



**SAVEZ GRAĐEVINSKIH  
INŽENJERA SRBIJE  
- BEOGRAD -**

# **GRAĐEVINSKI KALENDAR**

**2011**



CIP – Каталогизacija u publikaciji  
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

624(059)

**GRAĐEVINSKI kalendar** / glavni i odgovorni urednik Mihailo Muravljev. - 1970-  
Beograd : Savez građevinskih inženjera  
Srbije, 1970 - (Novi Sad : Štamparija  
Budućnost). - 14 cm

Godišnje

ISSN 0352 - 2733 = Građevinski kalendar

COBISS.SR-ID 43031

## UREDNIŠTVO

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK  
Prof.dr Mihailo Muravljev, dipl. inž. građ.

### REDAKCIONI ODBOR:

Prof.dr Radomir Folić, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Dušan Joksić, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Slobodan Ćorić, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Mirko Ačić, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Zoran Radić, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Vlastimir Radonjanin, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Milan Dimkić, dipl.inž.građ.  
Dr Slobodan Otović, dipl.inž.građ.  
Dr Slobodan Cmiljanić, dipl.inž.geolog

### RECENZENTI:

Prof.dr Mihailo Muravljev, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehnol.  
Dr Nada Denić, dipl.inž.tehnol.  
Prof.dr Čedomir Ilić, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Dejan Ljubisavljević, dipl.inž.građ.  
Prof.dr Slobodan Ašanin, dipl.inž.geodezije

## TEHNIČKI UREDNIK:

*Mr Aleksandar Đukić, dipl.inž.građ.*

## IZDAVAČ:

*Savez građevinskih inženjera Srbije  
Beograd, Knez Miloša br. 9/I, tel./faks: (011) 3241-656*

Tiraž: 600 primeraka

*Štampa:  
Štamparija Budućnost  
Novi Sad, Šumadijska 12*



Doc. dr Tina Dašić, dipl.inž.grad.<sup>1</sup>  
Prof. dr Branislav Đorđević, dipl.inž.grad<sup>2</sup>

## NOVI PRISTUPI PRI ODREĐIVANJU POUZDANOSTI SLOŽENIH VODOPRIVREDNIH SISTEMA POD PRITISKOM

0352-2733, 43, (2010), p. 280-317

UDK: 626/628:519.873  
IZVORNI NAUČNI ČLANAK

### Rezime

U radu je prikazan nov pristup pri određivanju pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema pod pritiskom. Ovaj pristup podrazumeva da se pored pouzdanosti mehaničkih karakteristika elemenata, uzima u obzir i pouzdanost zadovoljavanja hidrauličkih parametara sistema. Metodologija je iskorišćena 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 primeru jednog vodovodnog sistema.

<sup>1</sup> Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu  
Rad primljen septembra 2010.

<sup>2</sup> Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu  
Rad primljen septembra 2010.

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

## NEW METHOD FOR COMPLEX WATER RESOURCES SYSTEMS RELIABILITY EVALUATION

### Abstract

A new methodology for water resources systems reliability evaluation is presented. The proposed methodology considers both: mechanical reliability (probability of pipe failure) and reliability of hydraulic parameters in the nodes and links (pressure, velocity). On the basis of this methodology the model NETREL was developed. This model is useful for determining reliability of systems with different configurations and complexity. Model was analyzed on a water supply system.

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

### 1. UVOD - PROBABILISTIČKA EFEKTIVNOST

Teorija pouzdanosti jedna je od oblasti koja je doživela veoma brz razvoj i široku primenu poslednjih decenija. Tako brz razvoj podstaknut je realizacijom sve složenijih i bezbednostno sve delikatnijih sistema razli-



čitih namena, za čije je planiranje, realizaciju i eksploataciju neophodan odgovarajući analitički aparat Teorije pouzdanosti. Ova se oblast posebno brzo razvijala i primenjivala u oblastima mašinske i elektromašinske industrije, i to za analizu bezbednostno najdelikatnijih sistema: kosmičke letelice, avio industrija, vojni uređaji, nuklearne elektrane i slično.

U oblasti vodoprivrednih sistema teorija pouzdanosti počinje značajnije da se razvija i primenjuje tek poslednjih godina, sa formiranjem regionalnih vodoprivrednih sistema složenih konfiguracija, sa velikim brojem različitih postrojenja i uređaja, i sa naglim povećanjem broja veza u sistemu. Pred tako složene i značajne sisteme obično se postavljaju i veoma ozbiljni zahtevi u pogledu njihovog funkcionisanja, s obzirom da neispunjavanje funkcije u nekom dužem vremenu (nekoliko dana) može dovesti do ozbiljnih socijalnih negodovanja, ekonomskih i drugih posledica.

Osnovne performanse vodoprivrednih sistema (VS) definišu se preko četiri grupe svojstava:

- *kvantitativna efektivnost* - sposobnost VS da realizuje ciljeve koji su iskazani količinskim pokazateljima (moguća isporuka vode korisnicima, garantovani protoci u sistemu, snaga i moguća proizvodnja energije i sl.);
- *ekonomska efektivnost* - pokazatelji kojima se iskazuju ekonomske performanse VS, najčešće iskazani u specifičnom vidu ( $\text{din}/\text{m}^3$  - kao pokazatelj koštanja

isporučene vode potrošačima,  $\text{din}/\text{kW}$  i  $\text{din}/\text{kWh}$  kod hidroenergetskih objekata i sl.);

- *vremenska efektivnost* - radna svojstva VS koja se iskazuju vremenskim kategorijama;
- *probabilistička efektivnost* - kategorije radnih performansi VS koje se iskazuju verovatnoćom.

Za razliku od prve tri efektivnosti koje se detaljno razmatraju i vrednuju postojećim metodologijama, probabilistička efektivnost, iako veoma značajna, razmatrala se dosta okvirno i nepotpuno, uglavnom samo na nivou funkcionalne podobnosti (obezbeđenost isporuke vode).

