

METOD ZA ODREĐIVANJE POUZDANOSTI SLOŽENIH VODOVODNIH SISTEMA (NETREL)

Tina DAŠIĆ, Branislav ĐORĐEVIĆ
Građevinski 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 različite konfiguracije 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 otkaz tih sistema može dovesti do ozbiljnih ekonomskih, socijalnih i drugih posledica u okruženju. Iako veoma značajni, aspekti probabilističke 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 različite konfiguracije, sa različitim brojem i rasporedom elemenata koji utiču na pouzdanost (prenosni sistemi - cevovodi, pumpne stanice, idr.), potrošačkih, nepotrošačkih i izvorišnih 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 ustalio 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 zadovoljene potrebe neophodno je da budu zadovoljena sledeća dva uslova:

1. Razmatrani čvor mora da bude fizički povezan sa nekim izvorišnim čvorom (rezervoar, izvorište), 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 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 postavljeni zadatak u određenom vremenskom trenutku.

2.1. Mehanička pouzdanost

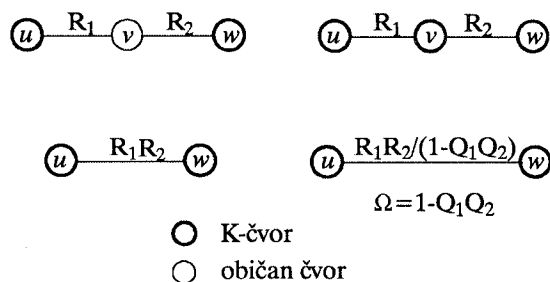
Mehanička pouzdanost distributivnih sistema određuje se korišćenjem osnovne teoreme dekompozicije binarnih funkcija, a proračun se sprovodi kroz nekoliko celina (podprograma): 1. agregacioni model, 2. dekompozicija sistema i 3. određivanje međupouzdanosti

1. Agregacioni model

Agregacionim modelom se jedan složeni sistem veza svodi na jednostavniji (čisto mrežni sistem ili granati sistem veza) sprovođenjem 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 jednaka 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 sprovođenja 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.

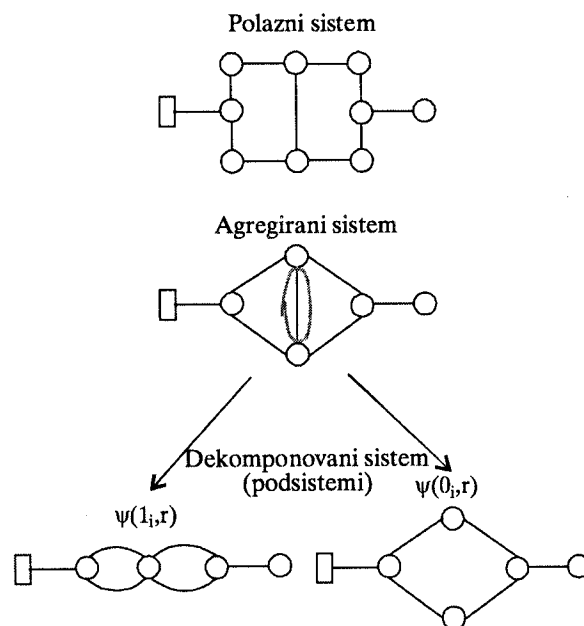
Pri određivanju pouzdanosti celog sistema navedene agregacije se ne mogu sprovesti na opisani način, jer ukidanje bilo kog čvora utiče na ukupnu pouzdanost sistema. U tom slučaju koristi se metod pouzdanosti K-čvora, prema kom se pod pojmom K-čvora podrazumeva čvor od značaja, a u sistemu mogu postojati 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 (Ω) 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 sprovođenja svih serijsko-paralelnih agregacija u sistemu, dobijena pouzdanost sistema množi se sa konačnim korekcionim faktorom.



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-čvorova 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 pretpostavlja da je pouzdanost veze i jednaka jedinici,
- $(0_i, y)$ - za koji se pretpostavlja 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:

- $\psi(1_i, r)$ - strukturna funkcija pouzdanosti sistema $(1_i, y)$
- $\psi(0_i, r)$ - strukturna 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 podsistema.

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.

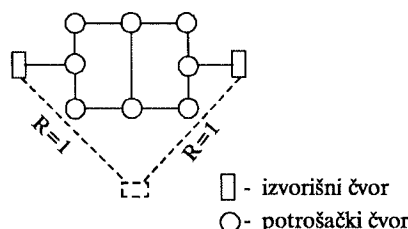
3. Određivanje međupouzdanosti

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

Pouzdanost redukovano 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 redukovanom sistemu, 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 stvarni izvorišni čvorovi sa imaginarnim (slika 3). Pri tome se pretpostavlja da su imaginarne 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 podsistema, 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 podsistema jednaka nuli.

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

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

gde je S_i - razmatrani podsistem, a n - ukupan broj podsistema.

Tabela 2: Karakteristike veza sistema

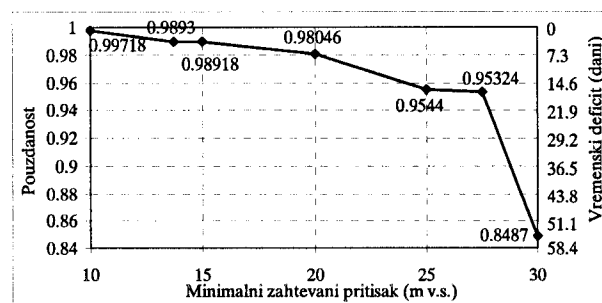
veza	od čvora	do čvora	L (m)	D (mm)	C	Pouzdanost veze
2	20	70	3658	406.4	70	0.98167
4	20	30	3658	304.8	120	0.98167
6	20	110	3658	304.8	70	0.98167
8	30	70	2743	304.8	70	0.98619
10	70	100	1829	304.8	70	0.99075
12	70	90	1829	254.0	70	0.99075
14	60	70	1829	304.8	70	0.99075
16	60	90	1829	254.0	70	0.99075
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 deficita 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 deficit 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 otkaze 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 odrađivanja 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.: *Analytical 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.: *Analytical 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.: *Ugrađivanje 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.