja ih, sa gledišta pouzdanosti, čini složenijim od drugih sistema. Da bi sistem uspešno obavljao svoju funkciju pored pouzdanosti mehaničkih karakteristika sistema uzima se u obzir i pouzdanost hidrauličkih parametara sistema. U ovom radu se na primeru regionalnog vodovodnog sistema Dubovac-Zrenjanin-Kikinda koji se bazira na konceptu centralizovanog vodosnabdevanja dovođenjem vode sa regionalnog izvorišta, preko PPV i dalje regionalnim cevovodima distribuira do opštinskih centara razmatra problem određivanja pouzdanosti vodovodnog sistema.

Ključne reči: pouzdanost, regionalni sistemi, pouzdanost zadovoljenja mehaničkih i hidrauličkih parametara.

1. UVOD

Distributivni vodovodni sistemi predstavljaju skup međusobno povezanih elemenata (cevovodi, pumpe, zatvarači, rezervoari, itd.) čija je funkcija obezbeđivanje zahtevanih količina vode korisnicima sistema uz zadovoljenje zahtevanih minimalnih pritisaka. Analiza pouzdanosti isporuke vode korisnicima distributivnih sistema, iako veoma značajna, u projektima ovakvog tipa se skoro uopšte ili vrlo oskudno razmatra. Jedan od razloga leži u činjenici da pouzdanost zavisi od velikog broja različitih parametara sistema i njegovih elemenata pa je veoma komplikovan za izračunavanje. Kao posledica ovakvog pristupa dešava se da su određeni elementi sistema predimenzionisani, dok je pouzdanost sistema

kao celine uglavnom relativno niska. Ovaj aspekt posebno je značajan u fazama planiranja i projektovanja sistema, s obzirom da upoređivanje varijanti, bez uključivanja pouzdanosti kao jednog od parametara, može dovesti do pogrešnih zaključaka i realizovanja nedovoljno pouzdanih sistema koje je potrebno naknadno menjati i popravljati.

2. POUZDANOSTI VODOVODNIH SISTEMA

Pošto je o problemima pouzdanosti složenih vodovodnih sistema već pisano u ovom i određenom broju drugih časopisa [4] ovde će se u najkraćem dati osvrt na osnovne definicije pouzdanosti sistema. Kao što je u prethodnom delu ovog rada rečeno da bi složeni vodovodni sistemi uspešno obavljali svoju funkciju pored mehaničke pouzdanosti moraju biti zadovoljeni i hidraulički parametri sistema.

Mehanička pouzdanost i pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara kombinuju se u ukupnu ili mehaničko - hidrauličku pouzdanost sistema, koja predstavlja verovatnoću da će u određenom čvoru distributivnog sistema biti obezbeđena potrebna količina vode zahtevanog pritiska, pod uslovom da u izvorišnim čvorovima postoje dovoljne količine vode.

Za složene distributivne sisteme u razmatranje se uvode dve mere pouzdanosti:

- pouzdanost mreže (sistema) - verovatnoća da će svaki potrošački čvor u sistemu ispuniti zahtevanu funkciju u određenom vremenskom trenutku, i
- pouzdanost čvora - verovatnoća da će određeni potrošački čvor obavljati postavljene zadatke u određenom vremenskom trenutku.

* Ovaj članak rezultat je rada na projektu 410046 - Alternativna rešenja snabdevanja vodom Vojvodine

2.1 Mehanička pouzdanost

Mehanička pouzdanost distributivnih sistema određuje se korišćenjem osnovne teoreme dekompozicije binarnih funkcija, a proračun se sprovodi kroz nekoliko faza:

1. agregacioni model,
2. dekompozicija sistema i
3. određivanje međupouzdanosti

2.2. Pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema

Zbog ranije istaknutih osobenosti vodoprivrednih sistema, u odnosu na druge tehničke sisteme, prilikom određivanja pouzdanosti zadatka - isporuke vode - neophodno je sprovesti hidraulički proračun za svaki sistem veza za koji je moguće izračunati mehaničku pouzdanost. Ako su pritisci veći od minimalnih potrebnih vrednosti pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema jednaka je jedinici u suprotnom pouzdanost je jednaka nuli.

2.3. Pouzdanost sistema

U okviru prikaza rezultata proračuna pouzdanosti, pored pouzdanosti pojedinih potrošačkih čvorova sistema, daće se i pouzdanosti celog sistema računati na nekoliko različitih načina, koji se najčešće sreću, sa oznakama tih pouzdanosti koje će u ovom primeru biti korišćene:

R1 – pouzdanost sistema određena kao minimalna vrednost pouzdanosti potrošačkih čvorova,

$$R = \min (R_i) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

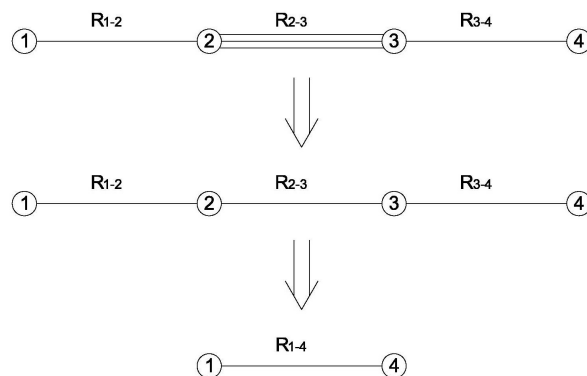
R2 – pouzdanost sistema određena kao aritmetička sredina pouzdanosti potrošačkih čvorova,

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N}$$

R3 – pouzdanost sistema određena kao ponderisana vrednost čvornih pouzdanosti

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} = \sum_{i=1}^N w_i \cdot R_i$$

Princip određivanja pouzdanosti veze između dva čvora:



Slika 1. Šematski prikaz veza (serijskih i paralelnih) između dva čvora

Ukoliko je definisana konfiguracija sistema i ako se znaju pouzdanosti elemenata, pouzdanost čitavog sistema se određuje dekomponovanjem na podsisteme vezane redno ili paralelno i određivanjem pouzdanosti idući od elemenata prema podsistemima višeg reda. Princip određivanja pouzdanosti proizvoljnog sistema je dat na slici 1. Ovaj sistem se sastoji od 4 čvora i tri veze (2 serijske i 1 paralelna). Pouzdanost veze između čvorova 1 i 2 jednaka je R_{1-2} odnosno R_{3-4} između čvorova 3 i 4. Paralelna veza između čvorova 2 i 3 agregacijom će biti svedena na serijsku vezu sa pouzdanošću R_{2-3} . U slučaju paralelno vezanih elemenata moguća su dva tipa veze:

I) Prvi tip podrazumeva da sistem uspešno funkcioniše ako je bilo koji od n elemenata ispravan (veza "1 od n "), a pouzdanost se u tom slučaju određuje korišćenjem izraza:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

II) Drugi tip paralelne veze podrazumeva da je za normalan rad neophodno da radi "r" od "n" elemenata u sistemu (veza "r od n"). Pod pretpostavkom da su svi otkazi elemenata nezavisni pouzdanost ovog tipa paralelne veze dobija se iz binomne raspodele i jednaka je:

$$R = \sum_{x=r}^n \binom{n}{x} P^x (1 - P)^{n-x}$$

P – verovatnoća da je element ispravan, x – broj još uvek ispravnih elemenata.

Prilikom određivanja pouzdanosti složenih sistema vrše se serijsko - paralelne agregacije, čime se složeni sistem svodi na jednu vezu ili sistemom veza granate strukture. U slučaju kada se računa pouzdanost sistema, ona je jednaka proizvodu pouzdanosti svih veza u redukovanom sistemu, jer otkaz bilo koje veze dovodi do otkaza (neispravnog funkcionisanja) sistema.

U slučaju serijskih veza pod uslovom da su svi otkazi elemenata nezavisni pouzdanost sistema sastavljenog od n elemenata jednaka je:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

$R_i(t)$ – funkcije pouzdanosti i – tog elementa.

3. PRIKAZ PRORAČUNA POUZDANOSTI ZA RVS DUBOVAC-ZRENJANIN-KIKINDA

Javno snabdevanje vodom u Vojvodini je orijentisano isključivo na korišćenje podzemnih voda iz različitih vodonosnih sredina:

- aluvijalnih sedimenata u priobalju Save i Dunava - "prva" izdan (dubine bunara do 50 m),
- osnovnog vodonosnog kompleksa - osnovna izdan (dubine bunara od 50-250m) i
- subarteske i arteske izdani - duboka izdan (dubine bunara od 250m do 350m)

Problemi neodgovarajućeg kvaliteta vode za piće posebno su izraženi u Banatu, posebno na području Srednjeg i Severnog Banata i ogledaju se pre svega u povećanom sadržaju organskih materija, gvožđa, mangana, amonijaka i arsena. Problemi u vodosnabdevanju koji se javljaju u Vojvodini bili su predmet analize planskih strateških dokumenta kao što su Vodoprivredna Osnova Srbije (VOS) (usvojena 2002. godine i Prostorni Plan Republike Srbije (1995. god). Prema Vodoprivrednoj Osnovi, snabdevanje vodom Vojvodine u budućnosti će se oslanjati kako na sopstvena (lokalna) izvorišta (uz dodatnu preradu) tako i na novoformirana regionalna izvorišta. U radu je dat prikaz pouzdanosti regionalnog vodovodnog sistema za snabdevanje vodom 13 opština u Severnom i Srednjem Banatu, koji se oslanja na potencijalno izvorište podzemnih voda u rejonu Kovin-Dubovac.

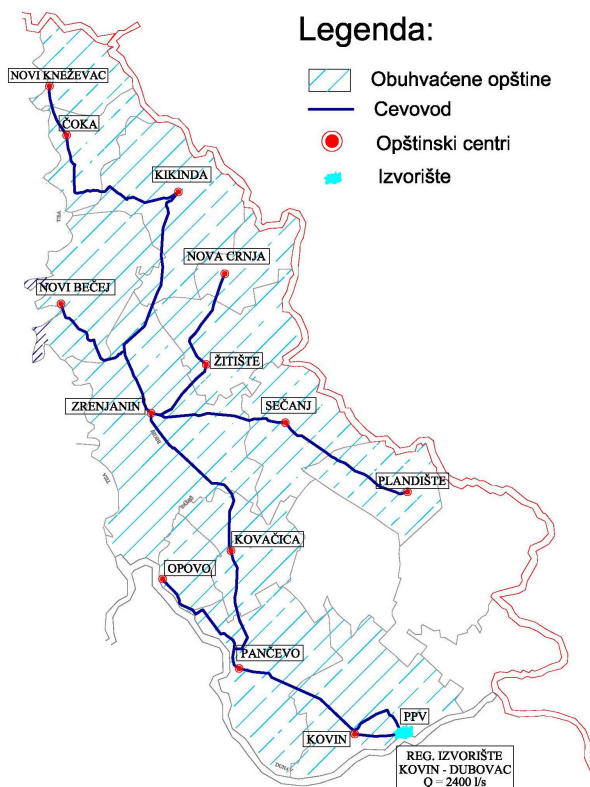
Koncept regionalnog vodovodnog sistema Dubovac-Zrenjanin-Kikinda je zahvatanje vode sa potencijalnog

izvorišta Kovin-Dubovac koja se nakon prerade na PPV-u dalje putem pumpnih stanica distribuira prema opštinama Kovin, Pančevo, Opovo, Kovačica, Zrenjanin, Sečanj, Plandište, Žitište, Nova Crnja, Novi Bečej, Kikinda, Čoka i Novi Kneževac. Varijante snabdevanja vodom su formirane na osnovu potreba za kvalitetnom vodom u periodu do 2030. godine, postojećeg stanja vodosnabdevanja naselja, planova razvoja vodovodnih sistema i zainteresovanosti subjekata za priključenje na regionalni sistem. Analizirano je 5 varijanti RVS, koje su opisane u tabeli 1. Na slici 1. prikazana je konfiguracija RVS za Varijantu A (priključeno je svih 13 opština u Banatu). U Varijantama B, D i E regionalni vodovodni sistem ne obuhvata svih 13 analiziranih opština u Banatu.