Ključni zahtevi probabilističke efektivnosti koji se postavljaju pri projektovanju hidrotehničkih objekata i sistema mogu se sistematizovati u sledećih nekoliko kategorija [3]:

1. *Funkcionalna podobnost - obezbeđenost isporuke vode* predstavlja ključnu performansu koja se odnosi na izvorište. Definiše se verovatnoćom sa kojom se može očekivati isporuka određene količine vode iz izvorišta (akumulacija ili izvorište podzemne vode). Može se definisati kao vremenska i zapreminska obezbeđenost.

2. *Pouzdanost objekata i sistema* je važna performansa sistema koja izražava sposobnost sistema da ispuni zadate funkcije bez otkaza, pod uslovom da je na početku rada sistem radio normalno. Ovo je veoma važna performansa vodoprivrednih sistema, posebno onih sistema koji su formirani od serijski povezanih elemenata. Takvi su



npr. regionalni vodovodni sistemi, u kojima su dugački cevovodi (koji se sa gledišta pouzdanosti mogu tretirati kao veliki broj serijski vezanih segmenata) najosetljiviji delovi.

3. *Pogodnost održavanja i obnavljanja* je posebno važno svojstvo sistema koje treba sagledati još u fazi projektovanja i ugraditi u dispoziciju projektog rešenja. Pogodnost održavanja je karakteristika sistema koja označava sposobnost sistema da se zadrži u operativnom stanju sprovođenjem aktivnosti održavanja.

4. *Operativna gotovost sistema* predstavlja sposobnost sistema da izvrši zadatak kada se to od njega zatraži. Definiše se funkcijom raspoloživosti koja predstavlja verovatnoću da sistem može izvršiti zahtevanu funkciju u nekom vremenskom trenutku  $t$ . Na operativnu gotovost odlučujuće utiče veličina intenziteta popravke, pa se mora posmatrati paralelno sa analizom pogodnosti održavanja.

5. *Pouzdanost konstrukcije*, u opštem slučaju, definiše se verovatnoćom da će radno opterećenje konstrukcije biti manje od kritične nosivosti. Tradicionalan pristup proračuna stabilnosti polazi od neke pretpostavljene šeme opterećenja i neke definisane merodavne otpornosti konstrukcije. Prema tom determinističkom prilazu, iz stohastičkih funkcija radnog opterećenja i kritične nosivosti izdvajaju se merodavne vrednosti i sigurnost se definiše preko koeficijenta sigurnosti koji mora biti veći od neke referentne vrednosti (koja je naravno uvek veća od

jedan). Međutim, pošto je reč o slučajnim procesima koji zavise od mehaničkih, geofizičkih i drugih stohastičkih uticaja pouzdanost elementa / objekta koji je izložen dejstvu radnog opterećenja dobija se kao verovatnoća da otpornost elementa nije prekoračena radnim opterećenjem.

6. *Hidraulička pouzdanost* je poseban vid konstrukcijske sigurnosti onih objekata čija je bezbednost ugrožena u slučajevima kada radni nivo i/ili protok u nekom segmentu sistema prevaziđe neku kritičnu vrednost, usled čega dolazi do preliivanja objekta. Taj problem se prevazilazi usvajanjem tzv. računске velike vode za dimenzionisanje preliiva i nadvišavanjem konstrukcije u odnosu na kritične nivoe.

7. *Upravljačka podobnost sistema* podrazumeva takvo projektovanje upravljačkih uređaja da se upravljačka pouzdanost čoveka, kao upravljačkog elementa sistema, poveća do zahtevane granice.

8. *Pouzdanost oskultacionog i monitoring sistema* i njegovo dovođenje na zahtevan nivo - važan je aspekt planiranja određenih sistema. U slučaju visokih brana od oskultacionog sistema odlučujuće zavisi bezbednost samog objekta kao i nizvodnog područja, dok u slučaju dugačkih magistralnih cevovoda od ovog sistema zavisi brzina detekcije (pa samim tim i popravke) kvara.

9. *Bezbednost sistema u odnosu na izvanredne događaje u okruženju* postavlja se samo kod velikih i spe-



cifičnih objekata. Ova pouzdanost odnosi se na uticaj vanrednih događaja u okruženju na bezbednost objekta i sistema.

Od opisanih devet parametara probabilističke efektivnosti u projektima vodoprivrednih sistema razmatran je do nedavno samo jedan - obezbeđenost isporuke vode. Iako veoma značajan, to je samo jedan od parametara koje treba analizirati. Druge dve odlučujuće važne pouzdanosti, pouzdanost konstrukcije i hidraulička pouzdanost, obuhvataju se u projektima posredno: prva, preko koeficijenata sigurnosti, druga, preko merodavnih računskih voda koje objekat treba bezbedno da propusti. Ovo je prilika da se prikaže nov pristup analize mehaničko-hidrauličke pouzdanosti funkcija mrežnih sistema pod pritiskom, čija se dimenzionalnost eksplozivno uvećava tokom vremena.

## 2. METODE ANALIZE POUZDANOSTI

Kao što je već istaknuto, pod pojmom pouzdanosti sistema podrazumeva se ona karakteristika sistema kojom se izražava verovatnoća da će sistem izvršiti traženu funkciju pod određenim radnim uslovima i tokom određenog vremenskog perioda. Pod pojmom "sistem" podrazumeva se skup elemenata koji mogu biti povezani na različite načine: od jednostavnih serijskih i paralelnih struktura do složenih mreža elemenata.

Osnovni princip proračuna pouzdanosti je "odozdo na više", što znači da se prvo određuju pouzdanosti elemenata sistema, a zatim se, zavisno od njihovih veza (uloge u funkcionisanju sistema), određuju pouzdanosti podsistema višeg reda do konačne pouzdanosti celog sistema. Prema tome, svaki element svoje karakteristike pouzdanosti prenosi na sistem višeg reda, pri čemu uticaj elementa zavisi od načina njihove povezanosti u veće celine - podsysteme.

