

## METOD ZA ODREĐIVANJE POUZDANOSTI SLOŽENIH VODOVODNIH SISTEMA (NETREL)

Tina DAŠIĆ, Branislav ĐORĐEVIĆ  
Gradevinski fakultet, Beograd  
E-mail: mtina@grf.bg.ac.yu

### REZIME

U radu je prikazana nova metodologija za određivanje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema, koja pored pouzdanosti mehaničkih karakteristika elemenata, uzima u obzir i pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema. Ova metodologija iskorišćena je za formiranje modela NETREL, koji omogućava određivanje pouzdanosti sistema različitih konfiguracija i nivoa složenosti, sa različitim ograničenjima u pogledu hidrauličkih parametara sistema i njihovih vrednosti. Model je analiziran na primerima vodovodnih sistema.

**Ključne reči:** pouzdanost, distributivni sistemi, mrežni sistemi, pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara

### 1. UVOD

Složeni vodoprivredni sistemi, posebno vodovodni sistemi, moraju da zadovolje veoma visoke zahteve u pogledu funkcionalne sigurnosti, s obzirom da otakz tih sistema može dovesti do ozbiljnih ekonomskih, socijalnih i drugih posledica u okruženju. Iako veoma značajni, aspekti probabilitičke efektivnosti se u projektima hidrotehničkih sistema razmatraju dosta okvorno i nepotpuno, uglavnom samo na nivou funkcionalne podobnosti (obezbeđenosti isporuke vode). Kao posledica takvog pristupa realizuju se nedovoljno pouzdani sistemi, koje je potrebno naknadno menjati i dopunjavati. Zbog toga se pristupilo izradi modela koji će omogućiti jednostavan proračun pouzdanosti sistema različitih konfiguracija, sa različitim brojem i rasporedom elemenata koji utiču na pouzdanost (prenosni sistemi - cevovodi, pumpne stanice, idr.), potrošačkih, nepotrošačkih i izvorишnih čvorova u sistemu.

Vodovodni sistemi spadaju u grupu popravljivih sistema i svi osnovni elementi tih sistema su popravljivi, pa se u suštini radi o raspoloživosti elemenata i celog sistema. Međutim, u praksi se ustalo izraz pouzdanost, pa će se u nastavku rada umesto izraza raspoloživost koristiti izraz pouzdanost sistema.

### 2. MODEL ZA ODREĐIVANJE POUZDANOSTI VODOVODNIH DISTRIBUTIVNIH SISTEMA

Vodovodni distributivni sistemi imaju jednu specifičnost koja ih, sa gledišta pouzdanosti, čini složenijim od drugih tehničkih sistema. Da bi vodoprivredni sistemi uspešno obavljali svoju funkciju pored mehaničke pouzdanosti moraju biti zadovoljeni i hidraulički parametri sistema. Drugim rečima, da bi u nekom potrošačkom čvoru bile zadovljene potrebe neophodno je da budu zadovoljena sledeća dva uslova:

1. Razmatrani čvor mora da bude fizički povezan sa nekim izvorишnim čvorom (rezervoar, izvoriste), a ta se verovatnoća obuhvata kroz mehaničku pouzdanost sistema.
2. Pritisak u razmatranom čvoru mora da bude veći od nekog minimalnog zahtevanog pritiska. Ova verovatnoća izražena je pojmom "pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara" (koja bi se mogla nazvati i "pouzdanost protočnosti 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 (ili svim čvorovima) distributivnog sistema biti obezbeđena potrebna količina vode zahtevanog pritiska, pod uslovom da u izvorishnim 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 postavljeni zadatak u određenom vremenskom trenutku.

## 2.1. Mehanička pouzdanost

Mehanička pouzdanost distributivnih sistema određuje se korišćenjem osnovne teoreme dekompozicije binarnih funkcija, a proračun se sprovodi kroz nekoliko celina (podprograma): 1. agregacioni model, 2. dekompozicija sistema i 3. određivanje međupouzdanosti