Tabela 1: Prikaz varijanti vodosnabdevanja razmatranih 13 opština u Banatu

Varijanta	Količina vode (l/s)	Dužina razvodne mreže (km)	Opštine obuhvaćene varijantnim rešenjima
Varijanta A	2343	384.0	Kovin, Pančevo, Zrenjanin, Opovo, Kovačica, N.Bečej, Kikinda, Čoka, N.Kneževac, Sečanj, Plandište, Žitište, N.Crnja
Varijanta B	2087	245.0	Kovin, Pančevo, Zrenjanin, Kovačica, N.Bečej, Kikinda, Žitište, N.Crnja
Varijanta C	1894	384.0	Kovin, Pančevo (200 l/s), Zrenjanin, Opovo, Kovačica, N.Bečej, Kikinda, Čoka, N.Kneževac, Sečanj, Plandište, Žitište, N.Crnja
Varijanta D	1262	384.0	Kovin, Pančevo (200 l/s), Opovo, Kovačica, N.Bečej, Kikinda, Čoka, N.Kneževac, Sečanj, Plandište, Žitište, N.Crnja
Varijanta E	1006	245.0	Kovin, Pančevo (200 l/s), Kovačica, N.Bečej, Kikinda, Žitište, N.Crnja

U nastavku rada biće prikazani rezultati određivanja pouzdanosti samo za Varijantu A kada je na sistem priključeno svih 13 opština. U okviru prikaza rezultata proračuna pouzdanosti, biće prikazana mehanička i ukupna pouzdanost sistema kao i ukupni vremenski deficit vode za posmatrani sistem u slučajevima kada su pumpne stanice opremljene sa po jednim rezervnim agregatom i kada nisu.



Slika 2. Prikaz konfiguracije RVS–Varijanta A

3.1. Distributivni sistem Varijanta A

Sistem se sastoji od 13 potrošačkih čvorova, 47 veza i 1 izvorišnog čvora (slika 3). Na slici je dat šematski prikaz regionalnog vodovodnog sistema „Dubovac-Zrenjanin-Kikinda“. Kao što se na slici može uočiti sistem je formiran od dve vrste veza: obične (jednostruke) veze između dva čvora kojima su predstavljeni cevovodi i višestruka veza između dva čvora kojima su predstavljene pumpne stanice.

Voda za potrebe korisnika se uvodi u sistem pumpanjem sa postrojenja za preradu vode (čvor 1) i dalje se sistemom cevovoda i pumpnih stanica dovodi do korisnika. Postoje dva tipa pumpnih stanica:

- I tip – pumpne stanice koje sadrže 3 pumpe + 1 rezervni pumpni agregat (paralelna veza tipa "3 od 4"),
- II tip – pumpne stanice koje sadrže 2 pumpe + 1 rezervni pumpni agregat (paralelna veza tipa "2 od 3").

Pretpostavlja se da pumpe otkazuju jednom godišnje, a da njihova popravka traje 50 časova [4] tako da pouzdanost svake pumpe iznosi 0,9943.

Karakteristike potrošačkih čvorova, sa osnovnim parametrima rezervoara dati su u tabeli 2, dok su karakteristike veza (cevovoda) dati u tabeli 3. Za sve cevovode usvojena je vrednost koeficijenta hrapavosti 1mm. Na mestu račvanja cevovoda, kao i na mestima promene prečnika cevovoda nalaze se nepotrošački čvorovi, koje je neophodno uvesti radi definisanja konfiguracije sistema. U ovom primeru to je čvor 100 (Naselje Melenci). Proračun pouzdanosti rađen je za vrednosti potreba za vodom u danu maksimalne potrošnje.

Prilikom proračuna pouzdanosti elemenata sistema, odnosno pouzdanost veza (cevovoda) kao jedinih elemenata u sistemu razmatrane su dve varijante vrednosti broja otkaza.

varijanta I - Za cevi prečnika većih od 400 mm broj otkaza iznosi 0,01 otkaza/km.god, a za cevi manjih prečnika 0,05 otkaza/km.god.

varijanta II - Za sve cevi broj otkaza iznosi 0,0032 otkaza/km.god.

Tabela 2. Karakteristike čvorova za RVS Dubovac – Zrenjanin - Kikinda

čvor	$Q_{max,dn}$ (l/s)	$Q_{sr,god}$ (l/s)	z (mm)	V (m ³)
1			73	
2	2188	1326	77	15800
4	1495	908	81.4	10800
5	1392	861	80	10000
6	107	59	79.1	800
7	52	28	79.7	380
100	525	312	80	3800
11	412	245	77.9	3000
12	105	59	82.5	800
13	53	30	83.8	400
10	113	67	81	820
8	128	72	79	930
9	46	28	77.2	350
3	44	24	75.1	320
78	155	89	80.9	1200

Prva varijanta vrednosti intenziteta otkaza koja je ovde uzeta u razmatranje predstavlja broj otkaza u regionalnim sistemima preuzeta je iz literature. Ova

vrednost je dosta veća od stvarnih vrednosti pa se zato u proračun ušlo i sa vrednošću intenziteta otkaza sa jednog izgrađenog sistema u eksploataciji (Rzavski sistem). Vrednost je dobijena na osnovu podatka da je za period od osam godina funkcionisanja Rzavskog sistema samo dva puta došlo do otkaza na cevovodima celog sistema, čija je dužina preko 78 km. Ova vrednost je sada još manja jer je za period od 14 godina koliko ovaj sistema funkcioniše broj okaza ostao isti. Iz razloga sigurnosti uzeta je prva vrednost.