Problematika vezana za određivanje pouzdanosti pojedinih elemenata, kao i sistema jednostavnijih (serijskih i paralelnih) struktura detaljno je opisana u Građevinskom kalendaru iz 1999. godine [3], pa se ovde neće ponavljati. Treba samo naglasiti da elementi vodoprivrednih sistema spadaju u grupu popravljivih elemenata, pod kojima se podrazumevaju oni elementi koji se nakon popravke mogu vratiti u operativno stanje. Za takve elemente se definiše funkcija raspoloživosti  $A_i(t)$ , kao verovatnoća da će element raditi (ili biti raspoloživ) u nekom vremenskom trenutku  $t$ :

$$A_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)t} \quad (1)$$

U slučajevima dugog rada elementa (što je čest slučaj sa elementima vodoprivrednih sistema), kada  $t \rightarrow \infty$ ,



raspoloživost elementa teži konstantnoj vrednosti, tj. stacionarnom koeficijentu raspoloživosti:

$$A_i = \lim_{t \rightarrow \infty} A_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (2)$$

Za određivanje pouzdanosti složenih (mrežnih) sistema koriste se različite metodologije, a u ovom pristupu koristi se princip dekompozicije binarnih funkcija, koji će biti sažeto prikazan u nastavku rada.

Za sisteme sa statistički međusobno nezavisnim otkazima elemenata moguće je direktno dobiti funkciju pouzdanosti korišćenjem koncepta strukturne funkcije ([8], [9]). Prema ovom konceptu svakom elementu sistema  $C_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) pridružuje se binarna slučajna promenljiva  $y_i(t)$ , koja se naziva indikator stanja, a definiše se za svaki vremenski trenutak  $t \geq 0$  na sledeći način:

$$y_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{ako je element ispravan} \\ 0, & \text{ako element nije ispravan} \end{cases} \quad (3)$$

Pretpostavlja se da je u trenutku  $t=0$  element ispravan, tj.  $y_i(0)=1$ , a zatim u nekom slučajnom vremenu  $t$  prelazi u neispravno stanje, tj. stanje otkaza  $y_i(t)=0$ . Kada je reč o popravljivom elementu, nakon nekog vremena (vremena popravke) indikator stanja ponovo postaje jednak jedinici, tj. element prelazi u ispravno stanje.

Kada se posmatra sistem kao celina stanja elemenata se opisuju vektorom indikatora stanja:

$$y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)) \quad (4)$$

dok se stanje sistema opisuje indikatorom ispravnosti sistema  $h(t)$ , koji se definiše analogno indikatoru stanja elementa:

$$h(t) = \begin{cases} 1, & \text{ako je sistem ispravan} \\ 0, & \text{ako sistem nije ispravan} \end{cases} \quad (5)$$

Strukturna funkcija sistema je binarna funkcija vektora slučajnih binarnih promenljivih koja predstavlja stanje ispravnosti sistema u funkciji ispravnosti njegovih elemenata. Strukturna funkcija zavisi od zadatka koji sistem treba izvršiti i veze elemenata u sistemu, odnosno uloge elemenata u izvršavanju zadatka sistema.

Međutim, u praksi se često sreću složene strukture sistema - mrežne strukture, koje nisu kombinacija serijskih i paralelnih veza. Ova konstatacija važi i za vodoprivredne sisteme, posebno za distributivne sisteme, kod kojih se u cilju povećanja pouzdanosti sistema dodaju veze koje čine zatvorene, prstenaste, odnosno mrežne strukture.

Strukturne funkcije složenih (mrežnih) sistema mogu se odrediti na više načina: korišćenjem osnovne teoreme



dekompozicije binarnih funkcija, tablicama istinitosti (koje se zasnivaju se na principu potpune enumeracije), metodom minimalnih puteva i minimalnih preseka (za koherentne sisteme) i dr.

Korišćenje osnovne teoreme dekompozicije binarnih funkcija je metod kojim se direktno dobija strukturalna funkcija sistema. Ako se sa  $(1_i, y)$  i  $(0_i, y)$  označe vektori  $y$  čija  $i$ -ta komponenta ima vrednost 1 i 0, respektivno, odnosno

$$\begin{aligned} (1_i, y) &= (y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, 1, y_{i+1}, \dots, y_N) \quad \text{i} \\ (0_i, y) &= (y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, 0, y_{i+1}, \dots, y_N), \end{aligned} \quad (6)$$

onda se bilo koja funkcija  $N$ -tog reda može predstaviti u obliku:

$$h(y) = y_i \cdot h(1_i, y) + (1 - y_i) \cdot h(0_i, y) \quad (7)$$

Redukcija elemenata se sprovodi dok se ne dobije serijsko - paralelni sistem za koji se strukturalna funkcija može lako odrediti.

Za sisteme sa međusobno nezavisnim otkazima iz strukturalne funkcije  $h(y)$  moguće je direktno dobiti funkciju pouzdanosti sistema  $R$ :

$$R = \psi(r_1, r_2, \dots, r_N) = \psi(r) \quad (8)$$

ako su poznate pouzdanosti elemenata sistema  $r_i(t)$ ,  $i=1, \dots, N$ .