### 1. Agregacioni model

Agregacionim modelom se jedan složeni sistem veza svodi na jednostavniji (čisto mrežni sistem ili granati sistem veza) sprovodenjem serijsko - paralelnih agregacija (slika 2). Pod serijskom agregacijom podrazumeva se zamena dve veze ( $u - v$  i  $v - w$ ), koje imaju jedan zajednički čvor (čvor  $v$ ), jednom vezom ( $u - w$ ) čija je pouzdanost jednak proizvodu pouzdanosti agregiranih veza  $R_1 \cdot R_2$ . Pod paralelnom agregacijom podrazumeva se zamena dve veze koje povezuju dva ista čvora jednom vezom čija je pouzdanost  $1 - Q_1 \cdot Q_2$ , gde su  $Q_1$  i  $Q_2$  nepouzdanosti razmatranih veza ( $Q_1 = 1 - R_1$ ,  $Q_2 = 1 - R_2$ ). Ovaj način sprovodenja serijskih i paralelnih agregacija primenjuje se u slučajevima kada se određuje pouzdanost nekog od čvorova mreže. U tom slučaju od značaja za pouzdanost je samo razmatrani čvor i konfiguracija sistema, dok ostali čvorovi mreže nemaju direktnog uticaja na pouzdanost, odnosno agregacija tih čvorova ne menja pouzdanost razmatranog čvora.

Pri određivanju pouzdanosti celog sistema navedene agregacije se ne mogu sprovesti na opisani način, jer ukidanje bilo kog čvora utiče na ukupnu pouzdanost sistema. U tom slučaju koristi se metod pouzdanosti K-čvora, prema kom se pod pojmom K-čvora podrazumeva čvor od značaja, a u sistemu mogu postojati i drugi "obični" čvorovi. Serijske agregacije se po ovom metodu, za veze  $u - v$  i  $v - w$ , mogu se sprovesti samo ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova: čvor  $v$  je običan čvor ili sva tri čvora su K-čvorovi, a način agregacije prikazan je na slici 1. Korekcionim

faktorom ( $\Omega$ ) uračunava se neophodnost povezanosti srednjeg K-čvora u serijskoj vezi. Ovaj faktor se prilikom svake serijske agregacije tri K-čvora množi sa  $(1 - Q_1 \cdot Q_2)$ . Nakon sprovodenja svih serijsko-paralelnih agregacija u sistemu, dobijena pouzdanost sistema množi se sa konačnim korekcionim faktorom.

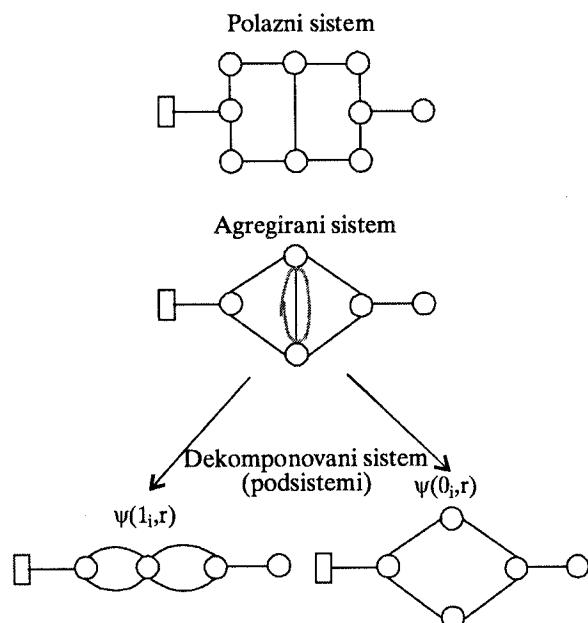


$$\Omega = 1 - Q_1 \cdot Q_2$$

○ K-čvor  
○ običan čvor

Slika 1: Serijska agregacija po metodi K-čvora

Pošto se paralelnim agregacijama ne ukidaju čvorovi, samo se dve ili više veza zamenjuju jednom vezom veće pouzdanosti, paralelne agregacije se po metodi K-čvora računaju na isti način kao ranije opisanom metodom.



Slika 2: Prikaz principa agregacije i dekompozicije sistema

### 2. Dekompozicija sistema

Ako se kao rezultat serijsko - paralelnih agregacija dobije čisto mrežni sistem, znači da se sprovedenim

agregacijama ne može izračunati pouzdanost, pa je neophodno "ukidanje" (redukcija) neke veze sistema. Prilikom redukcije neke veze  $i$  sistem se dekomponuje na dva sistema (slika 2):

- ( $1_i, y$ ) - sistem u kome se prepostavlja da je pouzdanost veze  $i$  jednaka jedinici,
- ( $0_i, y$ ) - za koji se prepostavlja da je pouzdanost veze  $i$  jednaka nuli, tj. da veza ne postoji u sistemu.