Tabela 3. Karakteristike veza za RVS Dubovac – Zrenjanin - Kikinda

veza	od čvora	do čvora	L	D
			(km)	(mm)
3	15	16	12.0	1300
5	17	18	12.0	1300
7	19	20	12.0	1300
9	21	2	1.15	1300
13	23	24	12.9	250
15	25	3	12.9	250
17	27	28	12.0	1100
19	29	4	12.0	1100
22	31	32	13.0	1100
24	33	34	13.0	1100
26	32	5	14.0	1100
29	34	35	14.5	350
31	36	6	14.5	350
34	41	42	11.0	250
36	43	44	11.0	250
38	45	7	10.0	250
49	53	54	8.25	700
79	55	100	8.25	700
67	63	64	9.0	350
69	65	10	9.5	350
53	57	58	13.5	700
55	59	60	13.5	700
57	61	11	13.5	700
60	67	68	12.4	350
62	69	70	12.4	350
64	71	12	12.4	350
72	73	13	15.0	250
41	47	48	8.75	350
43	49	8	8.75	350
46	51	74	12.0	250
73	75	9	12.5	250
75	75	76	8.0	400
77	77	78	8.0	400

Proračun pouzdanosti rađen je za tri različita vremena popravke kvara na cevovodu: 3, 5, 7 dana, kako bi se sagledao uticaj ovog parametra na pouzdanost celog sistema i pojedinih potrošačkih čvorova. U tabelama 4 i

5 date su vrednosti otkaza (λ) i intenziteta popravke (μ) kao i vrednosti pouzdanosti za 1 km cevi (R_0) za I i II varijantu otkaza za svaku kombinaciju vremena popravke.

Ove vrednosti su dobijene korišćenjem izraza:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{365 \cdot 24 - N \cdot MTTR}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{T \cdot 24}$$

$$R_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

$$R = R_0^L$$

gde su:

- N – broj kvarova po 1 km cevi u godini dana,
- T - vreme popravke kvara izraženo u danima,
- MTTR – srednje vreme popravke (dan)
- MTBF – srednje vreme između otkaza (dan)
- L – dužina cevovoda (km)

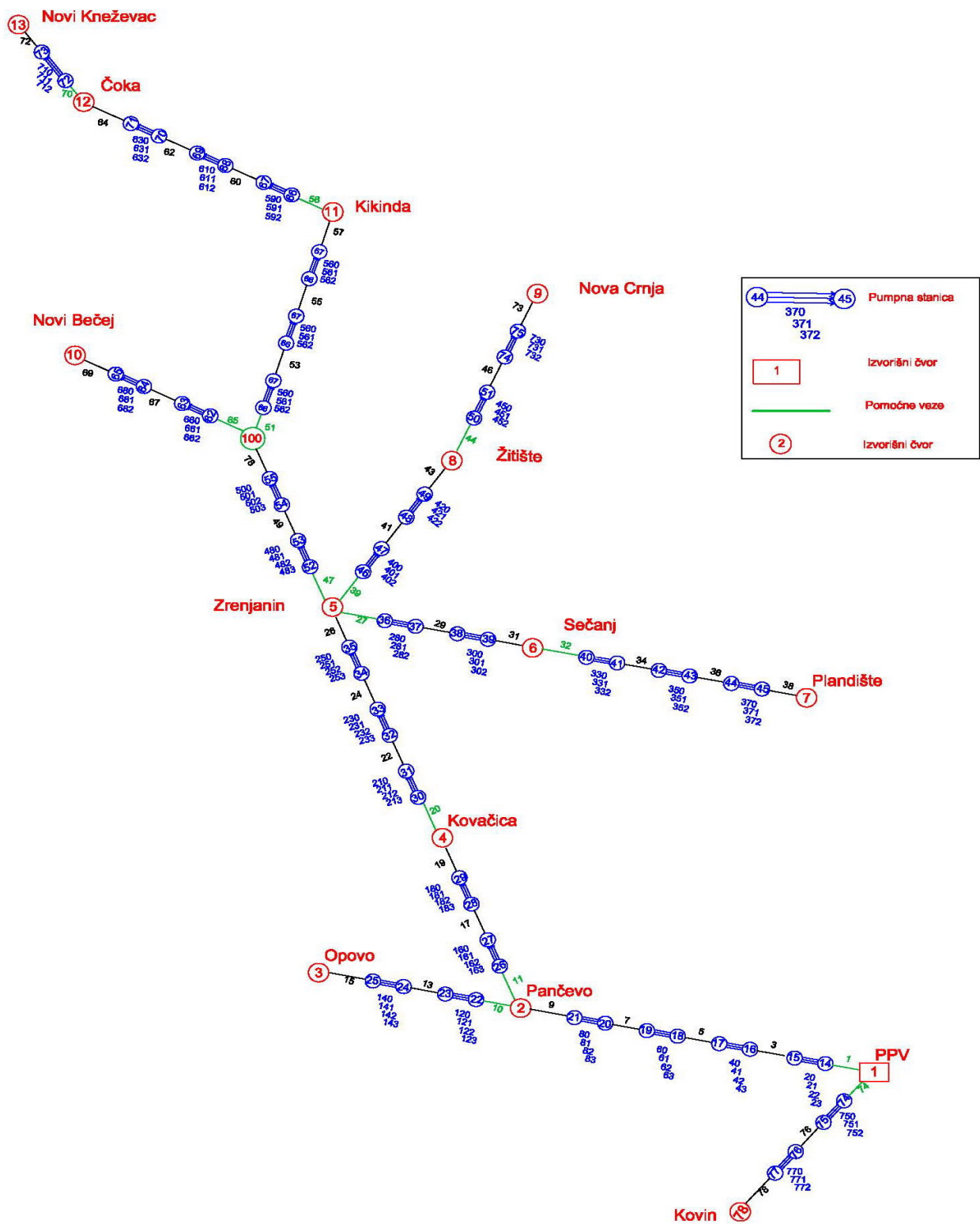
Tabela 4. Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti za I varijantu intenziteta otkaza