Funkcije pouzdanosti složenih (mrežnih) sistema mogu se dobiti korišćenjem osnovne teoreme dekompozicije, zamenom indikatora stanja sa vrednostima pouzdanosti elemenata:

$$R = \psi(r) = \psi(r_1, r_2, \dots, r_N) = r_i \cdot \psi(1_i, r) + (1 - r_i) \cdot \psi(0_i, r) \quad (9)$$

gde je:

$$\begin{aligned} (1_i, r) &= (r_1, r_2, \dots, r_{i-1}, 1, r_{i+1}, \dots, r_N) \\ (0_i, r) &= (r_1, r_2, \dots, r_{i-1}, 0, r_{i+1}, \dots, r_N) \end{aligned} \quad (10)$$

### 3. METODOLOGIJA ZA ODREĐIVANJE POUZDANOSTI VODOPRIVREDNIH SISTEMA

Vodoprivredni distributivni sistemi imaju jednu specifičnost koja ih, sa gledišta pouzdanosti, čini složenijim od niza drugih sistema. Da bi vodoprivredni (distributivni) sistemi uspešno obavljali svoju funkciju pored mehaničke pouzdanosti mora biti zadovoljena i hidraulika sistema. Drugim rečima, da bi u nekom potrošačkom čvoru bile zadovoljene potrebe (u pogledu zahtevanih količina vode i zahtevanog pritiska) neophodno je da taj čvor bude fizički povezan sa nekim izvorišnim čvorom (rezervoar, izvorište), kao i da pritisak u čvoru bude veći



od nekog minimalnog zahtevanog pritiska. Ova neophodnost zadovoljenja pritiska u čvorovima osnovna je razlika između vodoprivrednih sistema i nekih drugih sistema slične strukture (kao što su to npr. elektromehanički sistemi), kod kojih je prvi uslov, fizička povezanost, potreban i dovoljan uslov pravilnog funkcionisanja.

Iz gore navedenog može se zaključiti da se pod pojmom "mehanička pouzdanost" (koja bi se mogla nazvati i "pouzdanost veza") podrazumeva verovatnoća da će između čvorova sistema (jedan ili više njih) i izvorišnih čvorova postojati bar jedna putanja koja se ne nalazi u stanju otkaza. Zadovoljenje mehaničke pouzdanosti 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 sistema biti zadovoljeni i zahtevani pritisci. Ova verovatnoća izražena je pojmom "pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara". Ovaj izraz ne treba poistovećivati sa pojmom hidrauličke pouzdanosti sistema koji je pominjan u uvodnom delu rada.

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 zahte-

vanog 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) - *connectivity* - verovatnoća da će svaki potrošački čvor ispuniti zahtevanu funkciju u određenom vremenskom trenutku  $t$ ,  $i$
- pouzdanost čvora - *reachability* - verovatnoća da će određeni potrošački čvor obavljati postavljeni zadatak u vremenskom trenutku  $t$ .

Pored opisane dve mere pouzdanosti, koje nam daju celovitu predstavu o pouzdanosti čvorova i sistema, često se u praksi pouzdanost sistema računa na osnovu pouzdanosti čvorova. U tom smislu mera pouzdanosti sistema najčešće se definiše na sledeća tri načina ([11]):

1. Pouzdanost sistema određena kao minimalna čvorna pouzdanost u sistemu:

$$R_S = \min(R_i), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

2. Pouzdanost sistema određena kao aritmetička sredina (srednja vrednost) čvornih pouzdanosti u sistemu:



$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (12)$$

3. Pouzdanost sistema određena kao ponderisana srednja vrednost čvornih pouzdanosti u sistemu:

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} = \sum_{i=1}^N w_i R_i \quad (13)$$

gde je  $R_s$  - pouzdanost sistema,  $R_i$  pouzdanost čvora  $i$ ,  $N$  ukupan broj potrošačkih čvorova u sistemu,  $w_i$  - težinski koeficijent koji određuje stepen značaja potrošačkog čvora u sistemu na osnovu protoka ( $Q_i$ ) koji se u njemu zahteva i iznosi:

$$w_i = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (14)$$

Pouzdanost distributivnih sistema određuje se pod sledećim pretpostavkama:

- čvorovi u sistemu su idealni, tj. njihova pouzdanost je jednaka jedinici,

- veze u sistemu otkazuju nezavisno.

Pošto se zatvarači, hidranti, vazdušni ventili i drugi slični objekti distributivnih sistema predstavljaju vezama male dužine i odgovarajuće pouzdanosti, prva pretpostavka ne predstavlja ograničenje u pogledu moguće detaljnosti (složenosti) matematičkog modela realnog sistema.

Druga pretpostavka - nezavisnost otkaza veza u sistemu - može biti podložna diskusiji. Činjenica je da zbog popravke na jednoj vezi može biti neophodno zatvaranje ne samo te, već i nekih susednih veza, što naravno, zavisi od rasporeda zatvarača u okolini veze koja je otkazala. Pored toga, isključenje iz rada jedne veze može prouzrokovati povećane pritiske u drugim cevima, što utiče na povećanje intenziteta otkaza tih cevi. Neke vanredne okolnosti (npr. ako dubina smrzavanja dostigne dubinu ukopavanja cevovoda, pojava hidrauličkog udara, sleganje, i slično) mogu prouzrokovati istovremeni otkaz većeg broja veza. Iako se određeni tipovi zavisnih otkaza mogu uključiti u analize pouzdanosti, u modelima pouzdanosti vodoprivrednih sistema ovi uticaji se po pravilu ne uzimaju u obzir, pa se pretpostavlja da napred navedene pretpostavke važe.



### 3.1 Mehanička pouzdanost

Mehanička pouzdanost vodoprivrednih sistema pod pritiskom određuje se korišćenjem osnovne teoreme dekompozicije binarnih funkcija. Pod pojmom vodoprivrednih sistema pod pritiskom podrazumevaju se: regionalni vodovodni sistemi kojima se voda transportuje od nekog izvorišta (akumulacija, izvorište podzemne vode) do potrošača, pri čemu se pod potrošačima podrazumevaju određena naselja; distributivni vodovodni sistemi naselja, kojim se modelira distribucija vode unutar samog naselja, pri čemu se modelima pouzdanosti uglavnom modeliraju samo glavne cevi, bez ulaženja u neke detaljnije opise sistema, koji bi značajno povećali vreme proračuna, bez značajnijeg uticaja na rezultate proračuna; sistemi za navodnjavanje pod pritiskom i dr.