Za dobijena dva sistema ( $1_i, y$ ) i ( $0_i, y$ ) određuju se pouzdanosti koje se množe sa  $r_i$  i  $(1 - r_i)$ , respektivno:

$$R = r_i \psi(1_i, r) + (1 - r_i) \psi(0_i, r)$$

gde je:

- $\psi(1_i, r)$  - strukturalna funkcija pouzdanosti sistema ( $1_i, y$ )
- $\psi(0_i, r)$  - strukturalna funkcija pouzdanosti sistema ( $0_i, y$ )

Ako su dobijeni podsistemi i dalje mrežne strukture, tj. agregacijom se ne mogu svesti na granatu strukturu, nastavlja se sa dekompozicijama podistema.

Generalno, dekompozicija se može sprovoditi za bilo koju vezu iz sistema, ali pravilnim izborom veza koje se redukuju proračun se može znatno ubrzati. U ovom modelu za redukciju se bira neka veza sa putanje one veze agregiranog sistema koja ima najveći broj ponavljanja svojih čvorova.

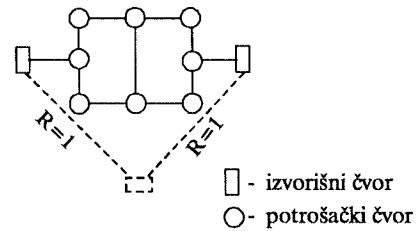
### 3. Određivanje međupouzdanosti

Ako se kao rezultat serijsko - paralelnih agregacija dobije jedna veza ili sistem veza granata strukture, određuje se međupouzdanost, odnosno pouzdanost podistema. Pouzdanost redukovanih sistema koga čini samo jedna veza jednaka je pouzdanosti te veze, jer je u njoj već uračunat uticaj ostalih ukinutih čvorova i veza.

Pouzdanost redukovanih sistema koji čini granatu strukturu zavisi od tipa proračuna, odnosno od pouzdanosti koja se računa. Ako se računa pouzdanost jednog čvora, njegova pouzdanost jednaka je proizvodu pouzdanosti veza koje se nalaze na putanji od izvorišnog čvora do tog čvora. Ako se izvrši ukidanje slepih krajeva i slepih petlji, granata struktura svodi se na jednu vezu. U slučaju kada se računa pouzdanost sistema, ona je jednaka proizvodu pouzdanosti svih veza u redukovanim sistemima, jer otkaz bilo koje veze dovodi do otkaza (neispravnog funkcionisanja) celog sistema.

Distributivni sistemi se vrlo često oslanjaju na nekoliko izvorišta vode, odnosno, u matematičkom smislu, imaju

više od jednog izvorišnog čvora. U tom slučaju neophodno je uvođenje imaginarnog izvorišnog čvora i imaginarnih veza kojima se spajaju stvari izvorišni čvorovi sa imaginarnim (slika 3). Pri tome se prepostavlja da su imaginarnе veze apsolutno pouzdane, tj. njihova pouzdanost jednaka je jedinici. Na ovaj način dobija se sistem sa jednim izvorišnim čvorom, koji se rešava na već opisan način.



Slika 3: Uvođenje imaginarnog čvora i imaginarnih veza u sistem sa više izvorišnih čvorova

## 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 u čvoru zadovoljeni - pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara jednaka je jedinici, a ukupna pouzdanost podistema, koja je jednaka proizvodu mehaničke i pouzdanosti zadovoljenja hidrauličkih parametara, jednaka je mehaničkoj pouzdanosti. U suprotnom, ako su pritisci u čvoru manji od zahtevanih, pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara jednaka je nuli, pa je i ukupna pouzdanost tog podistema jednaka nuli.

Broj hidrauličkih proračuna smanjuje se računanjem pouzdanosti za svaki ( $0_i, y$ ) redukovani sistem. Ako za takav podistem pouzdanost hidrauličkih parametara nije zadovoljena nije potrebno vršiti dalje redukcije tog podistema, jer ni za jedan redukovani podistem tog podistema pouzdanost hidrauličkih parametara neće biti zadovoljena.

$$R = \sum_{i=1}^n R_{meh}(S_i) \cdot R_{hid}(S_i)$$

gde je  $S_i$  - razmatrani podistem, a  $n$  - ukupan broj podistema.