N (otkaz/km*god)	T (dan)	λ	μ	R_0
	5	0,013889	0,99991781	
	7	0,008333	0,99986301	
0.05	3	5,71E-06	0,041667	0,99986301
	5		0,013889	0,99958915
	7		0,008333	0,99931544

Tabela 5. Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti za II varijantu intenziteta otkaza

N (otkaz/km*god)	T (dan)	λ	μ	R_0
	5	0,013889	0,99997366	
	7	0,008333	0,99995609	

Određen broj veza (1, 10, 11, 20, 27, 32, 47, 65, 51, 58, 70, 39, 44, 73) su fiktivne veze, koje predstavljaju vezu sa pumpnim stanicama, a uvedene su radi jednostavnijeg opisa konfiguracije sistema. Pretpostavlja se da je pouzdanost ovih veza jednaka 1.



Slika 3. Šematski prikaz regionalnog vodovodnog sistema Dubovac- Zrenjanin- Kikinda

U tabeli 6 prikazani su rezultati proračuna pouzdanosti pojedinih potrošačkih čvorova regionalnog sistema Dubovac–Zrenjanin–Kikinda, za svaku ispitivanu kombinaciju broja otkaza i vremena popravke kvara za protok u sistemu Q_{\max}^{dn} .

Tabela 6. Mehanička pouzdanost čvorova RVS Dubovac – Zrenjanin - Kikinda

čvor	0,0032 (otkaza/km.god)			0,01 (otkaza/km.god)		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
2	0,9990	0,9984	0,9977	0,9970	0,9949	0,9929
3	0,9983	0,9972	0,9961	0,9864	0,9775	0,9686
4	0,9994	0,9989	0,9985	0,9980	0,9967	0,9954
5	0,9983	0,9972	0,9961	0,9948	0,9913	0,9878
6	0,9976	0,9959	0,9943	0,9830	0,9718	0,9607
7	0,9967	0,9945	0,9923	0,9701	0,9507	0,9317
8	0,9979	0,9964	0,9950	0,9876	0,9795	0,9714
9	0,9972	0,9954	0,9935	0,9777	0,9632	0,9488
100	0,9979	0,9965	0,9951	0,9934	0,9890	0,9847
10	0,9974	0,9957	0,9939	0,9859	0,9766	0,9674
11	0,9968	0,9947	0,9926	0,9901	0,9836	0,9771
12	0,9958	0,9931	0,9903	0,9871	0,9786	0,9701
13	0,9954	0,9924	0,9894	0,9810	0,9686	0,9563
78	0,9996	0,9993	0,9990	0,9987	0,9978	0,9969
R1	0,9954	0,9924	0,9894	0,9701	0,9507	0,9317
R2	0,9977	0,9961	0,9945	0,9875	0,9793	0,9712
R3	0,9683	0,9671	0,9658	0,9626	0,9576	0,9527

U narednim tabelama (tabela 7 i 8) prikazane su vrednosti ukupne pouzdanosti sistema (R) i prosečno godišnje vreme (T) tokom koga potrebe korisnika za vodom nisu zadovoljene. Pri tome se podrazumeva da se nedostatak vode javlja kao posledica otkaza neke veze u sistemu ne ulazeći u problematiku dostupnih količina vode na izvoru. Proračun je urađen za potpuno urađen sistem, kada su u pumpnim stanicama ugrađeni i rezervni agregati.

Treba naglasiti da prilikom računjanja pokazatelja T (vremenski deficit vode) za potrošačke čvorove nisu uzete u obzir zapremine vode koje postoje u gradskim rezervoarima. Vrednosti vremenskog deficita vode, navedene u tabelama, javile bi se samo u najnepovoljnijem slučaju – u slučaju da su gradski rezervoari prazni svaki put kada, zbog otkaza cevi, voda ne dotiče do rezervoara.

Iz rezultata u tabeli 8. vidi se da vreme popravke i usvojena vrednost broja otkaza po 1km cevovoda ima velikog udela na vremenski deficit vode za potrošače.

Naime za čvor 13 (Novi Kneževac) a za vrednost broja otkaza za II varijantu vremenska nebezbednost vodom za vreme popravke od 3 dana iznosi 1,7 dana dok za vreme popravke od 5 dana vremenski deficit vode oko 3 dana. To je povećanje deficita za oko 65%. Sa druge strane, za isti čvor u I varijanti taj vremenski deficit je 7 dana za vreme popravke od 3 dana odnosno 11,5 dana za vreme popravke od 5 dana.