Iako je sam metod proračuna mehaničke pouzdanosti isti za sve opisane klase vodoprivrednih sistema, jasno je da su u proračunskom smislu regionalni i sistemi za navodnjavanje mnogo jednostavniji, zbog manjeg broja petlji i samim tim brže agregacije do serijsko - paralelnih sistema.

Proračun mehaničke pouzdanosti sastoji se od nekoliko celina (podprograma): 1. agregacioni model, 2. redukcija sistema i 3. određivanje međupouzdanosti

#### 3.1.1 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  $R_1 \cdot R_2$ .

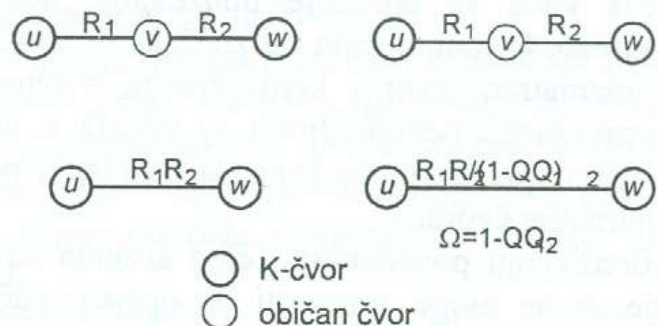
Pod paralelnom agregacijom podrazumeva se zamena dve veze koje povezuju dva ista čvora jednom vezom čija je pouzdanost  $1 - Q_1 \cdot Q_2$ , gde su  $Q_1$  i  $Q_2$  nepouzdanosti razmatranih veza ( $Q_1 = 1 - R_1$ ,  $Q_2 = 1 - R_2$ ). Ovaj način sprovođenja serijskih i paralelnih agregacija primenjuje 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 ( $\Omega$ ) 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 sprovođenja svih serijsko-paralelnih agregacija u sistemu, dobijena pouzdanost sistema množi se sa konačnim korekcionim faktorom.

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.



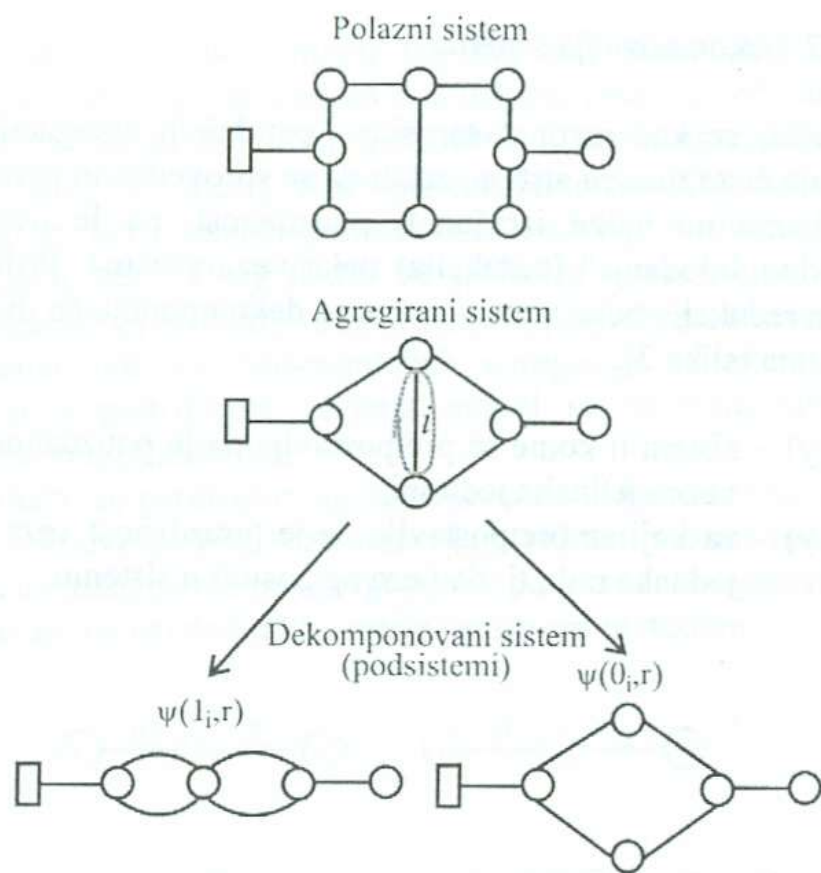
Slika 1. – Serijska agregacija po metodi K-čvora

### 3.1.2 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.





Slika 2. – Prikaz principa agregacije i dekompozicije sistema

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:

$$R = r_i \psi(1_i, r) + (1 - r_i) \psi(0_i, r) \quad (15)$$

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.

### 3.1.3 Određivanje međupouzdanosti

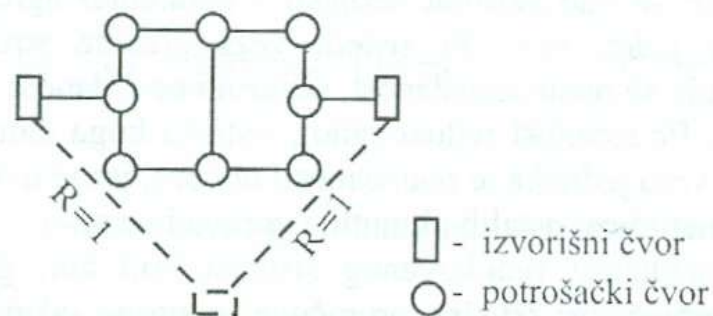
Ako se kao rezultat serijsko - paralelnih agregacija dobije jedna veza ili sistem veza granate strukture, određuje se međupouzdanost, odnosno pouzdanost podsistema. Pouzdanost redukovano sistema koga čini samo jedna veza jednaka je pouzdanosti te veze, jer je u nju već uračunat uticaj ostalih ukinutih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

### 3.2 Pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema

Fizička povezanost određenog čvora (potrošača) sa izvorištem je samo potreban, ali ne i dovoljan, uslov za ispravno funkcionisanje čvora. Pored rasporeda veza koje su u funkciji, količina vode i pritisak u čvoru zavise i od protoka vode koji mogu da propuste te veze. Znači, pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara zavisi od karakteristika veze kao što su prečnik, dužina veze i koeficijent hrapavosti, pa je i ove karakteristike neophodno definisati u slučaju određivanja mehaničko-hidrauličke pouzdanosti čvorova i sistema.