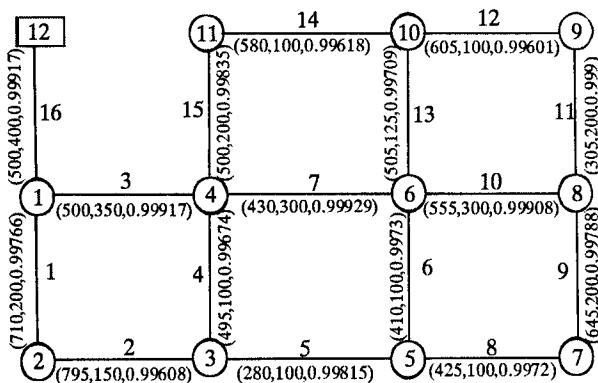
### 3. PRIMERI

#### 3.1. Distributivni gravitacioni vodovodni sistem

Razvijeni model primjenjen je na hipotetičkom vodovodnom sistemu jednog manjeg naselja (slika 4). Sistem se sastoji od 11 potrošačkih čvorova, koji su međusobno povezani sa 15 veza (cevi). Do potrošačkih čvorova voda se iz rezervoara (sa konstantnim nivoom vode  $Z_{12}=123.3$  mm) dovodi gravitaciono. Minimalan potreban pritisak u mreži iznosi 2.5 bara. Razmatrane su pouzdanosti za dva režima potrošnje vode:

- potrebe u času maksimalne potrošnje ( $Q_{\max}^h$ ), i
- potrebe u danu maksimalne potrošnje ( $Q_{\max,dan}$ ), za koje se usvaja da su duplo manje od  $Q_{\max}^h$ , odnosno da je koeficijent neravnomernosti 2.

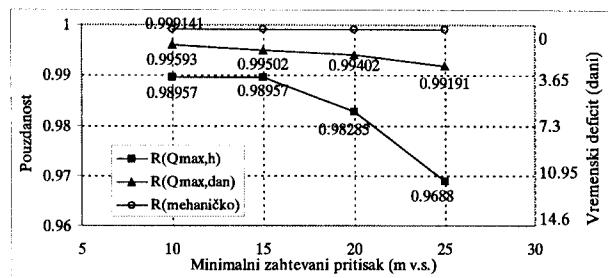
Broj kvarova (defekata) različit je za cevi različitih prečnika (od 0.2 kvara/km·god za cevi prečnika 300 i 400 mm, do 0.8 kvara/km·god za cevi prečnika 100 mm), a odgovara približno srednjoj vrednosti podataka prikupljenih za beogradski vodovod. Pretpostavlja se da vreme popravke kvara, bez obzira na prečnik cevi, iznosi 3 dana.



Slika 4: Šematski prikaz sistema sa karakteristikama veza (dužina, prečnik, pouzdanost)

Rezultati proračuna pokazuju da mehanička pouzdanost razmatranog sistema iznosi oko 0.99916 za čvorove sistema, dok je vrednost te pouzdanosti za sistem kao celinu 0.99914. Rezultati ukupne pouzdanosti čvorova i celog sistema značajno se razlikuju od vrednosti mehaničke pouzdanosti, pa analiza vodoprivrednih sistema samo na osnovu vrednosti mehaničke pouzdanosti može dovesti do pogrešnih zaključaka. Na slici 5 prikazane su vrednosti mehaničke pouzdanosti, kao i ukupne pouzdanosti

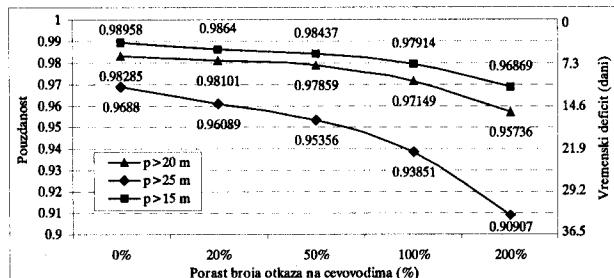
sistema za oba razmatrana nivoa potrošnje, i za različite zahtevane minimalne pritiske u potrošačkim čvorovima sistema.