Tabela 7. Ukupna pouzdanost pojedinih delova sistema

čvor	0,0032 (otkaza/km.god)			0,01 (otkaza/km.god)		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
1-2	0,9983	0,9976	0,9969	0,9962	0,9942	0,9921
2-3	0,9980	0,9969	0,9958	0,9861	0,9771	0,9683
2-4	0,9990	0,9986	0,9981	0,9976	0,9963	0,9950
4-5	0,9977	0,9966	0,9955	0,9942	0,9907	0,9872
5-6	0,9974	0,9957	0,9941	0,9828	0,9716	0,9605
6-7	0,9964	0,9942	0,9921	0,9698	0,9504	0,9314
5-8	0,9977	0,9962	0,9948	0,9874	0,9793	0,9712
8-9	0,9970	0,9952	0,9933	0,9775	0,9630	0,9486
5-100	0,9975	0,9961	0,9947	0,9930	0,9886	0,9843
100-10	0,9972	0,9955	0,9937	0,9857	0,9764	0,9672
100-11	0,9965	0,9944	0,9923	0,9898	0,9833	0,9768
11-12	0,9956	0,9928	0,9900	0,9868	0,9783	0,9698
12-13	0,9954	0,9923	0,9893	0,9809	0,9685	0,9562
1-78	0,9994	0,9991	0,9988	0,9985	0,9976	0,9967
R1	0,9954	0,9923	0,9893	0,9698	0,9504	0,9314
R2	0,9973	0,9958	0,9942	0,9872	0,9790	0,9708
R3	0,9858	0,9847	0,9835	0,9806	0,9761	0,9715

Tabela 8. Vreme nezadovoljenja potreba za vodom (vremenski deficit) izražen u danima.

čvor	0,0032 otkaza/km.god			0,01 otkaza/km.god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
2	0,6	0,9	1,1	1,4	2,1	2,9
3	0,7	1,1	1,6	5,1	8,4	11,6
4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,3	1,8
5	0,8	1,2	1,6	2,1	3,4	4,7
6	1,0	1,6	2,2	6,3	10,4	14,4
7	1,3	2,1	2,9	11,0	18,1	25,0
8	0,9	1,4	1,9	4,6	7,6	10,5
9	1,1	1,8	2,4	8,2	13,5	18,8
100	0,9	1,4	1,9	2,5	4,1	5,7
10	1,0	1,7	2,3	5,2	8,6	12,0
11	1,3	2,0	2,8	3,7	6,1	8,5
12	1,6	2,6	3,6	4,8	7,9	11,0
13	1,7	2,8	3,9	7,0	11,5	16,0
78	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,2
R1	1,7	2,8	3,9	11,0	18,1	25,0
R2	1,0	1,5	2,1	4,7	7,7	10,6
R3	5,2	5,6	6,0	7,1	8,7	10,4

Pod pojmom „mehanička pouzdanost“ podrazumeva verovatnoću da će se između čvorova sistema i izvorišnih čvorova postojati bar jedna putanja koja se ne nelazi u stanju otkaza. Zadovoljenje mehaničke sposobnosti potreban je ali ne i dovoljan uslov za ispravno funkcionisanje distributivnog sistema. Za ove sisteme neophodno je odrediti i verovatnoću da će u čvoru (čvorovima) biti zadovoljeni i zahtevani pritisci. Ova verovatnoća izražena je pojmom „pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara“. Kombinovanjem ove dve pouzdanosti dobija se ukupna ili mehaničko-hidraulička pouzdanost sistema.

Za regionalni sistem u ovom primeru pouzdanost od čvora 1 (postrojenje za prečišćavanje vode) do ostalih potrošačkih čvorova je ista kao i mehanička pouzdanost tih delova sistema. Razlog leži u tome što je ovaj regionalni sistem granate strukture pa otkaz bilo koje veze od čvora 1 do nekog potrošačkog čvora dovodi do prekida u vodosnabdevanju tog čvora, odnosno hidraulika sistema nije zadovoljena.

Pouzdanost čvora 1 (PPV) u ovom primeru nije razmatrana (smatra se da je postrojenje apsolutno pouzdano, tj. njegova pouzdanost jednaka je 1).

U tabeli 9 prikazane su vrednosti pouzdanosti veza (cevovoda) u sistemu za svaku ispitivanu kombinaciju broja otkaza i vremena popravke kvara.

Tabela 9. Pouzdanost veza (cevovoda) u sistemu

veza	0,0032 otkaza/km.god			0,01 otkaza/km.god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
1-2	0,9990	0,9984	0,9977	0,9970	0,9949	0,9929
2-3	0,9983	0,9972	0,9961	0,9864	0,9775	0,9686
2-4	0,9994	0,9989	0,9985	0,9980	0,9967	0,9954
4-5	0,9983	0,9972	0,9961	0,9948	0,9913	0,9878
5-6	0,9976	0,9959	0,9943	0,9830	0,9718	0,9607
6-7	0,9967	0,9945	0,9923	0,9701	0,9507	0,9317
5-8	0,9979	0,9964	0,9950	0,9876	0,9795	0,9714
8-9	0,9972	0,9954	0,9935	0,9777	0,9632	0,9488
5-100	0,9979	0,9965	0,9951	0,9934	0,9890	0,9847
100-10	0,9974	0,9957	0,9939	0,9859	0,9766	0,9674
100-11	0,9968	0,9947	0,9926	0,9901	0,9836	0,9771
11-12	0,9958	0,9931	0,9903	0,9871	0,9786	0,9701
12-13	0,9954	0,9924	0,9894	0,9810	0,9686	0,9563
1-78	0,9996	0,9993	0,9990	0,9987	0,9978	0,9969

Vrednosti koje su predstavljene u tabeli 10 predstavljaju pouzdanost svih pumpnih stanica koje se nalaze na pojedinim delovima sistema (vezama). Ove vrednosti su

prikazane za pumpne stanice koje su projektovane sa i bez rezervnog agregata. U slučaju kada pumpne stanice rade u režimu sa po jednim rezervnim agregatom njihova pouzdanost bi bila 0.99981 (za slučaj 3+1) odnosno 0.99990 (za slučaj 2+1).