Kao što je već istaknuto, mehanička pouzdanost nekog čvora zavisi samo od konfiguracije (načina povezanosti čvorova) sistema i pouzdanosti veza u tom sistemu. Za jedan jednostavan primer prikazan na slici 4 mehanička pouzdanost potrošačkog čvora ( $R_{meh}$ ) iznosi:

$$R_{meh}(S) = 1 - (1 - R_i) \cdot (1 - R_j) \\ R_{meh}(S) = R_i \cdot (1 - R_j) + R_j \cdot (1 - R_i) + R_i \cdot R_j \quad (16)$$

Međutim, pritisak u potrošačkom čvoru, za neke od podsistema može biti manji od minimalnog zahtevanog pritiska, što znači da će pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara za taj podsystem biti jednaka nuli, odnosno ukupna (mehaničko-hidraulička) pouzdanost bi-



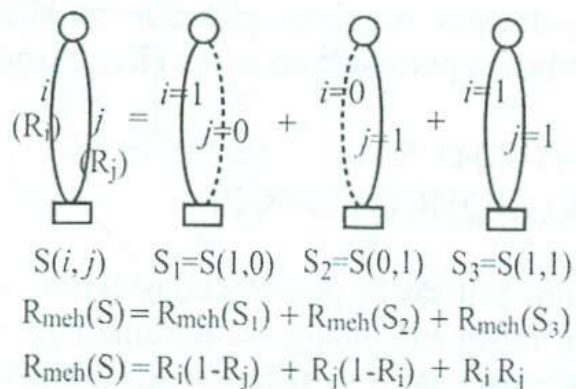
će manja za vrednost mehaničke pouzdanosti tog podsistema. Npr. ako za sistem prikazan na slici 4 potrošački čvor može da dobije zahtevane količine vode odgovarajućeg pritiska samo u slučaju kada rade obe veze, pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara za podsisteme  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$  biće:

$$\begin{aligned} R_{hid}(S_1) &= 0 \\ R_{hid}(S_2) &= 0 \\ R_{hid}(S_3) &= 1 \end{aligned} \quad (17)$$

U tom slučaju mehaničko - hidraulička pouzdanost celog sistema biće:

$$R(S) = R_{meh}(S_1) \cdot R_{hid}(S_1) + R_{meh}(S_2) \cdot R_{hid}(S_2) + R_{meh}(S_3) \cdot R_{hid}(S_3)$$

$$R(S) = R_i \cdot R_j \quad (18)$$



Slika 4. – Dekompozicija sistema u cilju određivanje pouzdanosti sistema

Zbog tih hidrauličkih osobenosti 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 hidraulike, 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  $(0, y)$  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.

Za rešavanje problema ustaljenog tečenja u mrežama pod pritiskom razvijen je veći broj metoda, koje se zasnivaju na jednom od sledeća dva pristupa: (1) rešavanje jednačina po nepoznatim protocima (metod veza) ili (2) rešavanje jednačina po nepoznatim piježometarskim kotama (metod čvorova). U okviru modela pouzdanosti, za proračun ustaljenog tečenja korišćen je programski paket EPANET 2.0, koji jednačine rešava po nepoznatim piježometarskim kotama.







Tabela 1. Karakteristike čvorova i veza za razmatrani sistem

čvor	Q (l/s)	veza	L (m)	D (mm)	Pouzdnost veze
1	6,1	1	710	200	0,99766
2	9,0	2	795	150	0,99608
3	11,19	3	500	350	0,99917
4	11,21	4	495	100	0,99674
5	12,63	5	280	100	0,99815
6	11,74	6	410	100	0,9973
7	13,42	7	430	300	0,99929
8	8,17	8	425	100	0,9972
9	15,12	9	645	200	0,99788
10	12,9	10	555	300	0,99908
11	18,52	11	305	200	0,999
		12	605	100	0,99601
		13	505	125	0,99709
		14	580	100	0,99618
		15	500	200	0,99835
		16	500	400	0,99917
		17	700	400	0,99884

Broj kvarova (defekata) različit je za cevi različitih prečnika, a korišćene su vrednosti koje približno odgovaraju srednjoj vrednosti podataka prikupljenih za beogradski vodovod (vrednosti su date u tabeli 2). Pretpostavlja se da vreme popravke kvara, bez obzira na prečnik cevi, iznosi 3 dana (što je vreme u okviru koga se popravi preko 50% od prijavljenih kvarova u beogradskom

vodovodu). Vrednosti broja otkaza, intenziteta otkaza  $\lambda$  i popravke  $\mu$ , kao i jedinične pouzdanosti R (pouzdanost za jedan kilometar cevi) dati su u tabeli 2. Radi se o popravljivim elementima sistema, pa se pouzdanost računa korišćenjem izraza 2, pri čemu su:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{\frac{365 \cdot 24 - N \cdot \text{MTTR}}{N}} \quad (19)$$

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} = \frac{1}{T \cdot 24} \quad (20)$$

gde je MTBF - srednje vreme između otkaza, a MTTR - srednje vreme popravke

Tabela 2. Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti

D (mm)	N (otkaz/km·god)	$\lambda$	$\mu$	$R_0$
100	0,8	$91,93 \cdot 10^{-6}$	0,01389	0,99342
125	0,7	$80,37 \cdot 10^{-6}$		0,99425
150	0,6	$68,83 \cdot 10^{-6}$		0,99507
200	0,4	$45,81 \cdot 10^{-6}$		0,99671
300	0,2	$22,87 \cdot 10^{-6}$		0,99835
400	0,2	$22,87 \cdot 10^{-6}$		0,99835

U tabeli 3 dati su rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema korišćenjem programa NETREL za obe



razmatrane varijante, kao i rezultati ukupne pouzdanosti sistema i pojedinih potrošačkih čvorova. Date su i vrednosti vremenskog deficita vode za te čvorove. Pretpostavlja se da je hidraulika u potrošačkom čvoru zadovoljena ako u njemu postoji visina pritiska od najmanje 25 m.