Slika 5: Ukupna pouzdanost sistema određena za različite zahtevane minimalne pritiske u sistemu

Kao što se može videti pouzdanost, odnosno vremenski deficit vode značajno se menja sa promenom zahtevanog pritiska. U varijanti kada su potrebe na nivou maksimalnih časovnih potreba u sistemu deficit vode iznosi oko 11 dana prosečno godišnje, za slučaj zahtevanog pritiska od 2.5 koji je zakonom propisani minimalni pritisak, i koji omogućava zadovoljavanje potreba korisnika koji se nalaze u objektima do visine trećeg sprata. Za prizemne objekte (potreban pritisak u mreži 1.0 bar) deficit vode smanjuje se na oko 3 dana prosečno godišnje. Za slučaj kada su potrebe korisnika na nivou maksimalnih dnevnih potreba, pouzdanost se naravno značajno povećava, odnosno vremenski deficit vode se smanjuje.

Da bi se sagledao uticaj starenja, odnosno povećanja broja otkaza cevi, na ukupnu pouzdanost sistema, urađena je sledeća analiza. Ukupne pouzdanosti sistema određene su za različite vrednosti povećanja broja otkaza elemenata sistema (20%, 50%, 100% i 200%), kao i za različite zahtevane minimalne pritiske u sistemu. Dobijeni rezultati prikazani su na slici 6.



Slika 6: Promena pouzdanosti u zavisnosti od porasta broja otkaza i minimalnog zahtevanog pritiska u sistemu

Kao što se može videti, pouzdanost sistema se najviše smanjuje za najveći zahtevani minimalni pritisak (25 m) i to za 0.05973, u slučaju povećanja broja otkaza za 200%, što izraženo preko vremenskog deficitita vode iznosi oko 22 dana. U slučaju zahtevanog pritiska vode od 15 m, promena pouzdanosti je znatno manja, pa povećanje vremenskog deficitita vode u ovom slučaju iznosi oko 8 dana.

### 3.2. Distributivni sistem sa pumpanjem vode i većim brojem rezervoara

U ovom primeru razmatra se jedan složeni distributivni sistem, koji se sastoji od 16 potrošačkih čvorova, 37 veza i 3 izvođača (slika 7). Ovaj primer sadrži sve uobičajene elemente i probleme koji se sreću u distributivnim vodovodnim sistemima, pa se često koristi u literaturi, kao primer za prezentaciju ne samo rezultata analize pouzdanosti sistema, već i različitih problema vezanih za dimenzionisanje, hidrauliku i optimizaciju takvih sistema.

Voda za potrebe korisnika se u sistem uvodi pumpanjem iz reke (čvor 10). Pumpna stanica sastoji se od tri paralelno vezana agregata (veze 101, 102 i 103). Pretpostavlja se da pumpe otkazuju 8 puta godišnje i da popravka traje u proseku 52 sata, odnosno pouzdanost svake pumpe iznosi 0.9543.

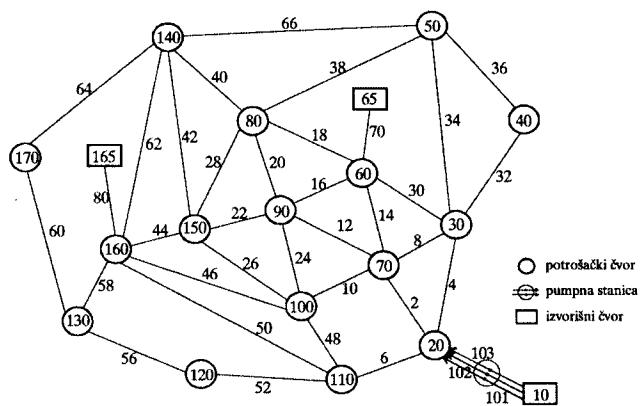
Potrošački čvorovi u ovom sistemu nalaze se u dve visinske zone: čvorovi 30 - 110 nalaze se u prvoj visinskoj zoni, na relativnoj koti terena od 15.24 m, dok se čvorovi 120 - 170 nalaze u drugoj visinskoj zoni, na koti terena od 36.58 m. Karakteristike čvorova date su u tabeli 1.