Tabela 10. Pouzdanost svih pumpnih stanica (sa i bez rezervnog agregata) .

veza	Pumpne stanice sa rezervnim agregatom	Pumpne stanice bez rezervnog agregata
1-2	0,9992	0,9338
2-3	0,9996	0,9663
2-4	0,9996	0,9663
4-5	0,9994	0,9499
5-6	0,9998	0,9774
6-7	0,9997	0,9663
5-8	0,9998	0,9774
8-9	0,9998	0,9774
5-100	0,9996	0,9663
100-10	0,9998	0,9774
100-11	0,9997	0,9663
11-12	0,9997	0,9663
12-13	0,9997	0,9663
1-78	0,9998	0,9774

Tabela 11. Pouzdanost potrošačkih čvorova u sistemu

čvor	0,0032 otkaza/km.god			0,01 otkaza/km.god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
2	0,9983	0,9976	0,9969	0,9962	0,9942	0,9921
3	0,9962	0,9945	0,9927	0,9823	0,9714	0,9606
4	0,9972	0,9962	0,9951	0,9938	0,9905	0,9872
5	0,9950	0,9928	0,9906	0,9880	0,9813	0,9746
6	0,9924	0,9886	0,9848	0,9710	0,9534	0,9361
7	0,9888	0,9829	0,9770	0,9417	0,9061	0,8719
8	0,9927	0,9891	0,9855	0,9756	0,9609	0,9465
9	0,9897	0,9843	0,9789	0,9537	0,9254	0,8979
100	0,9925	0,9889	0,9853	0,9812	0,9702	0,9593
10	0,9897	0,9844	0,9792	0,9671	0,9472	0,9278
11	0,9890	0,9834	0,9778	0,9712	0,9539	0,9370
12	0,9846	0,9763	0,9680	0,9583	0,9332	0,9087
13	0,9801	0,9688	0,9577	0,9400	0,9038	0,8689
78	0,9994	0,9991	0,9988	0,9985	0,9976	0,9967

Pošto je pumpna stanica sa gledišta pouzdanosti najslabiji element sistema, interesantno je razmotriti njen uticaj na pouzdanost sistema. Zbog toga je analizirana i pouzdanost sistema u kome su pumpne stanice projektovane bez rezervnih agregata. U tom slučaju pouzdanost pumpnih stanica sa tri agregata bi bila 0,9830 odnosno 0,9886 za pumpne stanice sa dva agregata.

U tabelama 12 i 13 prikazane su vrednosti pouzdanosti veza u sistema i pouzdanost čvorova sistema za svaku ispitivanu kombinaciju broja otkaza i vremena popravke kvara za slučaj kada u pumpnim stanicama nisu ugrađeni rezervni agregati.

Tabela 12. Pouzdanost pojedinih delova sistema

čvor	0,0032 otkaza/km.god			0,01 otkaza/km.god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
1-2	0,9329	0,9323	0,9317	0,9310	0,9291	0,9272
2-3	0,9647	0,9637	0,9626	0,9532	0,9446	0,9360
2-4	0,9657	0,9653	0,9649	0,9644	0,9632	0,9619
4-5	0,9483	0,9473	0,9462	0,9449	0,9416	0,9383
5-6	0,9750	0,9734	0,9719	0,9608	0,9498	0,9390
6-7	0,9632	0,9610	0,9589	0,9375	0,9187	0,9003
5-8	0,9753	0,9739	0,9725	0,9653	0,9573	0,9494
8-9	0,9747	0,9729	0,9711	0,9557	0,9414	0,9274
5-100	0,9643	0,9629	0,9616	0,9600	0,9557	0,9515
100-10	0,9749	0,9732	0,9715	0,9636	0,9545	0,9455
100-11	0,9633	0,9612	0,9592	0,9568	0,9504	0,9442
11-12	0,9623	0,9596	0,9570	0,9538	0,9456	0,9375
12-13	0,9619	0,9590	0,9561	0,9480	0,9359	0,9241
1-78	0,9770	0,9767	0,9765	0,9761	0,9753	0,9744

Tabela 13. Pouzdanost potrošačkih čvorova u sistemu

čvor	0,0032 otkaza/km.god			0,01 otkaza/km.god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
2	0,9329	0,9323	0,9317	0,9310	0,9291	0,9272
3	0,9000	0,8984	0,8968	0,8874	0,8776	0,8679
4	0,9009	0,8999	0,8990	0,8978	0,8948	0,8918
5	0,8544	0,8525	0,8506	0,8484	0,8426	0,8368
6	0,8330	0,8298	0,8267	0,8151	0,8003	0,7858
7	0,8023	0,7975	0,7927	0,7641	0,7353	0,7075
8	0,8333	0,8303	0,8273	0,8190	0,8067	0,7945
9	0,8122	0,8078	0,8033	0,7827	0,7594	0,7368
100	0,8238	0,8209	0,8179	0,8144	0,8053	0,7963
10	0,8031	0,7989	0,7946	0,7848	0,7687	0,7529
11	0,7936	0,7890	0,7845	0,7792	0,7654	0,7518
12	0,7637	0,7572	0,7508	0,7433	0,7238	0,7048
13	0,7346	0,7262	0,7178	0,7046	0,6774	0,6513
78	0,9770	0,9767	0,9765	0,9761	0,9753	0,9744

Upoređujući rezultate iz tabele 11 i 13 vidi se da pouzdanost potrošačkih čvorova sistema značajno opada kada se pumpne stanice projektuju bez rezervnog agregata.

U tabeli 14 prikazane su vrednosti prosečno godišnje vrednosti vremena (T) tokom koga potrebe korisnika za vodom nisu zadovoljene, pri čemu se podrazumeva nedostatak vode koji se javlja kao posledica

nepouzdanosti sistema, ne ulazeći u problematiku dostupnih količina na izvoru.