Tabela 3. Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema ( $p/pg > 25$  m)

čvor	varijanta 1			varijanta 2		
	$R_{meh}$	$R_{ukupno}$	T (dan)	$R_{meh}$	$R_{ukupno}$	T (dan)
1	0,99917	0,99917	0,3	0,999999	0,99917	0,3
2	0,99916	0,99531	1,7	0,99999	0,99683	1,2
3	0,999165	0,98517	5,4	0,999999	0,9908	3,4
4	0,999165	0,99834	0,6	0,999999	0,99917	0,3
5	0,999165	0,97262	10	0,999999	0,98812	4,3
6	0,999165	0,99763	0,9	0,999999	0,99999	0
7	0,99916	0,98677	4,8	0,999993	0,99789	0,8
8	0,999165	0,99669	1,2	0,999999	0,99999	0
9	0,999162	0,99407	2,2	0,999995	0,99899	0,4
10	0,999165	0,98506	5,5	0,999999	0,9936	2,3
11	0,999159	0,99598	1,5	0,999993	0,99751	0,9
$R_{sis}$	0,999141	0,9688	11,4	0,999974	0,98261	6,3
R1	0,999159	0,97262	10	0,99999	0,98812	4,3
R2	0,999164	0,99153	3,1	0,999997	0,99655	1,3
R3	0,999163	0,991	3,3	0,9999996	0,9964	1,3

Kao što se vidi iz prikazanih rezultata, pouzdanost čvorova koji su vezani većim brojem veza (čvorovi 4 i 6), veća je od pouzdanosti čvorova vezanih manjim brojem veza. Pored toga, na pouzdanost čvora utiče i udaljenost od izvorišnog čvora, tako da je pouzdanost čvorova bliže izvorišnim čvorovima, naravno, veća od pouzdanosti udaljenijih čvorova. Broj izvorišnih čvorova u sistemu takođe značajno utiče na pouzdanost. Sa povećanjem broja tih čvorova povećava se pouzdanost, što se i moglo očekivati. Pouzdanost čvorova koji se nalaze bliže izvorišnim čvorovima (čvor 1 u varijanti 1 i čvorovi 1 i 8 u varijanti 2) ne razlikuje se značajnije od vrednosti mehaničke pouzdanosti za te čvorove. Ovo se objašnjava činjenicom da hidraulički parametri sistema nemaju značajniji uticaj na te čvorove, odnosno, da su pritisci u ovim čvorovima zadovoljeni u gotovo svim situacijama, izuzev u slučaju otkaza cevovoda koji ih spaja sa izvorišnim čvorom.

Sa stanovišta pouzdanosti kritičan čvor u sistemu je čvor 5, sa vremenskim deficitom vode oko 10 dana prosečno godišnje. Vremenski deficit čvorova 10, 3 i 7 takođe je veliki i iznosi oko 5 dana. Uvođenje dodatnog izvorišnog čvora u razmatrani sistem, sa kotom od 120 mm, značajno povećava pouzdanost kritičnih čvorova. U tom slučaju, vremenski deficit vode u čvoru 5 smanjuje se za nešto više od 5 dana, dok za čvorove 10, 3 i 7 to smanjenje iznosi 3,2, 2 i 4 dana respektivno. Uticaj

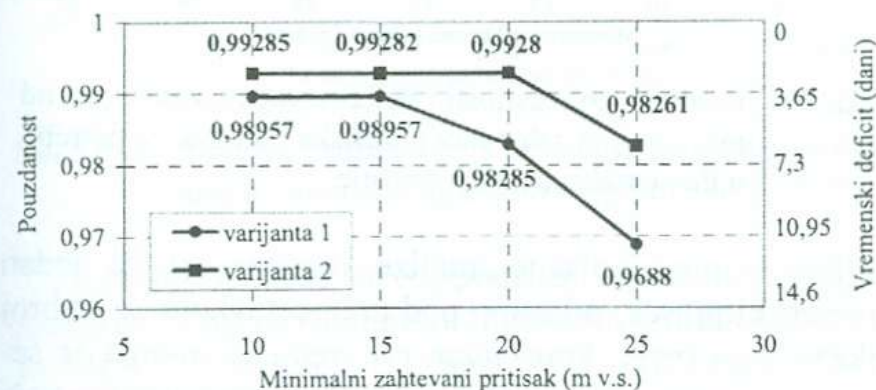


dodatnog izvorišta na čvor 3 je manji nego na ostale kritične čvorove, što je posledica hidrauličkih karakteristika sistema, odnosno činjenice sa je ovaj čvor najudaljeniji od dodatnog izvorišta, pa se može očekivati da su njegovi pozitivni uticaji najmanji.

Za razliku od napred opisanih čvorova, uvođenje dodatnog izvorišta (izvorišnog čvora 13) nema gotovo nikakvog uticaja na ukupnu (mehaničko-hidrauličku) pouzdanost, odnosno vremenski deficit vode u čvoru 1. Naime, kota vode u dodatnom izvorišnom čvoru ( $z_{13}=120$  mm) nešto je manja od kote u izvorišnom čvoru 12 ( $z_{12}=123,3$  mm), a čvor 1 je najudaljeniji čvor od dodatnog izvorišta, pa u slučaju otkaza veze između izvora 12 i čvora 1, odnosno u slučaju kada se naselje snabdeva samo iz dodatnog izvorišta, pritisak u čvoru 1 je manji od zahtevanog pritiska, koji u ovom primeru iznosi 25 m.