Osim izvođačnog čvora 10, u sistemu se nalaze i dva rezervoara (čvorovi 65 i 165), koji za proračun pouzdanosti predstavljaju izvođačne čvorove. Karakteristike rezervoara su iste, sa istim minimalnim i maksimalnim kotama vode ( $Z_{\min}=68.6$  m,  $Z_{\max}=76.2$  m).

Potrošački čvorovi povezani su sa izvođačnim čvorovima preko 37 veza (34 cevovoda i 3 pumpe), čije su karakteristike (dužina, prečnik, vrednost Hazen William-ovog koeficijenta, pouzdanost veze) date u tabeli 2. Pretpostavlja se da cevi otkazuju 0.62

puta godišnje po jednom kilometru cevi (izvorni podatak je 1 otkaz po milji godišnje) i da popravka traje u proseku tri dana (72 sata). Jedinična pouzdanost, odnosno pouzdanost po jednom kilometru cevovoda, određena na osnovu navedenih vrednosti iznosi  $R_0=0.99492$ .

Normalan radni pritisak u mreži iznosi  $p=2.75$  bara (ili  $p=27.5$  m), dok je minimalni pritisak koji se zahteva u mreži, odnosno u potrošačkim čvorovima  $p = 1.375$  bara.



Slika 7: Šematski prikaz sistema

Tabela 1: Karakteristike čvorova sistema

čvor	Z (m)	Q (l/s)
10	3.05	
20	6.1	31.5
30	15.24	12.6
40	15.24	12.6
50	15.24	37.9
60	15.24	31.5
65	65.53	
70	15.24	31.5
80	15.24	31.5
90	15.24	63.1
100	15.24	31.5
110	15.24	31.5
120	36.58	25.2
130	36.58	25.2
140	24.38	25.2
150	36.58	25.2
160	36.58	63.1
165	65.53	
170	36.58	25.2

Tabela 2: Karakteristike veza sistema

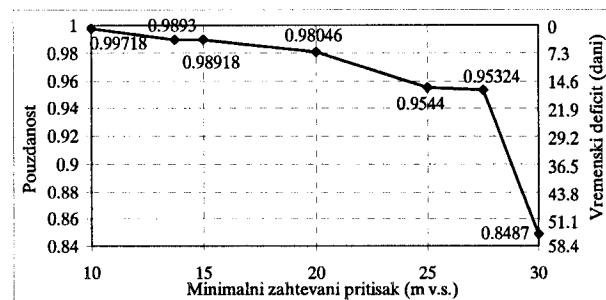
veza	od čvora	do čvora	L (m)	D (mm)	C	Pouzdanost veze
2	20	70	3658	406.4	70	0.98167
4	20	30	3658	304.8	120	0.98167
6	20	110	3658	304.8	70	0.98167
8	30	70	2743	304.8	70	0.98619
10	70	100	1829	304.8	70	0.99075
12	70	90	1829	254.0	70	0.99075
14	60	70	1829	304.8	70	0.99075
16	60	90	1829	254.0	70	0.99075
18	60	80	1829	304.8	70	0.99075
20	80	90	1829	254.0	70	0.99075
22	90	150	1829	254.0	70	0.99075
24	90	100	1829	254.0	70	0.99075
26	100	150	1829	304.8	70	0.99075
28	80	150	1829	254.0	70	0.99075
30	30	60	1829	254.0	120	0.99075
32	30	40	1829	254.0	120	0.99075
34	30	50	2743	254.0	120	0.99075
36	40	50	1829	254.0	120	0.99075
38	50	80	1829	254.0	120	0.99075
40	80	140	1829	254.0	120	0.99075
42	140	150	1829	203.2	120	0.99075
44	150	160	1829	203.2	120	0.99075
46	100	160	1829	203.2	120	0.99075
48	100	110	1829	203.2	70	0.99075
50	110	160	1829	254.0	120	0.99075
52	110	120	1829	203.2	120	0.99075
56	120	130	1829	203.2	120	0.99075
58	130	160	1829	254.0	120	0.99075
60	130	170	1829	203.2	120	0.99075
62	140	160	1829	203.2	120	0.99075
64	140	170	3658	203.2	120	0.98167
66	50	140	3658	203.2	120	0.98167
70	60	65	30	304.8	120	0.99845
80	160	165	30	304.8	120	0.99845
101	10	20	-	-		0.9543
102	10	20	-	-		0.9543
103	10	20	-	-		0.9543