Tabela 14. Vreme nezadovoljenja potreba za vodom (vremenski deficit) izražen u danima.

čvor	0,0032 otkaza/km.god			0,01 otkaza/km.god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
2	24,5	24,7	24,9	25,2	25,9	26,6
3	12,9	13,3	13,7	17,1	20,2	23,4
4	12,5	12,7	12,8	13,0	13,4	13,9
5	18,9	19,2	19,6	20,1	21,3	22,5
6	9,1	9,7	10,3	14,3	18,3	22,3
7	13,4	14,2	15,0	22,8	29,7	36,4
8	9,0	9,5	10,0	12,7	15,6	18,5
9	9,2	9,9	10,6	16,2	21,4	26,5
100	13,0	13,5	14,0	14,6	16,2	17,7
10	9,2	9,8	10,4	13,3	16,6	19,9
11	13,4	14,2	14,9	15,8	18,1	20,4
12	13,8	14,7	15,7	16,8	19,9	22,8
13	13,9	15,0	16,0	19,0	23,4	27,7
78	8,4	8,5	8,6	8,7	9,0	9,3
R1	24,5	24,7	24,9	25,2	29,7	36,4
R2	12,9	13,5	14,0	16,5	19,4	22,3
R3	21,6	22,0	22,4	23,5	25,1	26,6

Iz rezultata koji su prikazani u prethodnim tabelama uočava se da se sa ukidanjem jednog rezervnog agregata pouzdanost potrošačkih čvorova i samog sistema značajno smanjila, a samim tim se i vremenski deficit vode značajno povećavao. Tako se za čvor 13 (Novi Kneževac) vremenski deficit vode za *II varijantu*, povećao na oko 14 dana u odnosu na oko 2 dana koji je dobijen za proračun pumpi sa jednim rezervnim agregatom (tabela 8), dok se za *I varijantu* vremenski deficit povećao sa 7 na 19 dana. Produžavanjem vremena popravke sa 3 na 5 dana za *II varijantu*, vremenski deficit se povećava sa 14 na 15 dana a sa produženjem vremena popravke na 7 dana vremenski deficit se povećava za još 1 dan.

Uticao produžavanje vremena popravke na pouzdanost sistema, odnosno na vremenski deficit vode, je kao i u prethodnom slučaju (Tabela 8) dosta izraženiji za *II varijantu* (manja vrednost broja otkaza cevovoda) kada se vremenski deficit vode povećava za oko 15% za vreme popravke od 5 dana odnosno 25%, a vreme popravke od 7 dana.

Ovakav rezultat je proistekao iz činjenice da je ispitivani regionalni sistem granate strukture i da otkaz bilo koje veze na potezu od čvora 1 do nekog potrošačkog čvora dovodi do prekida u snabdevanju vodom tog čvora.

4. ZAKLJUČAK

U granatim vodovodnim sistemima (regionalni vodovodni sistemi) pouzdanost prvenstveno zavisi od mehaničkih karakteristika sistema (intenzitet otkaza i intenzitet popravke) cevi i pumpnih stanica (ako ih ima u sistemu) kao najzastupljenijih elemenata. Sa stanovišta pouzdanosti cevovodi su najosetljiviji delovi sistema, jer su sastavljeni od velikog broja serijski vezanih elemenata. U regionalnom sistemu Dubovac-Zrenjanin-Kikinda verovatnoća otkaza je različita za obe varijante vrednosti broja otkaza. Razlika između pouzdanosti je značajna iako je pouzdanost elemenata vrlo velika za obe varijante intenziteta otkaza. Pouzdanost čvora, odnosno vrednost vremenskog deficita vode u velikoj meri zavisi od dispečerskog pravila koje se uvodi prilikom otkaza neke cevi. Zbog toga je veoma važno skratiti vreme popravke na što manju meru (uvođenjem većeg broja zatvarača, osmatranjem sistema, obučavanjem ekipe za popravke, i dr.).

LITERATURA

- [1] Dašić T.: *Razvoj modela za planiranje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema: Doktorska disertacija*, Beograd 2003.
- [2] A. Soro, D. Đurić, N. Radić, N. Milenković, M. Milovanović, S. Potkonjak.: *Prehodna Studija izvodljivosti izgradnje regionalnog vodovodnog sistema Dubovac – Zrenjanin – Kikinda*, Beograd 2006.
- [3] Dašić T., Đorđević B., *Metod za određivanje pouzdanosti složenih vodovodnih sistema (NETREL)*, Vodoprivreda 0350-0519, 35 (2003) 203-204 p. 155-162.
- [4] Wagner J., Shamir U., Marks D., *Water distribution reliability: analytical methods*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, 1988.

WATER DISTRIBUTION SYSTEM RELIABILITY ILLUSTRATED BY THE CASE STUDY OF THE RWS DUBOVAC-ZRENJANIN-KIKINDA

by

Nenad RADIĆ*, Dušan ĐURIĆ*, Nenad MILENKOVIĆ*
Milica MILOVANOVIĆ*, Tina DAŠIĆ**

* Institute for development of water resources "Jaroslav Černi"

** Faculty of Civil Engineering

Summary

Water supply networks have a specific feature that makes them more complicated than many other water management systems. Namely, to make sure that the system performs well, apart from the mechanical characteristics of the system, the hydraulic reliability of its components must also be verified. In this particular case the reliability of the regional water supply system Dubovac-Zrenjanin-Kikinda has been assessed, the

system being based on the concept of centralized water supply, in which water is conducted from the different regional sources to the municipal centers, and then distributed to the users.

Key words: reliability, regional water supply system, reliability of mechanical and hydraulic parameters

Redigovano 07.12.2007.