Ukupna pouzdanost sistema određena je za nekoliko različitih vrednosti dozvoljenih minimalnih pritiska vode u sistemu. Promene pouzdanosti i deficita vode za razmatrane slučajeve, za obe varijante, date su na slici 6. Kao što se može videti vremenski deficit vode u razmatranom sistemu značajno se menja sa promenom zahtevanog pritiska. U varijanti sa jednim izvorištem deficit vode iznosi oko 11 dana, za slučaj zahtevanog pritiska od 2,5 bara (što je zakonom propisani minimalni pritisak u mreži), a koji omogućava zadovoljavanje potreba korisnika koji se nalaze u objektima do visine trećeg sprata, dok se za

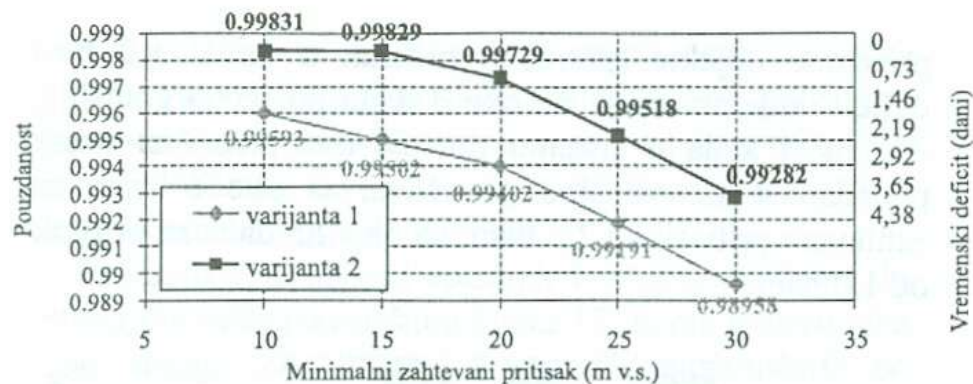
prizemne objekte (potreban pritisak u mreži 1,0 bar) deficit vode smanjuje na oko 3 dana prosečno godišnje. Za slučaj kada u sistemu postoje dva izvorišna čvora pouzdanost sa značajno povećava, sa oko 6 dana za zahtevani pritisak od 2,5 bara, na oko 2,5 dana za pritisak od 1,0 bara.



Slika 6. – Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u mreži, za potrebe  $Q_{max}^h$

Analiza pouzdanosti urađena je i za slučaj kada su potrebe u sistemu na nivou maksimalne dnevne potrošnje, a minimalni zahtevani pritisci od 10 m v.s. do 30 m v.s. Na slici 7 prikazana je promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog pritiska koji se zahteva u sistemu.





Slika 7. – Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u mreži, za potrebe u danu maksimalne potrošnje

Sve napred opisane analize urađene su za jedan vremenski presek, odnosno pod pretpostavkom da je broj otkaza veza (cevi) konstantan po vremenu (menja se samo u zavisnosti od prečnika cevi). Ova pretpostavka važi za period normalne eksploatacije elementa, kada do otkaza dolazi slučajno, kao posledica različitih uticaja. Posle ovog perioda, usled dotrajalosti elementa, broj otkaza se povećava.

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 8.



Slika 8. – 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 deficita vode iznosi oko 22 dana. U slučaju zahtevane visine pritiska u sistemu od 15 m, promena pouzdanosti je znatno manja, pa povećanje vremenskog deficita vode u ovom slučaju iznosi oko 8 dana.

## 5. ZAKLJUČAK

Razvijeni model (NETREL) za određivanje pouzdanosti efikasan je nov softverski paket koji, pored određivanja mehaničke pouzdanosti omogućava:



- određivanje ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti sistema različitih konfiguracija (od regionalnih sistema pretežno granate strukture, do gradskih distributivnih sistema sa velikim brojem zatvorenih struktura);
- određivanje pouzdanosti na nivou celog sistema, kao i pouzdanosti pojedinih potrošačkih čvorova sistema. To 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.;
- poboljšavanje pouzdanosti uvođenjem novih veza i čvorova u sistem.

## 6. LITERATURA

- [1] DHILLON B. S., SINGH C.: *Engineering reliability, new techniques and applications*, A Wiley-Interscience, (1981)
- [2] ĐORĐEVIĆ B.: *Ugrađivanje pouzdanosti i pogodnosti održavanja u projekte hidrotehničkih sistema*, Vodoprivreda, 169-170(5-6/1997), Beograd, (1997)

- [3] ĐORĐEVIĆ B.: *Teorija pouzdanosti u hidrotehnici*, Građevinski kalendar, Beograd, (1999)
- [4] DAŠIĆ T., ĐORĐEVIĆ B.: *Metod za određivanje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema (NETREL)*, časopis "Vodoprivreda", 203-204, (3-4/2003), Beograd (2003)
- [5] GARGANO R., PIANESE D.: *Reliability as tool for hydraulic network planning*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 5, (2000)
- [6] HENLEY E. J., KUMAMOTO H.: *Reliability engineering and risk assessment*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., (1981)
- [7] NAHMAN J. M.: *Dependability of engineering systems - modeling and evaluation*, Springer, (2002)
- [8] REINSCHKE K.: *Modelle zur zuverlässigkeits und empfindlichkeitsanalyse von systemen*, (prevod na ruski jezik, u izdanju "Mir", Moskva), (1979)
- [9] VUJOŠEVIĆ M.: *Operaciona istraživanja*, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, (1999)
- [10] WAGNER J., SHAMIR U., MARKS D.: *Water distribution reliability: analytical methods*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 3, (1988)