Ispitivanjem hidrauličkih karakteristika sistema došlo se do zaključka da su, sa stanovišta pouzdanosti snabdevanja potrošača vodom, rezervoari kritični elementi sistema. Naime, u slučaju kada su rezervoari puni, dovoljno je da radi samo jedna pumpa u pumpnoj stanici da bi pritisci u svim čvorovima bili zadovoljeni na nivou normalnog radnog pritiska u mreži. U slučaju kada je kota vode u rezervoaru 65 na minimalnom nivou, tj. kada se iz ovog rezervoara ne može obezbediti snabdevanje

potrošača vodom, a u pumpnoj stanici rade sve tri pumpe, pritisci u čvorovima 150 i 170 neće biti zadovoljeni na nivou normalnog radnog pritiska, ali će biti veći od minimalnog zahtevanog pritiska, ili konkretnije, biće veći od 2.5 bara, što znači da neće doći do prekida u vodosnabdevanju. Međutim, u slučaju isključenja rezervoara 165 iz rada, čak i u uslovima kada rade sve tri pumpe i sa kotom u drugom rezervoaru na maksimalnom nivou, svi potrošački čvorovi druge visinske zone ostali bi bez vode, odnosno, pritisci u njima bi pali ispod minimalnog zahtevanog pritiska. Iz ovoga se jasno zaključuje da je rezervoar 165 kritični element u sistemu, od koga presudno zavisi snabdevanje korisnika druge visinske zone.

Razultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema, pokazuju da je pouzdanost najvećeg broj potrošačkih čvorova veoma velika i bliska 1. Ovakvi rezultati mogli su se očekivati s obzirom na veoma dobru povezanost mreže, u kojoj je najveći broj čvorova povezan sa po 4 - 5 veza. Od ovoga odstupaju čvorovi 40, 120 i 170, koji su sa ostalim čvorovima sistema povezani samo sa po dve veze, zbog čega je mehanička pouzdanost ovih čvorova nešto manja od 1.

Rezultati ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti sistema, za različite zahtevane minimalne pritiske u sistemu, dati su na slici 8. Za hidraulički proračun usvojena je pretpostavka da su rezervoari puni u trenutku otkaza neke od cevi. Vrednosti pouzdanosti dobijene na ovaj način, naravno, manje su od vrednosti mehaničke pouzdanosti, ali su relativno velike, zbog dobre povezanosti sistema i rasporeda rezervoara.



Slika 8: Promena pouzdanosti i deficit-a vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u sistemu

Rezultati pouzdanosti pojedinih čvorova pokazuju da je čvor 170, sa stanovišta pouzdanosti, kritičan, što se i moglo očekivati s obzirom da se nalazi u drugoj visinskoj zoni, a sa ostalim delom sistema vezan je samo preko dve veze. U slučaju otkaza veze sa rezervoarom 165, iz hidrauličkih razloga, ne postoji mogućnost da se do ovog čvora dopremi voda iz nekog drugog izvorišta. Slično se dešava i sa čvorom 130, koji je sa sistemom povezan preko tri veze, ali u slučaju otkaza veze sa rezervoarom 165, hidraulički ne postoji mogućnost da se do njega dopremi voda. Vremenski deficiti vode za ove čvorove iznosi oko 4 dana, što je veoma blisko pouzdanosti, odnosno vremenskom deficitu vode za celi sistem. Razlog za ovakve rezultate je činjenica da do deficita vode u čvorovima 130 i 170 dolazi prilikom otkaza istih veza u sistemu, a to su ujedno i otkazi koji najviše utiču na pouzdanost celog sistema, jer se javljaju prilikom otkaza samo jedne veze u sistemu.

Za razliku od prethodno opisanih čvorova, čvor 120, iako se nalazi u drugoj visinskoj zoni, i vezan je sa mrežom preko samo dve veze, ima dosta veću pouzdanost, odnosno vremenski deficit vode je gotovo četiri puta manji i iznosi oko jednog dana prosečno godišnje. Razlog za ovo je činjenica da se čvor 120 nalazi na granici prve i druge visinske zone, odnosno da se u slučaju otkaza veze sa rezervoarom 165 do tog čvora, generalno, može dopremiti voda iz preostalih izvorišta.

Pouzdanost celog sistema za slučaj kada se u rezervoarima 65 i 165 nalazi polovina od ukupne količine vode (kote nivoa vode u rezervoarima iznose 72,9 m) pouzdanost sistema je nešto manja i iznosi 0,988362. Vremenski deficit u ovom slučaju iznosi 102 časa, što je samo za nekoliko časova više od slučaja kada su rezervoari puni. Ovako mala razlika vremenskog deficita vode u sistemu, u navedena dva slučaja nivoa vode u rezervoarima, posledica je činjenice da u oba slučaja do otkaza sistema dolazi prilikom otkaza veze sa rezervoarom 165 (veza 80), odnosno dovoljno je da otkaže samo ta veza (sve ostale veze u sistemu mogu da rade) pa da dođe do otkaza sistema. Naravno, takvi slučajevi najviše doprinose nepouzdanosti (odnosno smanjenju pouzdanosti) sistema, pa na taj način neće doći do značajnog smanjenja pouzdanosti. Izvesno smanjenje

pouzdanosti javlja se kao rezultat hidrauličkih mogućnosti dopremanja vode do određenih čvorova, u slučaju sniženja kote vode u rezervoarima.

#### 4. ZAKLJUČAK

Razvijeni model (NETREL) za određivanje pouzdanosti vodoprivrednih sistema efikasan je softver koji, pored odradivanja mehaničke pouzdanosti omogućava i određivanje ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti sistema različitih konfiguracija (od regionalnih sistema pretežno granate strukture, do gradskih distributivnih sistema sa velikim brojem zatvorenih struktura). Pored toga moguće je određivanje pouzdanosti na nivou celog sistema, kao i pouzdanosti pojedinih potrošačkih čvorova sistema, što je veoma značajno i za regionalne sisteme, u kojima deficit vode potrošačkog čvora predstavlja ujedno i deficit vode čitavog konzumnog područja (umanjeno za moguće snabdevanje vodom iz gradskih rezervoara), i za distributivne sisteme, u kojima se potrošačkim čvorovima predstavljaju neki značajni korisnici kao što su bolnice, škole, značajni privredni objekti i sl.

#### LITERATURA

- [1] Beim G. and Hobbs B.: *Analitical simulation of water system capacity reliability, 2. A Markov chain approach and verification of the models*, Water Resources Research, Vol. 24, No. 9, 1988.
- [2] Beim G. and Hobbs B.: *Analitical simulation of water system capacity reliability, 2. A Markov chain approach and verification of the models*, Water Resources Research, Vol. 24, No. 9, 1988.
- [3] Dhillon B. S. and Singh C.: *Engineering reliability, new techniques and applications*, A Wiley-Interscience, 1981.
- [4] Đorđević B.: *Ugradivanje pouzdanosti i pogodnosti održavanja u projekte hidrotehničkih sistema*, Vodoprivreda, 169-170(5-6/1997), Beograd, 1997.
- [5] Gargano R. and Pianese D.: *Reliability as tool for hydraulic network planning*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 5, 2000.
- [6] Goulter I. C. and Bouchart F.: *Reliability-constrained pipe network model*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.116, No. 2, 1990.

- [7] Henley E. J. and Kumamoto H.: *Reliability engineering and risk assessment*, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, N.J., 1981.
- [8] Nahman J. M.: *Dependability of engineering systems - modeling and evaluation*, Springer, 2002.
- [9] Wagner J., Shamir U., Marks D.: *Water distribution reliability: analytical methods*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, 1988.
- [10] Walski T. M.: *Practical aspects of providing reliability in water distribution systems*, Reliability Engineering and System Safety, Vol.42, 1993.

## METHOD FOR WATER DISTRIBUTION SYSTEMS RELIABILITY EVALUATION

by

Tina DAŠIĆ, Branislav ĐORĐEVIĆ  
Faculty of Civil Engineering

### Summary

New methodology for water resources systems reliability evaluation is presented. Proposed methodology considers both: mechanical reliability (probability of pipe failure) and reliability of hydraulic parameters in nodes and links (pressure, velocity). On the base of this methodology model NETREL was developed. This model is useful for determining reliability

of systems with different configurations and complexity. Also, it makes possible restriction of various hydraulic parameters and their values. Model was analyzed on different water supply systems.

**Key words:** reliability, water supply systems, networks, reliability of hydraulic parameters

Redigovano 28.05.2003.